



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEL TERRITORIO,
DELL'AMBIENTE E DELLE GEOTECNOLOGIE**

Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi, 24
10129 Torino - Italy

UTILIZZO DELLE TECNICHE DELLA GEOMATICA PER LA MODELLAZIONE DEL TERRITORIO

A cura di:
Andrea BIASION
Enrico BORGOGNO MONDINO
Leandro BORNAZ
Fabio GIULIO TONOLO
Andrea LINGUA
Fulvio RINAUDO



[pagina lasciata intenzionalmente vuota]



1 PREMESSA

La Regione Autonoma Valle d'Aosta ha affidato al Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie del Politecnico di Torino il compito di svolgere una ricerca sulle tecniche della Geomatica che possono essere utilizzate per la modellazione del territorio e in particolare in zone limitate di esso soggette a fenomeni franosi.

La ricerca si articola in tre fasi:

- ricerca bibliografica sulle tecniche di modellazione del territorio;
- esecuzione di una serie di test sperimentali su 4 zone di interesse della Regione;
- redazione di un capitolato speciale d'appalto per l'esecuzione del monitoraggio metrico di siti soggetti a movimenti gravitativi.

La presente relazione descrive i risultati relativi alla prima fase della ricerca.



[pagina lasciata intenzionalmente vuota]



2 INTRODUZIONE

Il monitoraggio dei fenomeni gravitativi rappresenta una delle più importanti e attuali azioni di protezione del territorio. I parametri utili a tali azioni di prevenzione richiedono sempre un approccio di tipo interdisciplinare.

Le tecniche attualmente utilizzate per il monitoraggio dei fenomeni gravitativi sono di tipo geomatico, geotecnico e geologico.

Le tecniche della geomatica attualmente utilizzate consistono nel rilievo, a intervalli di tempo prefissati, di una serie discreta e limitata di punti considerati utili alla descrizione del fenomeno dinamico. Tale rilievo è eseguito mediante l'impiego di tecniche di topografia terrestre (stazioni totali motorizzate automatizzate) o mediante l'utilizzo di tecniche satellitari (GPS).

Entrambe le tecnologie possono essere utilizzate in modo diretto o remoto consentendo l'istituzione di vere e proprie centrali di monitoraggio geometrico.

I costi di impianto di tali tecniche sono elevati e anche la manutenzione comporta impegni economici ragguardevoli a fronte di risultati a volte eccessivamente precisi e comunque sempre caratterizzati da una eccessiva discretizzazione delle informazioni che non consente valutazioni effettive delle velocità di spostamento estese a tutta la massa interessata dei movimenti né, ovviamente, stime attendibili dei volumi che di volta in volta vengono coinvolti dal fenomeno dinamico in analisi.

Sia le tecniche topografiche terrestri che quelle satellitari sono caratterizzate dalla necessità di agire a contatto diretto con la porzione di territorio interessata dall'operazione di rilievo sottoponendo sovente gli strumenti a rischi di danneggiamenti che interrompono l'azione del monitoraggio obbligando al nuovo impianto del sistema di controllo.

Da parecchi anni si è assistito ad un sempre più rapido sviluppo di tecniche di rilievo geometrico a distanza che, seppur meno precise in termini assoluti, offrono l'indiscutibile vantaggio di poter descrivere ampie zone di territorio senza venire a contatto con il terreno in movimento e quindi di ridurre drasticamente i costi di manutenzione del sistema di controllo.

Il presente studio si concentra sulle tecniche della Geomatica che, ad avviso degli autori, meglio si prestano ad un utilizzo estensivo nei campi di indagine oggetto della ricerca: la Fotogrammetria (nelle sue applicazioni da elicottero, da aereo e da satellite), il LIDAR e il SAR.

Queste tecniche consentono, a diversi livelli di precisione, di definire la forma della porzione di territorio interessata dal movimento gravitativi naturale e quindi, applicate successivamente in tempi diversi, la stima sia delle velocità (in direzione, verso e modulo) che dei volumi interessati dal fenomeno. La possibilità che tutte queste tecniche offrono di integrare i modelli descrittivi della forma con informazioni di tipo radiometrico, sia nella banda del visibile che nelle bande tipiche utilizzate per l'acquisizione del dato primario, consente inoltre di unire alla modellazione 3D del fenomeno anche altre informazioni utili per una più completa interpretazione del fenomeno stesso.

Lo scopo di questa prima fase della ricerca consiste nel dimostrare come, utilizzando le tecniche fotogrammetriche, LIDAR e SAR, sia possibile concepire un nuovo approccio all'azione di monitoraggio non più inteso come azione di elevata precisione da attivare solo in caso di crisi ma come una vera e propria azione di controllo e prevenzione a garanzia della



sicurezza delle persone e delle infrastrutture che in livelli successivi di precisione e di estensione consenta di attivare le più idonee azioni di monitoraggio geometrico.

Nei capitoli seguenti verranno esposti in modo succinto ma esauriente i principi di funzionamento delle tecniche analizzate unitamente alle caratteristiche tipiche di ognuna per l'acquisizione dei dati primari, per la loro successiva elaborazione al fine della produzione degli elaborati ritenuti più idonei all'azione del monitoraggio territoriale.

Particolare cura viene posta nella presentazione di risultanze sperimentali pubblicate a livello internazionale e nazionale unitamente a quelle conseguite dal Gruppo di Ricerca di cui gli autori fanno parte.

La relazione costituisce anche un utile materiale informativo per i responsabili delle azioni di controllo del territorio che saranno in grado di selezionare, di volta in volta, l'approccio più conveniente, sia da un punto di vista tecnico che economico.

Le tecniche che nel seguito saranno presentate hanno come comune fattore il fatto di fornire, quale primo risultato un grigliato (regolare o meno) di punti discreti che, opportunamente trattati forniscono la possibilità di costruire modelli digitali della porzione di territorio interessata.

Si ritiene utile anteporre un capitolo riguardante la definizione e la descrizione dei modelli altimetrici intesi come strumenti di seconda generazione che consentono la gestione della conoscenza geometrica dell'oggetto rilevato.

3 MODELLI ALTIMETRICI (DEM)

Da sempre l'uomo ha cercato di visualizzare e gestire il territorio nella sua realtà tridimensionale. Nella cartografia disegnata, per la sua migliore comprensione, si utilizzavano anche tecniche di ombreggiatura e sfumo per facilitare l'osservatore nella percezione dei rilievi e completare in questo modo l'informazione fornita dalle sole curve di livello.

Questi metodi di rappresentazione dell'altimetria sono però difficilmente utilizzabili dalla semplice logica di un computer ed ecco quindi la necessità di definire dei procedimenti di descrizione dell'altimetria che siano invece compatibili con un trattamento elettronico dei dati.

Per questa esigenza si utilizzano essenzialmente dei punti quotati senza una particolare topologia che li descriva.

Questi punti sono sovente disposti secondo un grigliato a maglia regolare con passo ΔE , ΔN . Per un territorio che presenti delle forti irregolarità altimetriche, sarà necessario scegliere una maglia sufficientemente densa.

Questo modo di rappresentazione digitale della morfologia del terreno, è noto come **DTM** (*Digital Terrain Model*) e fa riferimento ad un modello di dati di tipo *raster*. Il **DTM** è utile, oltre che per conoscere la quota di un certo punto, anche per la produzione di cartografia derivata, come ad esempio la carta delle pendenze, la carta dell'esposizione, la carta dell'insolazione ecc.. In letteratura è anche noto come: **DEM** (*Digital Elevation Model*) o **DHM** (*Digital Height Model*).

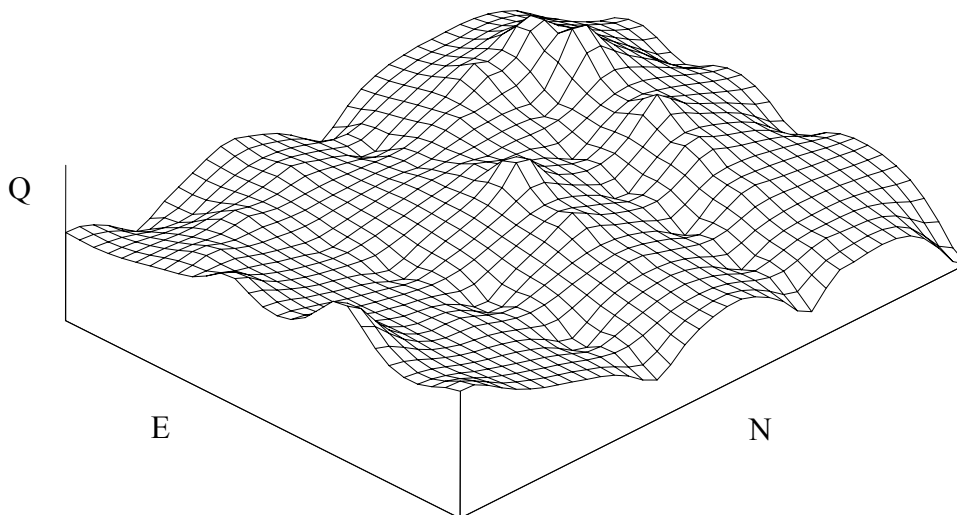


Figura 1 - Grigliato regolare e rappresentazione assonometrica di un DTM

La rappresentazione dell'altimetria del terreno secondo un grigliato a maglia regolare, e quindi con tutte le quote disposte in una matrice di dati bidimensionale, presenta il vantaggio di poter essere facilmente elaborabile da un computer.

Per ciascun nodo della maglia regolare sarà sufficiente memorizzare solo la quota in quanto le coordinate planimetriche saranno facilmente ricavabili dalla posizione del nodo all'interno della matrice stessa con le semplici relazioni:

$$X_{i,j} = X_{origine} + \Delta E * (j-1) \qquad Y_{i,j} = Y_{origine} + \Delta N * (i-1) \qquad (1)$$

dove:

- i = indice di riga
- j = indice di colonna.

I principali svantaggi di questo modello stanno nella necessità di utilizzare una maglia regolare molto fitta per la descrizione di terreni accidentati e, al contrario, nella grande quantità di dati ridondanti che vengono memorizzati nel caso di descrizione di un terreno pianeggiante. Risulta evidente che le discontinuità naturali o artificiali del terreno non possono essere descritte che in modo molto incompleto da un grigliato a maglia regolare.

Per molte applicazioni è necessario individuare queste discontinuità con delle "linee di rottura" o "*break lines*" definite da una serie di punti (*polyline*) dotati, ciascuno, oltre che dell'altimetria anche dalle coordinate planimetriche. Si devono descrivere come *break-lines* ad esempio i bordi delle scarpate, i corsi d'acqua e tutto ciò che presenta una variazione brusca di pendenza del terreno. I punti che descrivono queste linee devono essere scelti con un passo corrispondente a quello della maglia regolare dei punti che costituiscono il DTM.

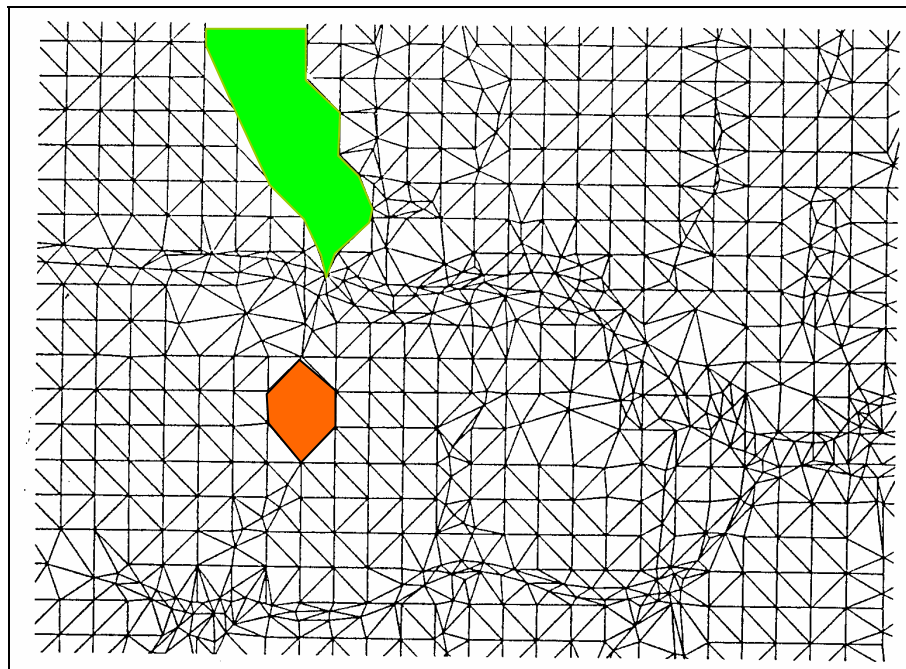


Figura 2 - DTM con break lines

Il grigliato di Figura 2 deriva da una base a maglia regolare e incorpora anche le *break lines* definite da strade e corsi d'acqua. Le zone dove il terreno non può essere restituito direttamente perché non visibile, come ad esempio un bosco o un gruppo di edifici (vedi zona verde e rossa di Figura 2), devono essere escluse dal **DTM** perché i nodi al loro interno possono produrre degli errori di interpolazione altimetrica essendo dotati di una quota che rappresenta o la sommità degli alberi o la gronda degli edifici e non la quota del terreno.

Il panorama della descrizione digitale della morfologia del terreno si può completare considerando anche i **TIN** (*Triangulated Irregular Network*) letteralmente rete irregolare di triangoli o "triangoli di Delaunay". Il TIN è un modello tridimensionale del terreno generato a partire da un insieme sparso di punti quotati (piano quotato), costituito da una rete di triango-

li di minimo perimetro (vedi Figura 3). Questo modello presenta una migliore adattabilità alla forma reale del terreno rispetto a quello con maglia regolare perché i punti quotati sono distribuiti in modo disomogeneo ma sono certamente presenti in numero maggiore nelle zone più accidentate. Il maggior problema che si può rilevare in questo modello di rappresentazione è che da uno stesso insieme di punti quotati si possono ottenere diversi **TIN** in funzione dei diversi algoritmi di triangolazione applicabili. Inoltre, per ogni punto bisogna memorizzare le tre coordinate (X, Y, Q) non essendo possibile una gestione a matrice come nel caso del **DTM** a maglia regolare.

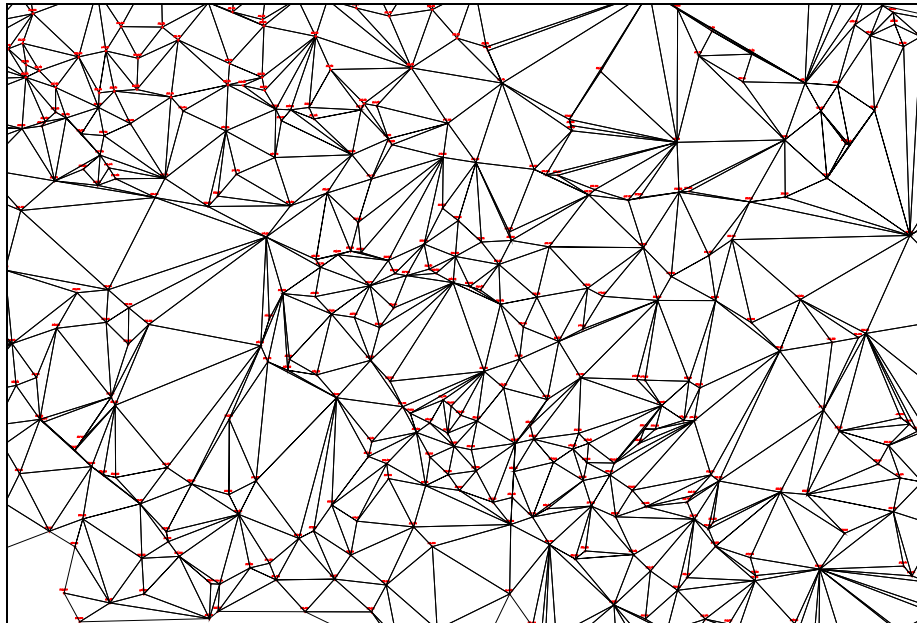


Figura 3 - Esempio di TIN (Triangulated Irregular Network)

3.1 Sistemi di riferimento e coordinate

Un **DTM** a maglia regolare può essere costruito utilizzando un grigliato “geografico” o un grigliato “metrico” (vedi Figura 4).

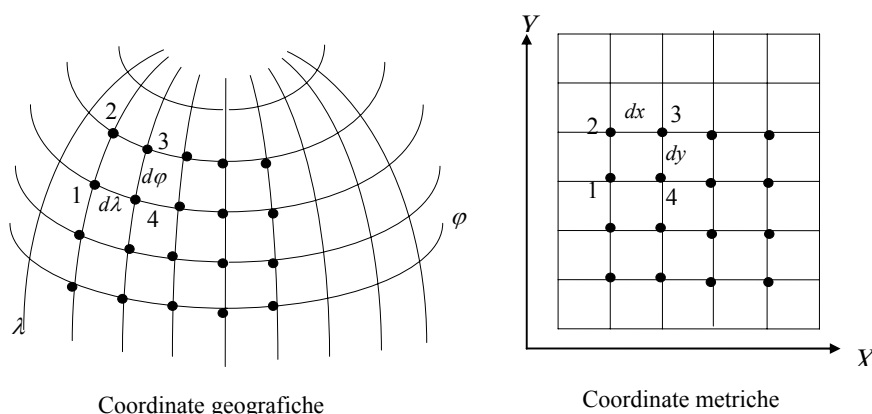


Figura 4 - DTM e sistema di coordinate

Il grigliato geografico è usato di solito per **DTM** a scala regionale o nazionale. Presenta il vantaggio di essere continuo di non avere cioè dei cambi di riferimento dovuti al cambio del fuso. Il passo, di solito, è espresso in secondi sessagesimali. Presenta lo svantaggio di non avere una densità omogenea di campionamento nelle due direzioni (longitudine e latitudine).



Il grigliato metrico è usato per descrivere porzioni di territorio più modeste; la densità di campionamento è omogenea nelle due direzioni X,Y e ha inoltre il vantaggio di essere direttamente sovrapponibile senza trasformazioni di coordinate alla cartografia numerica preesistente. Non è possibile passare da un sistema a un altro mantenendo la forma quadrata della maglia.

3.2 Tecniche di formazione dei DTM

Le principali fasi necessarie per la costruzione di un **DTM - TIN** sono le seguenti:

- acquisizione dei dati e loro trasformazione in un unico sistema di riferimento;
- elaborazione del DTM - TIN con eventuale impiego di algoritmi di interpolazione;
- visualizzazione del DTM - TIN e archiviazione dei dati originali ed elaborati.

L'acquisizione dei dati può avvenire con i seguenti metodi:

- digitalizzazione o scansione di curve di livello e punti quotati da cartografia esistente: la qualità del DTM ottenuto con questo metodo dipende, naturalmente, dalla precisione della cartografia e dall'accuratezza del metodo di acquisizione.
- rilievo diretto sul terreno (topografico); il metodo garantisce una elevata precisione a scapito dei tempi di acquisizione e quindi dei costi piuttosto elevati. Questo metodo è adatto quindi per la rappresentazione di zone di limitata estensione come cave e frane o per la stima di volumi di materiale accumulato o asportato.
- restituzione fotogrammetrica: è il metodo più indicato per la rappresentazione altimetrica di zone di grande estensione unita ad una buona precisione. A questo metodo sono applicabili tecniche di acquisizione molto automatizzate che utilizzando immagini digitali e algoritmi di autocorrelazione, eliminano quasi completamente l'intervento umano con notevole vantaggio economico.
- metodi di telerilevamento da satellite: la precisione di questo metodo è compatibile con la piccola scala (1:50.000) e quindi viene utilizzato dagli enti di interesse nazionale (IGM, ecc.).

3.3 Metodi di interpolazione.

Non essendo il terreno una superficie matematica, qualsiasi tecnica di interpolazione non può che dare dei risultati approssimati più o meno precisi. La scelta di un particolare algoritmo dipenderà di volta in volta da vari fattori quali il tipo di terreno in questione, il tipo, la quantità e l'affidabilità delle informazioni altimetriche di base e, non ultima, la velocità di elaborazione.

3.3.1 Media ponderata

E' il più semplice tra i procedimenti qui descritti. Consiste nel mediare le quote Z dei punti usati dando loro un 'peso' tanto più forte quanto più sono vicini al nodo da interpolare. La formula che da la quota interpolata $Z_{i,j}$ è la seguente:

$$Z_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^k Z_n / d_n^r}{\sum_{n=1}^k 1 / d_n^r} \quad (2)$$

dove

- i e j identificano la riga e la colonna della griglia
- n il generico punto misurato
- k è il numero di punti elaborati
- r è il grado che determina il peso (in genere varia da 1 a 6; il valore usualmente impiegato è 2)

Il numero di punti base n può essere qualunque, purché essi non siano troppo lontani dal nodo O (al massimo tre volte il passo di interpolazione) nel qual caso il loro apporto diventa trascurabile. La situazione ottimale è quella di Figura 5 con almeno un punto per quadrante. Nel caso in cui un punto P_n sia molto vicino al nodo O , la (2) tende a ∞ ; è necessario quindi un test preliminare sulla distanza d_n . In questo caso, ovviamente, la soluzione consiste nel porre direttamente $Z_{i,j}=Z_n$.

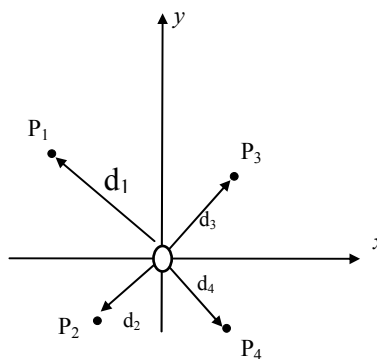


Figura 5 - Disposizione ottimale dei punti

In Figura 5:

O	nodo da interpolare
$P_1 P_2 P_3 P_4$	punti base di quota $Z_1 Z_2 Z_3 Z_4$
$d_1 d_2 d_3 d_4$	distanze dei punti dal nodo da interpolare

3.3.2 Piano interpolatore

Consiste nel determinare il piano che meglio interpola, con il metodo dei minimi quadrati, gli n punti di quota nota.

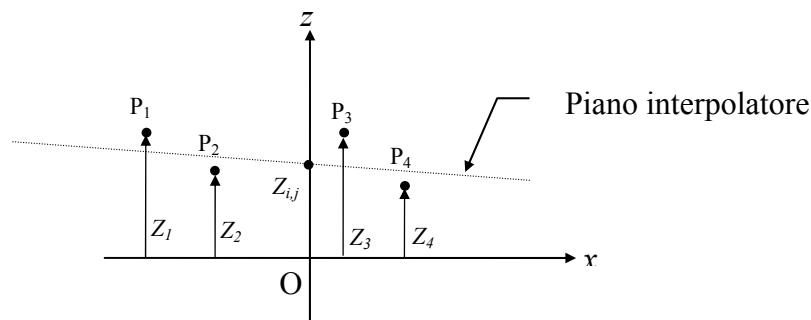


Figura 6 - Calcolo del piano interpolatore

Il piano interpolatore si determina con il seguente procedimento.

Sia $ax+by+c=z$ l'equazione di un piano generico. Essendo 4 i punti per l'interpolazione del piano nell'esempio in esame (vedi Figura 6), si avrà:

$$\begin{cases} ax_1 + by_1 + c = z_1 \\ ax_2 + by_2 + c = z_2 \\ ax_3 + by_3 + c = z_3 \\ ax_4 + by_4 + c = z_4 \end{cases} \quad (3)$$

La stima dei parametri del piano interpolatore avviene con il metodo dei minimi quadrati e il calcolo degli scarti dei punti rispetto al piano (distanze) fornisce una misura della adattabilità dei punti utilizzati al piano interpolato.

3.3.3 Interpolazione con una superficie del 2° ordine

Questo metodo di interpolazione, e più ancora quello descritto nel punto successivo, usando delle superfici curve, consentono una maggiore 'dinamica' nella determinazione della quota. L'espressione seguente rappresenta l'equazione generale di una quadrica:

$$a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + e \cdot y + f = z \quad (4)$$

Il problema si riduce alla determinazione dei 6 coefficienti incogniti **a,b,c,d,e,f**. Volendo risolvere il problema con i minimi quadrati, è necessario disporre di un numero di equazioni, e quindi di un numero di punti di quota nota, maggiore di 6. Un numero ottimale di punti può essere di 10 o 12, disposti il meglio possibile intorno al punto da interpolare X_{nodo}, Y_{nodo}

Per la 'cattura' dei punti di quota nota viene utilizzato il seguente criterio.

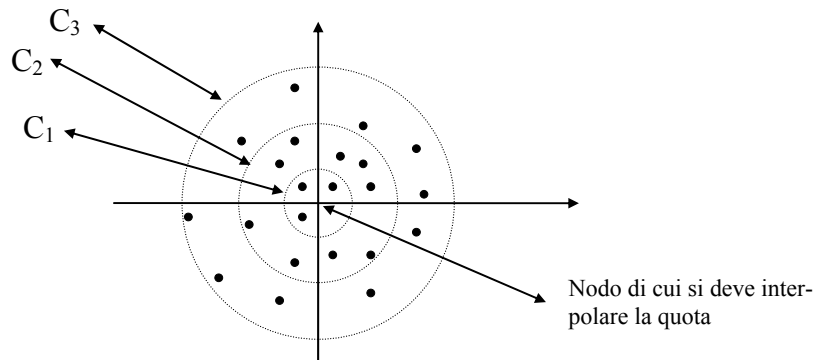


Figura 7 - Cattura dei punti di quota nota

Viene inizialmente definito un cerchio C_1 di raggio pari, per esempio, al passo di interpolazione. Si contano i punti che cadono all'interno di questo cerchio: in Figura 7 sono 3. Il numero di punti è insufficiente per eseguire l'interpolazione, si aumenta allora il raggio (per esempio si raddoppia) e si verifica che nel nuovo cerchio C_2 cadono 12 punti: il numero è sufficiente e si procede quindi all'interpolazione. Da notare che il cerchio C_3 contiene già un numero di punti eccessivo.

Analogamente a quanto visto per il piano nel punto precedente, anche in questo caso avremo un sistema di n equazioni in 6 incognite (con $n > 6$):

$$\left\{ \begin{array}{l} ax_1^2 + by_1^2 + cx_1y_1 + dx_1 + ey_1 + f = z_1 \\ ax_2^2 + by_2^2 + cx_2y_2 + dx_2 + ey_2 + f = z_2 \\ \text{-----} \\ ax_i^2 + by_i^2 + cx_iy_i + dx_i + ey_i + f = z_i \\ \text{-----} \\ ax_n^2 + by_n^2 + cx_ny_n + dx_n + ey_n + f = z_n \end{array} \right. \quad (5)$$

E' opportuno in questi casi pesare il contributo di ciascun punto in funzione della sua distanza dal nodo da interpolare, assumendo come peso un numero inversamente proporzionale alla distanza del punto considerato dal punto di interpolazione.

Circa la disposizione dei punti base per l'interpolazione è necessario ancora fare alcune considerazioni. Le due curve di Figura 8 rappresentano delle sezioni nel piano [zx] delle superfici interpolanti. La prima figura rappresenta una disposizione ottimale di punti. La seconda figura invece rappresenta un caso in cui la superficie interpolante degenera per la presenza dei punti P₁ e P₂ con coordinate x,y pressoché coincidenti ma con coordinate z diverse con conseguente calcolo della quota interpolata Z_{i,j} del tutto inattendibile.

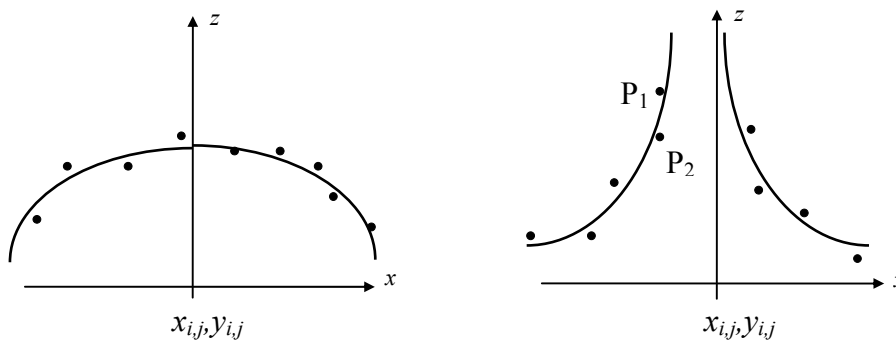


Figura 8 - Superficie interpolata

3.3.4 Interpolazione con una superficie del 3° ordine

Data l'equazione di una cubica generica:

$$a \cdot x^3 + b \cdot y^3 + c \cdot x^2 \cdot y + d \cdot x \cdot y^2 + e \cdot x^2 + f \cdot y^2 + g \cdot x \cdot y + h \cdot x + i \cdot y + l = z \quad (6)$$

Essendo 10 i coefficienti incogniti, è necessario sviluppare l'algoritmo su almeno 15 o 16 punti base. Valgono per questo tipo di curve le stesse considerazioni fatte sulle quadriche circa la cattura e la disposizione dei punti base. Anche in questo caso i coefficienti delle equazioni possono essere pesati in funzione della distanza dal nodo da interpolare $X_{i,j}, Y_{i,j}$.

Caratteristica di queste superfici rispetto alle quadriche è quella di essere meno 'rigide' e di consentire quindi una maggiore flessibilità nell'adattarsi a terreni più tormentati.

3.4 Elaborazioni derivate dal DTM

A partire dal modello digitale del terreno è possibile elaborare una serie di carte tematiche di grandissima utilità in alcuni settori dell'attività umana, dall'agricoltura alla protezione civile,

la cui pianificazione richiede un'approfondita conoscenza delle caratteristiche morfologiche del territorio.

3.4.1 Carta delle curve di livello

La produzione di questi elaborati è tanto più conveniente se si pensa alla facilità e alla velocità con cui può essere eseguita. La Figura 9 rappresenta un file immagine derivato da un **DTM** altimetrico; ciascun livello di grigio è assegnato a una fascia di quote e ogni nodo della matrice è stato trasformato in un quadratino (pixel) in corrispondenza del quale è registrato un valore numerico da 0 (nero) a 255 (bianco). I grigi più chiari rappresentano le quote più basse.

Vediamo ora invece come si può da un **DTM** di quote generare una carta di curve di livello di tipo vettoriale. Si premette comunque che questo tipo di prodotto, sebbene molto conveniente in un'ottica di tipo produttivo - aziendale, non è molto usuale in quanto la precisione delle curve ottenute non è certamente paragonabile a quella ottenibile dalla restituzione diretta. Per ottenere lo stesso livello di precisione sarebbe necessario generare un **DTM** con passo talmente piccolo da rendere tutta l'operazione non più conveniente.

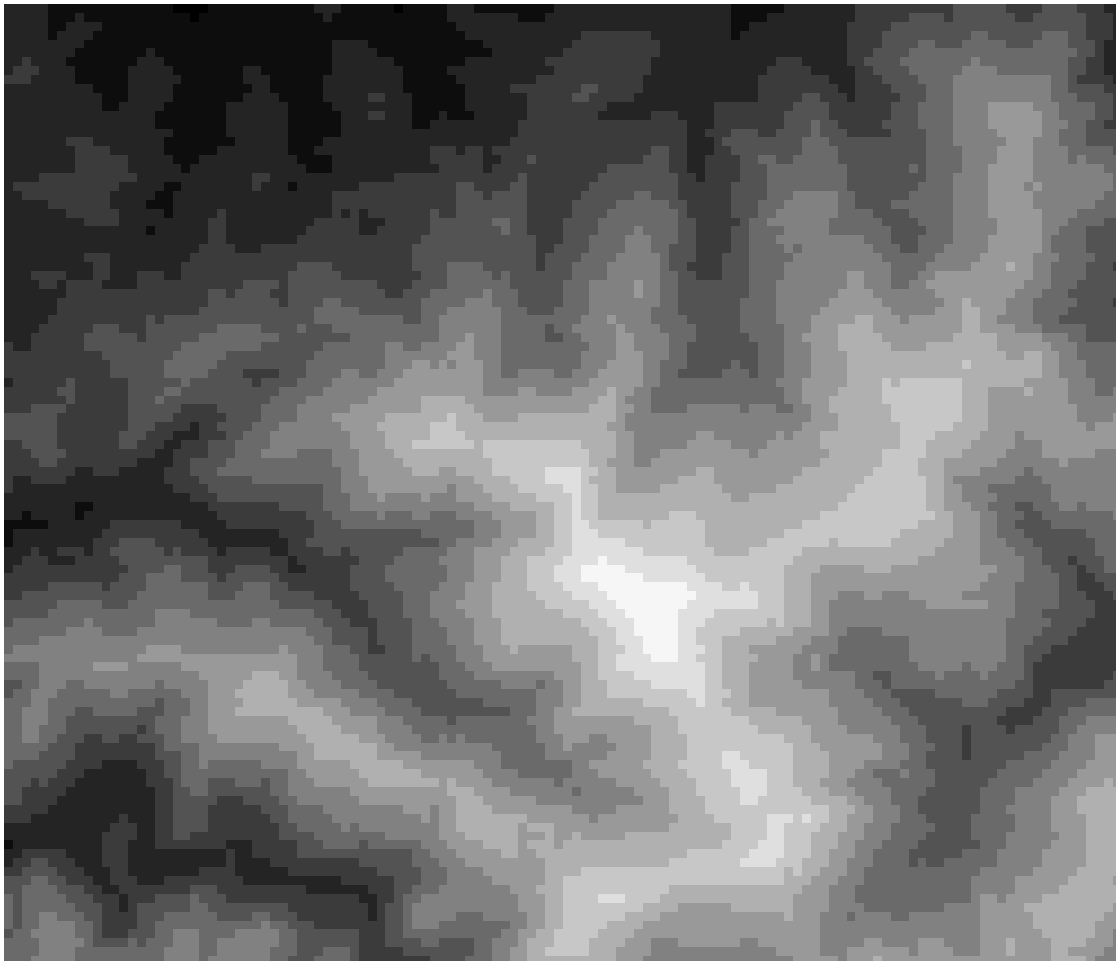


Figura 9 - Carta delle curve di livello

La Figura 10 rappresenta il **DTM** di base (grigliato regolare) e le curve di livello generate automaticamente.

La procedura per tale generazione è la seguente.

Innanzitutto si determinano le quote Z_{\min} e Z_{\max} di tutto il **DTM**; tali valori vengono arrotondati all'equidistanza tra le curve. Esempio: per $Z_{\min} = 123\text{m}$ $Z_{\max} = 879\text{m}$, equidistanza $\Delta Z = 10\text{m}$ (scala 1/10.000) avremo: $Z_{\min}=130\text{m}$, $Z_{\max}=870$.

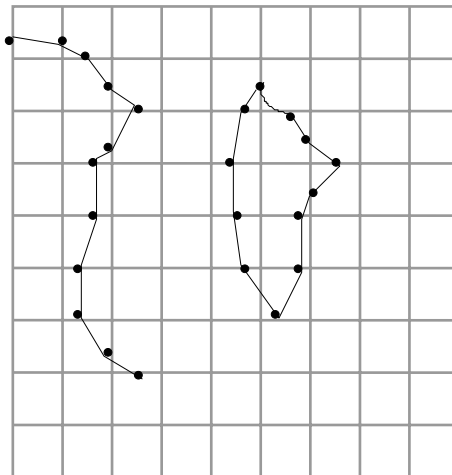


Figura 10 - Curve di livello generate da un DTM

Si parte dalla curva a quota $Z = Z_{\min}$ e si ricerca, tra tutte le maglie del **DTM** quella che ha un lato che contiene tale Z ; trovato il lato, si interpola su di esso la posizione del punto della curva (Figura 11).

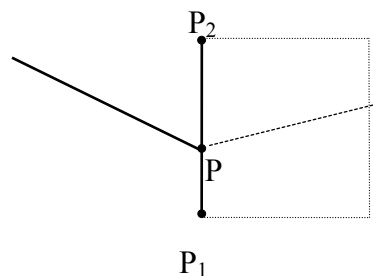


Figura 11 - Interpolazione lineare del punto di passaggio

Poste X_1, Y_1, Z_1 le coordinate del punto P_1 e X_2, Y_2, Z_2 le coordinate del punto P_2 , avremo come coordinate del punto P :

$$x_p = X \qquad y_p = Y_1 + \frac{(Z - Z_1) \cdot (Y_2 - Y_1)}{Z_2 - Z_1} \qquad z = Z \qquad (7)$$

La ricerca parte inizialmente dalle maglie di bordo. Si continua la ricerca delle maglie che contengono la quota Z , costruendo così via via la *polyline* finché la curva non termina sul bordo del **DTM** oppure si richiude su se stessa. Nel caso in cui a partire da un lato di una maglia si presentino due uscite possibili su altri due lati della stessa maglia, viene scelto il punto cui compete la minima deviazione angolare rispetto alla direzione individuata dagli ultimi due punti.

Si ricercano fino a esaurimento tutte le curve a quota Z .

Si incrementa di un'equidistanza la quota : $Z=Z+\Delta Z$ e si ripete il ciclo fino a che $Z=Z_{\max}$.

3.4.2 Carta delle pendenze

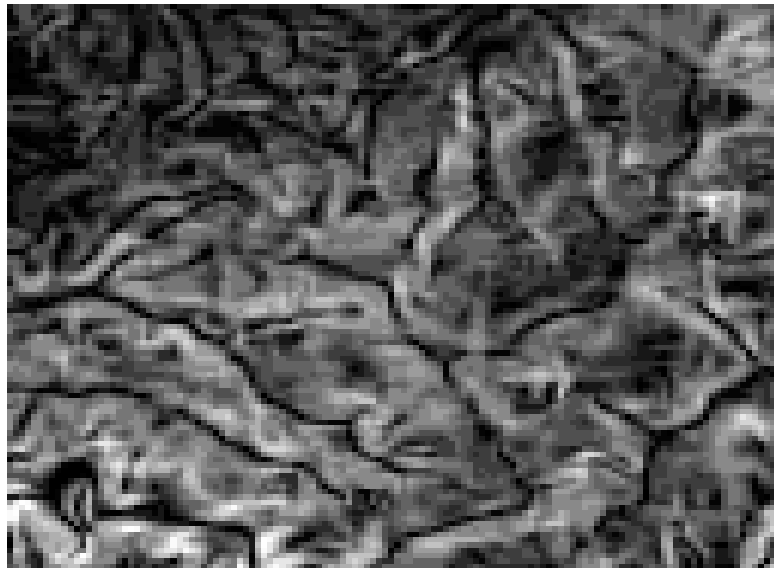


Figura 12 - Carta delle pendenze in formato raster

Questo tipo di carta, così come quella delle esposizioni descritta più avanti, non può essere prodotta direttamente per via fotogrammetrica, ma è ottenuta solo attraverso l'elaborazione del **DTM** altimetrico. Mediante l'algoritmo che descriveremo è possibile quindi tradurre il **DTM** delle quote in un **DTM** delle pendenze; da questo si possono ottenere le carte delle 'i-socline' sia di tipo *raster* che di tipo vettoriale, così come visto per le curve di livello. A ciascun livello di grigio o colore corrisponde una classe di pendenza. Nella tavola di Figura 12 le classi vanno dallo 0% al 100% (45°) con passo 5%.

L'algoritmo di calcolo della pendenza si basa sulla seguente procedura. Consideriamo un generico nodo di riga i e colonna j di una matrice di quote (vedi Figura 13) e numeriamo i nodi da 1 a 9 dall'alto in basso e da sinistra a destra avremo:

$$\begin{array}{llllll}
 x1 = -dx & y1 = +dy & x4 = 0 & y4 = +dy & x7 = +dx & y7 = +dy \\
 x2 = -dx & y2 = 0 & x5 = 0 & y5 = 0 & x8 = +dx & y8 = 0 \\
 x3 = -dx & y3 = -dy & x6 = 0 & y6 = -dy & x9 = +dx & y9 = -dy
 \end{array}$$

supponendo di aver portato il sistema di riferimento nel nodo i,j .

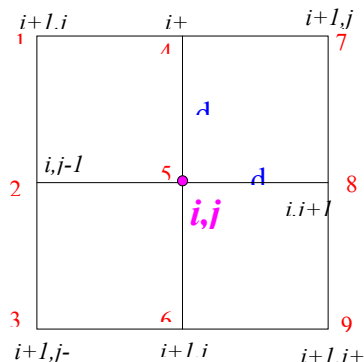


Figura 13 - Matrice di quote

Riprendiamo ora l'equazione della quadrica:

$$a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x \cdot y + d \cdot x + e \cdot y + f = z \quad (8)$$

e risolviamo ai minimi quadrati il sistema per i nove punti suddetti, determinando i 6 coefficienti incogniti.

La pendenza nel punto 5 (nodo i,j) sarà data dal versore tangente alla superficie in quel punto.

Detta T_x la componente x e T_y la componente y avremo:

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{\partial(f(x,y))}{\partial x} = 2a \cdot x + c \cdot y + d \\ T_y &= \frac{\partial(f(x,y))}{\partial y} = 2b \cdot y + c \cdot x + e \end{aligned} \quad (9)$$

Nel punto 5 risultano $T_x = d$ e $T_y = e$.

Combinando le due componenti, potremo calcolare il valore della tangente nel punto 5:

$$T = \sqrt{d^2 + e^2} \quad \text{e quindi la pendenza} \quad P = 100 \cdot T$$

3.4.3 Carta dell'esposizione dei versanti

Anche questa carta, così come quella delle pendenze descritta prima, non può essere prodotta direttamente per via fotogrammetrica, ma è ottenuta solo attraverso l'elaborazione del **DTM** altimetrico. Le classi di esposizione che normalmente vengono rappresentate sono indicate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

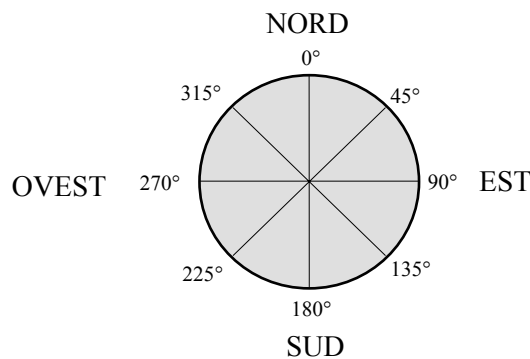


Figura 14 - Esposizioni

Riprendendo le relazioni viste per le carte delle pendenze, si può dimostrare che il valore angolare che determina l'esposizione nel punto generico i,j è dato dalla seguente relazione:

$$E = \arctan\left(\frac{-T_x}{-T_y}\right) \quad (10)$$



Elaborando il **DTM** delle esposizioni, con semplici algoritmi di geometria astronomica, è possibile ottenere la carta dell'insolazione media dei versanti.

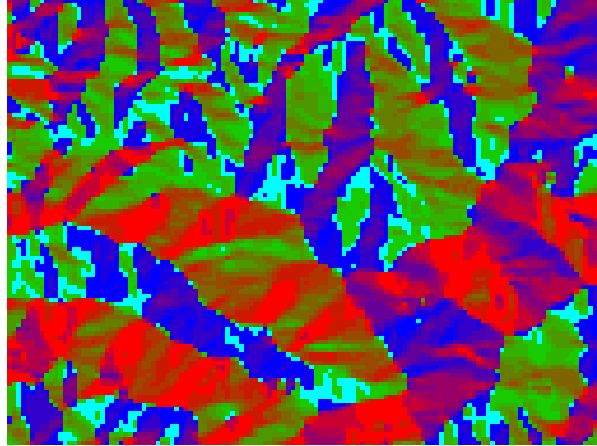


Figura 15 - Carta delle esposizioni



4 TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE

Tra i vari metodi di rilievo attualmente utilizzati per il monitoraggio dei fenomeni gravitativi, la fotogrammetria analitica, affermata nell'ultimo cinquantennio, rappresenta sicuramente uno dei metodi più completi e precisi a parità di costi e rapidità.

La fotogrammetria è una scienza che, come la topografia, si propone di determinare la forma e le dimensioni di un oggetto. Mentre i metodi topografici prevedono generalmente di poter accedere all'oggetto del rilievo in modo diretto, continuativo e per tutto il tempo necessario all'esecuzione delle misure, le tecniche fotogrammetriche raggiungono il loro scopo utilizzando immagini fotografiche dell'oggetto e ricavando da esse tutte le informazioni necessarie. In questo modo l'oggetto non viene "toccato" durante la misura e la necessità di accedere all'oggetto è limitata al periodo di tempo necessario all'acquisizione delle immagini fotografiche.

La possibilità di ricavare le misure direttamente dalle immagini fotografiche, consente di poter lavorare nelle migliori condizioni operative limitando la possibilità di commettere errori grossolani, sia di tipo numerico sia di tipo interpretativo. E' anche possibile suddividere le operazioni di misura in tempi successivi, limitando di volta in volta la densità e l'estensione delle misure necessarie allo stretto ambito d'interesse.

Le basi della fotogrammetria si ritrovano nei fondamenti teorici della prospettiva centrale per la rappresentazione di un oggetto piano o a tre dimensioni nello spazio, e in particolare nelle relazioni esistenti tra una o più prospettive.

Con lo sviluppo tecnologico e la sempre maggiore necessità di conoscere il territorio per poter operare, scelte, interventi e programmi, occorre lavorare in modo economicamente efficace e tecnicamente corretto. La fotogrammetria si è affermata perché offre un rilievo con precisioni progettabili e prevedibili a priori di qualsivoglia entità, uniformi su ogni tipo di terreno ma soprattutto consente di ridurre i tempi di produzione rispetto al rilievo diretto sul terreno.

Quindi, le peculiarità del rilievo fotogrammetrico si possono sintetizzare in vantaggi economici, produttivi, di raggiungimento della precisione voluta e di uniformità dei particolari rappresentati. Consente, inoltre, per questi stessi motivi, un rapido aggiornamento di rilievi eseguiti in precedenza.

La fotogrammetria può essere suddivisa, a seconda dell'utilizzo in:

- fotogrammetria aerea: quando la ripresa fotografica viene effettuata mediante velivolo (vettore spaziale, aereo o elicottero);
- fotogrammetria terrestre: quando la presa fotografica è effettuata da terra.

4.1 La prospettiva centrale

Supponiamo di fotografare un oggetto (edificio, territorio, frana ecc.). Utilizzando una camera fotografica si ottiene un'immagine dell'oggetto detta fotogramma formata dall'insieme infinito di raggi luminosi che partendo dall'oggetto passano attraverso l'obiettivo e vanno a impressionare la pellicola posta ad una distanza c (detta distanza principale) dal centro dell'obiettivo della camera utilizzata.

L'immagine che ne risulta è capovolta rispetto a ciò si vede ad occhio nudo secondo le regole delle camere oscure (una camera fotografica è di fatto una camera oscura). Se si considera,

al posto della pellicola, un piano di proiezione posto (come la pellicola) alla stessa distanza principale ma, dalla stessa parte dell'oggetto rispetto all'obbiettivo, si ottiene un'immagine dritta (positiva) ovvero simile a ciò che si vedrebbe ad occhio nudo. Tale piano viene chiamato anche spazio immagine.

Nell'ipotesi (mondo delle idee) che:

- l'obbiettivo della camera sia rappresentabile mediante un punto detto centro di presa o centro di proiezione C ;
- l'obbiettivo non comporti alcuna distorsione al percorso dei raggi luminosi che lo attraversano;
- la pellicola sia perfettamente piana
- i raggi luminosi che generano l'immagine fotografica percorrano direzioni perfettamente lineari;
- il fotogramma corrisponde ad una proiezione centrale dell'oggetto nella quale:
- il centro di proiezione coincide con il centro dell'obbiettivo;
- il piano di proiezione γ che coincide con il piano immagine definito in precedenza.

Ne consegue che, scelto un generico punto oggetto O e definita la posizione del centro di presa C e del piano di proiezione γ , la congiungente OC genera il punto immagine I nell'intersezione con il piano γ .

Ovvero il punto oggetto O , il punto immagine I e il centro di presa C sono allineati (come indicato in Figura 16).

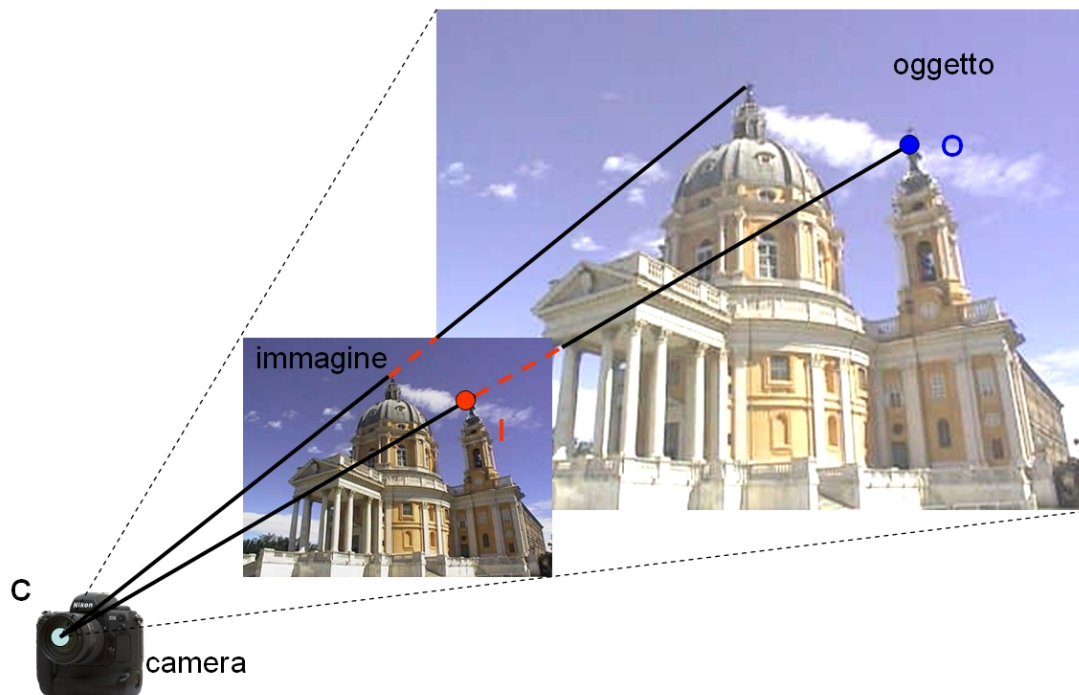


Figura 16 - Il fotogramma come prospettiva centrale

Fissata la posizione della camera fotografica, ne consegue che, dato un punto oggetto O esisterà solamente un punto immagine I che soddisfa le condizioni precedenti.

Purtroppo non è vero il viceversa: ossia ad ogni punto immagine possono corrispondere tutti i punti oggetto che giacciono sul raggio CI (vedi Figura 17).

4.2 Il principio della Fotogrammetria

Partendo dall'ultima affermazione del paragrafo precedente è ovvio che se si vogliono determinare le coordinate del punto O fotografato è necessario disporre, di questo punto, di almeno due prospettive centrali aventi centri di proiezione non coincidenti (vedi Figura 18).

Infatti in questo caso il punto O viene definito come il punto di intersezione dei due raggi proiettanti, per definire i quali è necessario conoscere la posizione che i due fotogrammi avevano nello spazio nel momento in cui si sono formati.

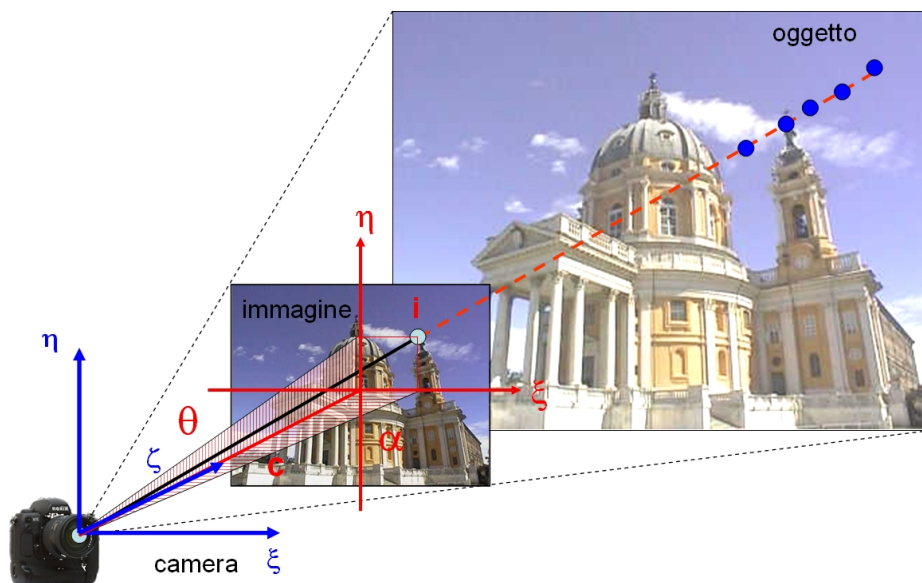


Figura 17 - Il fotogramma come stella di direzioni

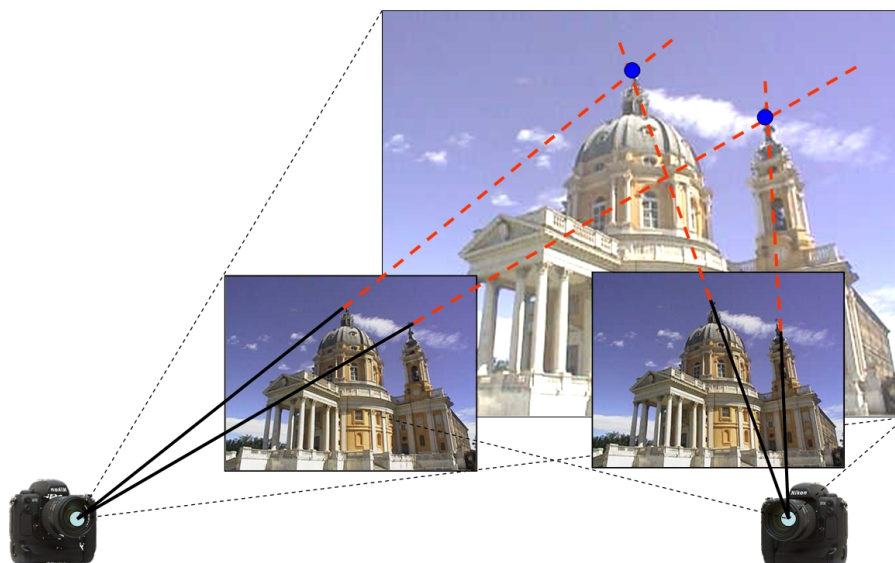


Figura 18 - Il principio della fotogrammetria

Per poter delineare una soluzione di tipo analitico è necessario individuare su ogni fotogramma un sistema di riferimento all'interno del quale sia possibile definire ogni punto dell'immagine mediante una serie di coordinate. La Figura 17 mostra il sistema interno come

un sistema cartesiano tridimensionale avente come origine il centro di proiezione della prospettiva e l'asse ζ perpendicolare al piano della prospettiva e orientato positivamente verso il piano dell'immagine positiva. In questo sistema ogni punto immagine sarà definito da tre coordinate di cui ξ ed η definiscono la posizione del punto immagine sul piano della prospettiva, mentre la coordinata ζ (costante e positiva nel caso di immagini positive oppure costante e negativa nel caso di immagini negative) rappresenta la distanza tra il piano della prospettiva e il centro di proiezione (distanza principale).

Se si conosce la posizione relativa tra il sistema interno e un sistema di coordinate cartesiane tridimensionale al quale si vuole riferire il rilievo (sistema oggetto) è possibile scrivere le equazioni dei due raggi proiettanti che hanno generato le due immagini del punto oggetto O e quindi calcolarne l'intersezione nel sistema di riferimento oggetto.

4.3 La prospettiva centrale e la fotografia: differenze e analogie

Fino ad ora si è considerata come corretta l'ipotesi che una fotografia sia geometricamente analoga ad una prospettiva centrale.

Questa ipotesi sarebbe accettabile se si potesse considerare un qualsiasi obiettivo fotografico esattamente coincidente con un sistema ottico del tipo rappresentato in Figura 19.

In questo caso infatti, la teoria geometrica dei sistemi ottici postula l'esistenza, per ogni sistema ottico, di due piani principali H e H' (piani principali nello spazio-oggetto e nello spazio-immagine), su cui l'uno riproduce l'altro alla scala 1:1 perpendicolarmente all'asse ottico. Per un sistema ottico del tipo "aria-vetro-aria", i due punti ottici principali cioè le intersezioni dei piani principali con l'asse ottico OA , coincidono con i due punti nodali N e N' . Questi sono tali che, per definizione, i cosiddetti raggi centrali (passanti per i punti nodali) formano con l'asse ottico lo stesso angolo τ sia nello spazio-oggetto che nello spazio-immagine (Figura 19, $\tau' = \tau$).

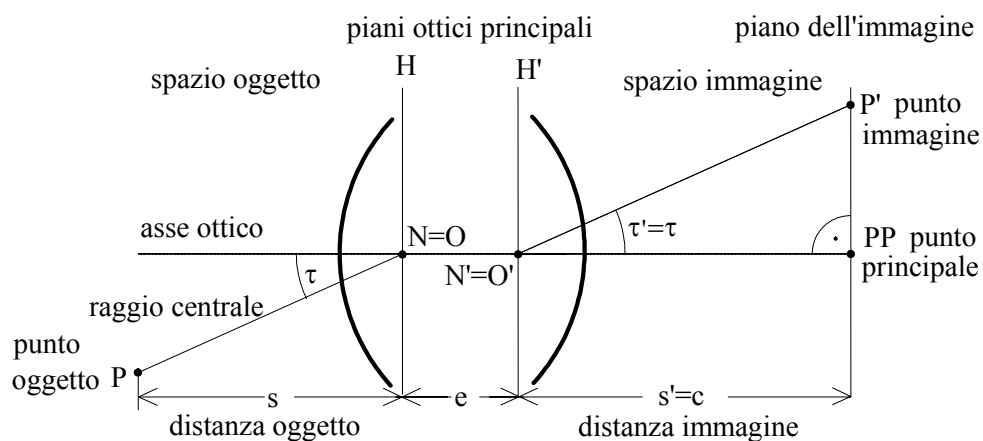


Figura 19 - Geometria di formazione dell'immagine in un sistema ottico ideale. I punti nodali N, N' coincidono con i centri di prospettiva O, O'

In questo caso ideale, N è il centro di prospettiva O nello spazio-oggetto, N' è il corrispondente centro di prospettiva O' nello spazio-immagine e la distanza principale c è uguale alla distanza immagine s' . La distanza immagine s' e la distanza oggetto s sono sempre misurate a partire dai piani principali. Tuttavia, nella fotografia amatoriale pratica, la distanza da impostare sul dispositivo di focamento della camera è $D = (s + e + s')$, ossia è la distanza dell'oggetto dal piano immagine.

L'ottica delle camere fotografiche reali è costituita da obiettivi di notevole spessore, di solito asimmetrici. Le singole lenti sono ricavate da tipi differenti di vetro ottico, in modo da assicurare la migliore correzione possibile delle aberrazioni. Di solito, il diaframma non è al centro dell'obiettivo. Pertanto ci si chiede: dove sia situato, fisicamente, il centro di prospettiva?

Tutti i raggi provenienti da un punto oggetto, che attraversano l'obiettivo, devono passare attraverso il diaframma. L'immagine apparente del diaframma, vista dalla parte dell'oggetto, limita perciò l'effettivo fascio di raggi che formano il punto immagine; questa immagine apparente si chiama pupilla di entrata (**EP**). Il suo centro è il centro di prospettiva **O** nello spazio oggetto. L'analogia pupilla di uscita (**EP'**) giace nello spazio-immagine dell'obiettivo.

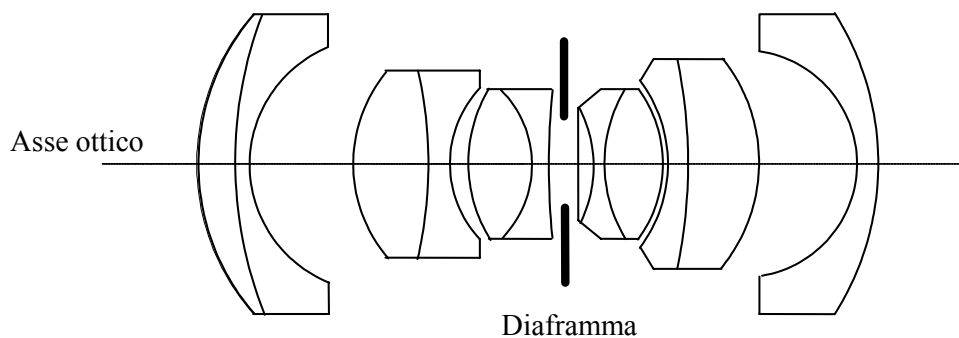


Figura 20 - Sezione di un tipico obiettivo fotografometrico (Wild 21 NAg II, f/4)

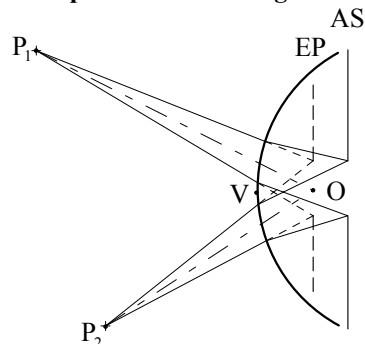


Figura 21 - Definizione del centro della pupilla di entrata **EP** come centro di prospettiva **O** nello spazio oggetto. **V** = vertice

L'obiettivo fotografometrico reale differisce notevolmente dal modello ideale sopra descritto:

L'asse ottico dovrebbe contenere i centri di tutte le superfici sferiche delle lenti. Dopo l'incollaggio e l'assemblaggio di tutte le singole lenti e il montaggio dell'obiettivo sulla camera rispetto al telaio meccanico che individua il piano di focamento, si saranno inevitabilmente accumulati piccoli errori. Pertanto l'asse di riferimento fotografometrico non sarà l'asse ottico **OA**, ma un raggio principale **PRA** calibrato (cioè standardizzato) che, nello spazio oggetto, è perpendicolare al piano immagine e passa per il centro della pupilla di entrata (Figura 22). Il suo prolungamento interseca il piano immagine nel cosiddetto "punto principale di autocollimazione" (**PPA**).

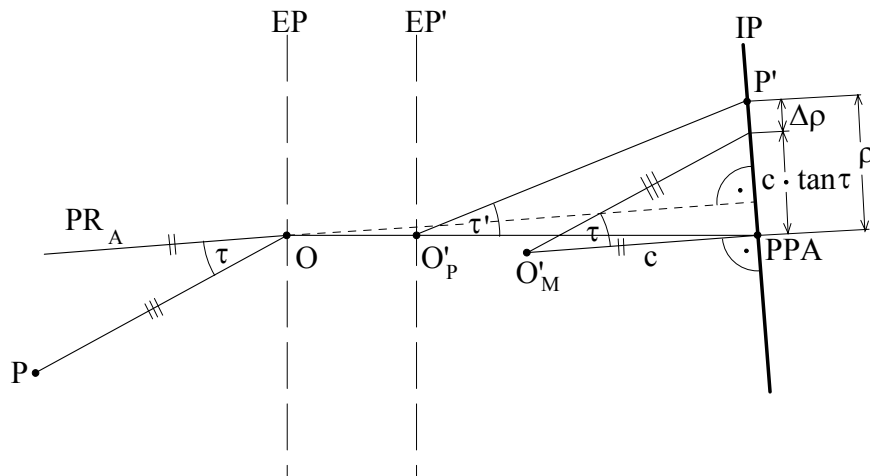
Gli angoli di incidenza dei raggi provenienti dallo spazio oggetto τ sono definiti con vertice nel centro della pupilla di entrata e non nei punti nodali. Poiché la pupilla di entrata di solito non giace sul piano principale **H**, ne segue che τ' non è uguale a τ , e di conseguenza la supposta col linearità tra punto oggetto, centro di proiezione e punto immagine viene a mancare.

Il piano immagine non è rigorosamente perpendicolare all'asse ottico.

In sintesi, la conseguenza di questi piccoli errori è che gli angoli τ' nello spazio immagine non sono uguali agli angoli τ nello spazio oggetto. Si definisce perciò un centro di prospettiva

va matematico O'_M collocato ad una distanza perpendicolare c (la distanza principale) dal punto principale di autocollimazione PPA e che riproduce gli angoli τ il più fedelmente possibile. Gli errori residui vengono attribuiti alla distorsione residua $\Delta\rho$.

Per le camere metriche la determinazione della distorsione residua $\Delta\rho$ viene realizzata in laboratori specializzati. Essa viene misurata lungo le quattro semidiagonali del formato dell'immagine: la Figura 23 rappresenta un esempio delle curve di distorsione residua misurate. Considerate le limitate differenze tra le quattro curve che gli obiettivi fotogrammetrici presentano convenzionalmente si attribuisce un carattere di simmetria radiale al fenomeno della distorsione residua determinando per ogni obiettivo un'unica curva di distorsione (vedi Figura 24, Figura 25). Questo effetto di media delle curve di distorsione residua equivale a considerare un nuovo asse di riferimento PRS , leggermente diverso dal raggio principale di autocollimazione PRA . Questo asse PRS è detto "raggio principale di simmetria": passa anch'esso per O , cioè attraverso il centro della pupilla di entrata EP , e interseca il piano immagine nel punto principale di simmetria PBS (*Point of Best Symmetry*).



- PRA = raggio principale (autocollimazione)
- PPA = punto princ. di autocoll. nel piano immagine IP
- EP = pupilla di entrata, EP' = pupilla di uscita
- O'P = centro di prospettiva fisico
- c = distanza principale

$$\rho = \text{distanza radiale dell'immagine} = \sqrt{(\xi - \xi_0)^2 + (\eta - \eta_0)^2}$$

$\Delta\rho$ = distorsione ottica radiale

Figura 22 - Definizione del centro di prospettiva O'_M

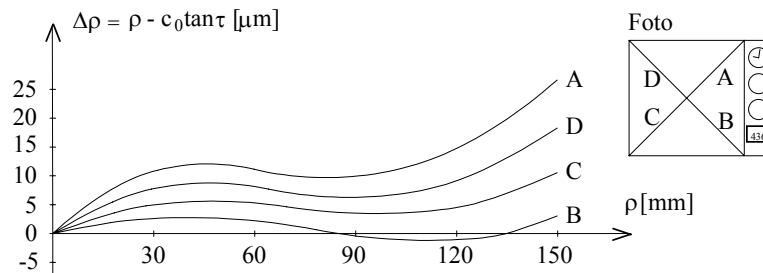


Figura 23 - Distorsione radiale, riferita al PPA, sulle quattro semi-diagonali A-D

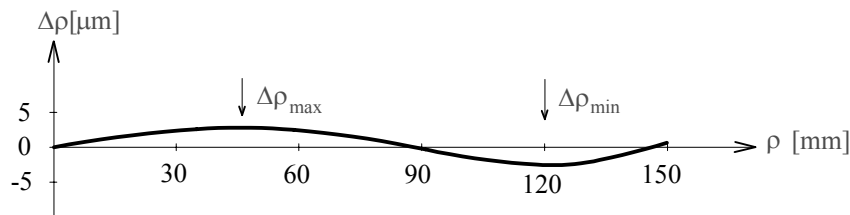


Figura 24 - Distorsione radiale media con $|\Delta\rho_{\max}| = |\Delta\rho_{\min}|$.

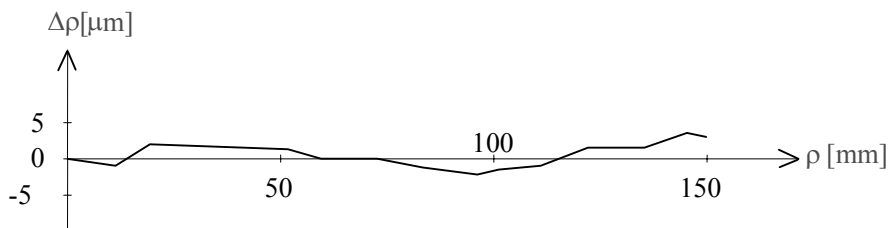


Figura 25 - Distorsione radiale media di un obiettivo Wild 21 NAg II, con luce bianca

Concludendo si può quindi affermare che una fotografia può essere considerata una prospettiva centrale a condizione di conoscere la cura di distorsione radiale residua che è tipica per ogni accoppiamento corpo macchina/obiettivo.

La distorsione radiale residua può anche essere determinata indirettamente mediante tecniche di autocalibrazione ma le precisioni ottenibili non sono dello stesso ordine di grandezza di quelle ricavate direttamente in laboratorio.

4.4 Immagini analogiche e immagini digitali

La parola “immagine” nella dizione “immagine digitale” può far pensare che l’immagine digitale sia di per sé un’immagine analoga a quella di tipo fotografico (l’immagine analogica per eccellenza), con l’unica variante di essere presentata alla nostra vista sul video di un computer o mediante qualche altro dispositivo elettronico. In realtà quando osserviamo un’immagine sul video di un computer non osserviamo un’immagine digitale, bensì un’immagine analogica, né più né meno come se osservassimo una fotografia. L’unica differenza consiste nel fatto che l’immagine osservata sul video di un computer è materializzata mediante la diversa illuminazione dei pixel del video, e quindi l’immagine che si crea sulla nostra retina è il risultato di una luce emessa, mentre quando osserviamo una fotografia l’immagine che si forma sulla nostra retina è generata dalla luce riflessa dalla fotografia stessa.

L’immagine digitale è in realtà una matrice di numeri che deriva dall’aver tradotto in valori numerici la quantità di energia emessa o riflessa da un oggetto, e che sarebbe in grado di produrre un’immagine percepibile dalla nostra retina o di impressionare una pellicola. Questi valori per essere nuovamente percepiti da noi come immagine nel senso comunemente attribuito al termine, devono subire un procedimento inverso di trasformazione dal numerico all’analogico.

Da un punto di vista fotogrammetrico il passaggio dall’analogico al digitale non riguarda solo un’evoluzione puramente tecnologica, ma un’evoluzione per quanto riguarda l’univocità e la conservazione della metricità dell’immagine. In una camera fotografica analogica l’immagine della realtà viene proiettata sul piano focale dove è situata la pellicola. La luce riflessa dalla scena ripresa sensibilizza la pellicola; in altre parole le cariche energetiche che costituiscono la luce (i fotoni) colpiscono i granuli di alogenuro d’argento dell’emulsione fo-



tografica e li modificano in modo tale che quando la pellicola subisce il procedimento chimico di sviluppo essi si trasformano in agglomerati di argento nativo tanto più grandi quanto maggiore è il numero di fotoni che li ha colpiti. Nel momento della presa si forma quindi nell'emulsione della pellicola quella che viene detta immagine latente, che costruisce una discretizzazione dell'immagine della realtà secondo il tessuto irregolare dei granuli di alogenuro d'argento. L'immagine latente viene ridotta in un rapporto di scala rispetto alla realtà che dipende dalla focale dell'obiettivo e dalla distanza della scena dall'obiettivo stesso e viene eventualmente deformata rispetto a quella che sarebbe una rigorosa prospettiva centrale dall'effetto della distorsione prodotta dall'obiettivo. Una ulteriore deformazione dell'immagine latente può essere generata dalla deformazione, per effetti termici o meccanici, della pellicola negativa prima di aver subito il trattamento di sviluppo. Il procedimento di sviluppo del negativo e quello successivo del positivo possono poi produrre una ulteriore deformazione dell'immagine latente sull'immagine analogica che se ne deriva (stampa o diapositiva). Nel procedimento fotografico tradizionale vi è quindi la possibilità che la geometria e la radiometria dell'immagine latente vengano alterate a causa della natura del supporto su cui viene registrata e a causa dei trattamenti di sviluppo, fissaggio e stampa. Se poi dal negativo vengono prodotte più copie positive, queste possono anche differire tra loro, se pur in misura modesta, ma comunque rilevabile ad esempio da una strumentazione fotogrammetrica di restituzione. Anche la conservazione nel tempo può generare in una fotografia tradizionale su pellicola delle deformazioni geometriche. Quindi possiamo dire che nel procedimento fotografico tradizionale esiste questa mancanza di perfetta corrispondenza tra l'immagine che viene proiettata sul piano focale al momento della presa e la sua materializzazione sul supporto fotografico.

Una delle principali caratteristiche della fotografia digitale è invece quella di catturare l'immagine latente in formato numerico e di trasmetterla e conservarla nel tempo senza alterazioni geometriche di sorta. In altre parole, al momento della presa si determina in modo univoco il rapporto tra la posizione di un punto nello spazio e la sua immagine e questo rapporto rimane immutato nel tempo ed è univoco per chiunque utilizzi l'immagine.

Un terzo elemento di differenza tra immagine analogica e immagine digitale consiste nel modo in cui si ricavano le coordinate dei punti immagine all'interno del processo fotogrammetrico (vedi 4.2). Operando su immagini analogiche è l'operatore che di volta in volta, utilizzando opportuni strumenti di misura (comparatori), determina le coordinate dei punti immagine nel sistema di riferimento interno; è dunque plausibile che ripetendo tale misura lo stesso operatore possa ottenere risultati differenti pur riferendosi al medesimo punto immagine. Con le immagini digitali invece ad ogni punto immagine è associata, in modo univoco, un'unica coppia di coordinate (coincidenti con la posizione del pixel che rappresenta il punto) e tali coordinate non sono oggetto di misura da parte di un operatore: la misura è stata eseguita dal dispositivo che ha generato l'immagine digitale. Quindi ad ogni punto di un'immagine digitale corrisponde un'unica coppia di coordinate immagine indipendentemente dall'operatore che seleziona il punto.

4.5 L'acquisizione dei dati primari

Da un punto di vista geometrico le camere per ripresa fotogrammetrica si possono distinguere in tre macro-categorie:

- camere metriche;
- camere semimetriche;
- camere amatoriali.

La distinzione si basa sulla stabilità della calibrazione a cui sono soggette le camere e gli obiettivi. Per calibrazione si intende la determinazione dell'insieme dei parametri geometrici



che concorrono alla ricostruzione della corretta geometria di presa del fotogramma (Orientamento Interno) ed alla modellazione delle distorsioni indotte dagli obiettivi utilizzati (vedi par. 4.3).

Le camere metriche sono caratterizzate dal fatto di essere dotate di un orientamento interno noto e costante nel tempo; le camere semimetriche sono caratterizzate dalla presenza di un orientamento interno noto e variabile nel tempo mentre le camere amatoriali sono caratterizzate dalla non conoscenza dei parametri di orientamento interno (e che quindi deve essere determinato a posteriori).

Nelle applicazioni oggetto della ricerca sono utilizzate in modo quasi esclusivo camere di tipo metrico per cui nel seguito si farà riferimento esclusivamente alle problematiche di utilizzo di tali dispositivi di acquisizione.

4.5.1 Camere metriche

A seconda delle finalità che si intendono perseguire, le camere metriche possono essere idonee alle riprese terrestri oppure aeree (intendendo tutti quei dispositivi di registrazione delle immagini aviotrasportate sia con elicotteri, aerei e vettori satellitari).

Le camere metriche terrestri, utilizzate nel campo della fotogrammetria terrestre (o del vicino) trovano le loro principali applicazioni in tutti quei casi in cui non è possibile effettuare prese da mezzi aerei o per impossibilità legate alla localizzazione dell'oggetto del rilievo o per la limitata estensione della zona del rilievo. In alcuni casi limite possono essere utilizzate qualora particolari richieste di elevata precisione richiedano la riduzione delle distanze di presa al di sotto dei limiti di sicurezza imposti ai mezzi aerei. Nelle applicazioni ambientali possono essere utilizzate nel rilievo di cave o di pareti rocciose con giacitura verticale o sub-verticale.

Le camere metriche aeree, preposte all'acquisizione fotografica di porzioni di territorio, sono installate su piattaforma aerea (elicottero, aereo, vettore satellitare) e pertanto devono soddisfare particolari requisiti legati alla natura stessa dell'acquisizione in movimento.

Le camere metriche aeree sono corredate di una serie di dispositivi che consentono di garantire l'esecuzione corretta delle prese dei fotogrammi.

Esse sono montate su una piattaforma che ne garantisce un assetto costante e limitato in valori contenuti di angoli di rotazione. Nelle camere analogiche di prima generazione questo accorgimento era ottenuto tramite viti calanti, in epoca moderna sostituite da giroscopi di precisione e sensori d'assetto.

Per fare in modo che la camera sia sempre allineata secondo la rotta dell'aereo la camera può ruotare attorno al proprio asse di presa su un supporto ad anello. La rotta di volo deve essere determinata e mantenuta, è dunque necessario un sistema di navigazione.

L'avanzamento del vettore durante il tempo di esposizione causa un effetto di trascinamento dell'immagine, che deve essere compensato attraverso un dispositivo correttore di trascinamento.

4.5.1.1 Camere metriche aeree analogiche

Sono camere fotografiche dotate di un unico obiettivo a focale fissa, dotato di otturatore centrale, in cui l'elemento fotosensibile è costituito da una pellicola fotografica. In particolare:

- la distanza principale è sempre fissa;
- il formato dell'immagine standard è pari a $23 \times 23 \text{ cm}^2$;
- la pellicola viene mantenuta in piano durante il tempo di esposizione tramite un dispositivo di spianamento (solitamente pneumatico ad aspirazione):

- sul fotogramma vengono impressionate dei punti (marcature fiduciali) utili a ricostruire il sistema di riferimento interno (vedi par. 4.2); tali marcature devono essere impressionate sui bordi e agli angoli dei fotogrammi in modo da non disturbare l'immagine utile.

Per ogni fotogramma vengono inoltre impressionati dati ausiliari relativi a:

- numero del fotogramma;
- ora di acquisizione;
- quota assoluta di volo;
- data di acquisizione;
- distanza principale;
- dati di orientamento esterno, se presente un sistema di navigazione e di posizionamento;
- dati di posa (diaframma, tempo di esposizione, compensazione del trascinamento, ecc).

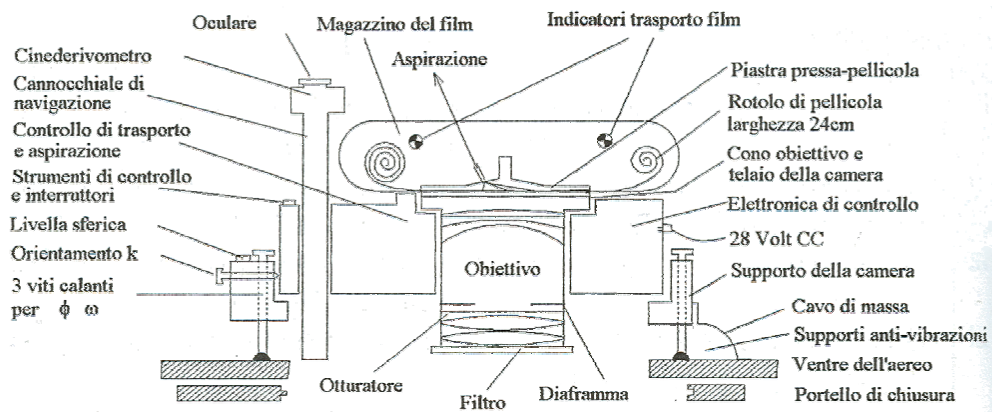


Figura 26 - Camera fotogrammetrica analogica

Il supporto della camera è fissato alla fusoliera del mezzo aereo mediante supporti in gomma che la isolano dalle vibrazioni del velivolo. Sul supporto è fissata l'unità di controllo che può ruotare attorno ad un asse verticale e che contiene tutti i dispositivi necessari per eseguire il ciclo di presa. Il magazzino del film è posto in corrispondenza del piano focale e contiene la lastra di spianamento e il meccanismo di aspirazione e di pressione della piastra contro il piano focale.

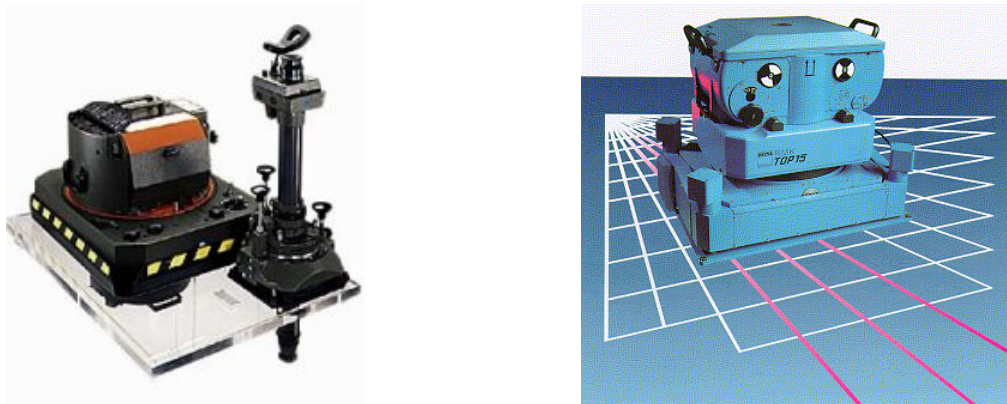


Figura 27 - Camere metriche aeree analogiche (LEICA RC30 a sinistra e ZEISS TOP15 a destra)

4.5.1.1.1 La digitalizzazione di immagini fotografiche analogiche

Lo strumento che si utilizza per trasformare in formato digitale un fotogramma analogico è lo scanner. Piano. La sua funzione è quella di convertire i dati analogici (fotogramma) in una matrice numerica (*raster*) dove i valori rappresentano l'informazione radiometrica relativa al supporto acquisito.

Il principio di funzionamento è basato sul fatto che un'immagine è la rappresentazione ottica di un oggetto illuminato da una sorgente di energia. Nella formazione di un'immagine è necessario considerare tre elementi: l'oggetto, la sorgente di energia e il sistema di formazione dell'immagine. In uno scanner la luce riflessa dal supporto o (come spesso avviene in fotogrammetria in cui si utilizzano le diapositive) passante attraverso il supporto, emessa da una fonte di energia, rappresenta l'input del sistema di formazione dell'immagine digitale. Questo sistema solitamente è composto da un sottosistema ottico, da un sensore fotosensibile e da un digitalizzatore d'immagine (vedi Figura 28).

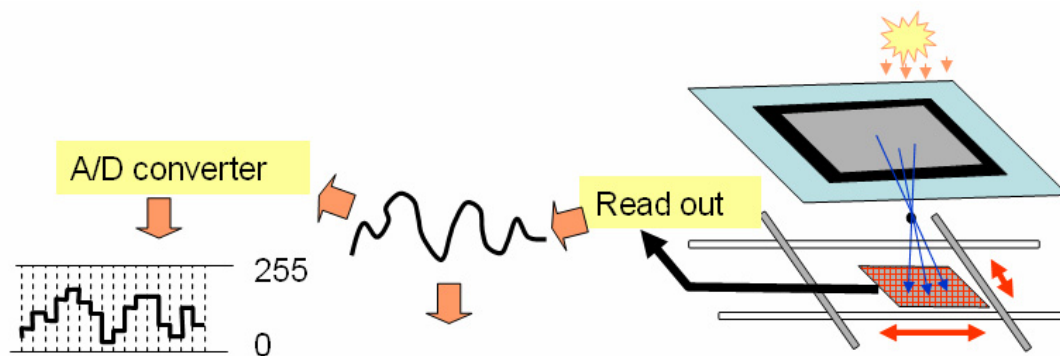


Figura 28 - Schema di uno scanner

Il sensore fotosensibile può essere di diversa tipologia, in funzione dell'elemento fotosensibile impiegato. I principali esistenti in commercio sono: tubi Vidicon, *Charge Injection Device (CID)*, *Charge Coupled Device (CCD)*. L'output del sensore fotosensibile è un segnale analogico bidimensionale che deve quindi essere discretizzato e numerizzato prima di poter essere elaborato da un computer. Questa operazione è effettuata da un convertitore analogico/digitale (A/D) che trasforma l'immagine analogica in un'immagine digitale.

Nel caso di immagini a colori, il campionamento si effettua indipendentemente sui singoli canali (rosso, verde e blu), producendo tre immagini digitali (tre matrici) nelle tre bande separate di uguale dimensione.

L'area elementare dell'immagine analogica, corrispondente a ciascun valore numerico della matrice, si chiama pixel (*picture element* = elemento di immagine); i lati ($\Delta\eta$ e $\Delta\xi$) che definiscono l'area del pixel hanno una dimensione variabile, in funzione del grado di risoluzione dello scanner. La risoluzione di scansione si misura in pixel per pollice, indicato con l'acronimo **dpi** (*dot per inch* = punti per pollice).

Attualmente, la strumentazione in commercio ha una risoluzione variabile da 300 **dpi** a 4.000 **dpi** a cui corrispondono rispettivamente pixel con lato di 80 μm e di 7 μm . Man mano che la dimensione del pixel diminuisce, anche il cosiddetto rapporto segnale/rumore, che rappresenta una misura della qualità del sensore, diminuisce sino al limite di circa 1. Un rapporto segnale/rumore = 1 significa che il rumore è grande quanto il segnale che contiene e quindi scarsamente utilizzabile.

In questa tabella si riportano le dimensioni del pixel in funzione della risoluzione di scansione (**dpi**):

dpi	Δpixel [μm]
100	254
200	127
400	64
600	42
1200	21
2400	10.5

Tabella 1 - La dimensione del pixel a varie risoluzioni

La moderna tecnologia degli elementi fotosensibili allo stato solido ha ricevuto notevole impulso dagli impressionanti sviluppi relativi ai semiconduttori al silicio. I sensori al silicio sono molto efficienti nel generare, memorizzare e trasmettere fotocariche nello spettro del visibile ($0,4 \pm 0,7 \mu\text{m}$) e dell'infrarosso vicino ($0,7 \pm 1,1 \mu\text{m}$).

Malgrado i consistenti progressi tecnologici, sussistono ancora alcuni problemi relativi alla tecnologia dei sensori **CCD**. In primo luogo gli elettroni rilasciati dal substrato del sensore non sono solo fotoni, ma possono anche assumere la forma di segnali termici casuali che producono la cosiddetta corrente nera (*dark current*), ragione per cui studi sperimentali hanno dimostrato che questo effetto indesiderabile, che produce alterazioni radiometriche nell'immagine digitale, può essere eliminato raffreddando i sensori a circa -100°C , eliminando così eventuali scambi termici inquinanti. In secondo luogo, il processo di lettura del potenziale elettrico può generare segnali errati (aggiungendo o diminuendo il numero degli elettroni); tale disturbo è chiamato rumore di acquisizione (*readout noise*). Infine è praticamente impossibile costruire in maniera assolutamente identica i singoli sensori: esistono infatti sia variazioni di sensibilità che inducono alterazioni radiometriche, sia irregolarità geometriche che provocano variazioni dimensionali dei singoli pixel e aree di acquisizione del segnale non perfettamente uniformi.

Il **CCD** non converte le informazioni analogiche nel loro equivalente digitale. La carica elettrica generata rappresenta ancora un segnale analogico, che varia con continuità al variare dell'intensità della luce registrata. Esso viene convertito in forma digitale da un apposito convertitore e il modo in cui questa conversione viene eseguita ha un peso determinante per valutare poi la qualità dell'immagine acquisita.

L'informazione radiometrica relativa a ciascun pixel può essere registrata in diverse modalità.

MODALITÀ BINARIA: l'informazione radiometrica viene convertita in una informazione di tipo binario (on/off o bianco / nero) e può essere memorizzata utilizzando un solo bit della memoria (1 o 0). Se il valore radiometrico è compreso tra il bianco e il 50% di grigio assume il valore "on" o 1 (bianco), se è maggiore del 50% di grigio assume il valore "off" o 0 (nero) come si vede nella Figura 29.

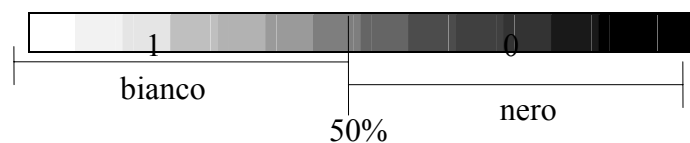


Figura 29 - Modalità bianco / nero

MODALITÀ A TONI DI GRIGIO: l'informazione radiometrica di ciascun pixel viene tradotta in un valore di luminosità o livello di grigio. Quanto maggiore è il numero dei livelli di grigio, tanto più naturale e meglio definita risulterà l'immagine. Gli scanner e il relativo software variano in funzione della quantità di informazioni memorizzate per ciascun pixel. Se si utilizzano 4 bit per pixel, si avrà un'immagine digitale su 16 toni di grigio (con 0 = nero e 15 = bianco); se i bit per pixel saranno 8 (1 byte), si avrà un'immagine digitale su 256 toni di grigio (con 0 = nero e 255 = bianco); questa definizione di livelli di grigio supera ampiamente la possibilità di discriminazione dell'occhio umano.

MODALITÀ TRUE COLOR: l'informazione radiometrica di ciascun pixel viene convertita in varie combinazioni di colori. Utilizzando 24 bit (3 byte) si possono memorizzare i tre colori fondamentali RGB (rosso, verde e blu) su tre piani distinti. Si possono definire in questo modo circa 16 milioni di colori. Nella tabella seguente è riportato il numero dei colori acquisibili da uno scanner in funzione della memoria occupata:

numero di bit	numero di colori	modalità
1	2 colori (bianco/nero)	bianco/nero
4	16 (= 24) livelli di grigio	livelli di grigio
8	256 (= 28) livelli di grigio	livelli di grigio
8	256 colori scelti con una palette predefinita	color indexed
24	16.777.216 (= 224) colori	true color

Tabella 2 - Modalità di memorizzazione dell'informazione cromatica

Al solito però, maggiore è l'informazione radiometrica e maggiore sarà la quantità di dati da memorizzare (vedi Tabella 3).

risoluzione [dpi]	8 bit toni di grigio [Mb]	3 bytes true color [Mb]
600	29	87
800	52	156
1000	81	243
1200	117	350
2400	467	1399

Tabella 3 - Occupazione di memoria di un fotogramma

Gli scanner sono suddivisibili in tre classi:

tipo	formato	risoluzione	utilizzo
Amatoriali (DTP)	A4 - A3	300 - 2400 dpi	desktop publishing (DTP)
fotogrammetrici	26 x 26 cm ²	1200 - 4096 dpi	fotogrammi aerei
cartografici	> 60 x 90 cm ²	400 - 1200 dpi	cartografia tradizionale

Tabella 4 - Tipi di scanner

Gli scanner cartografici sono generalmente a tamburo rotante (*drum scanners*) e proprio a causa della rotazione e del meccanismo di trascinamento del supporto durante l'acquisizione, presentano un'accuratezza geometrica peggiore degli scanner piani. La dimensione dei documenti da digitalizzare variano dal formato A0 al formato A1. Questi scanner possono avere elevate risoluzioni radiometriche, ma spesso non sono in grado di acquisire diapositive o negativi. La loro principale applicazione è quella di acquisire cartografia, molto più raramente pellicole di grandi dimensioni. Non sono utilizzati in ambito fotogrammetrico.

4.5.1.1.1 Scanner fotogrammetrici

Gli scanner fotogrammetrici sono prodotti da aziende già operanti nel settore fotogrammetrico. Hanno generalmente un'altissima risoluzione geometrica e un'elevata accuratezza ($2 \div 5 \mu\text{m}$); talvolta sono dotati di un software per l'orientamento interno che consente l'acquisizione direttamente nel sistema di riferimento interno del fotogramma. Il formato di acquisizione varia da circa $24 \times 24 \text{ cm}^2$ al formato A4, con risoluzione radiometrica variabile da 1 a 3 byte. I tempi di acquisizione sono generalmente abbastanza lunghi (variano tra i 15 e i 45 minuti per una risoluzione geometrica di $15 \mu\text{m}$); tali prestazioni possono essere notevolmente migliorate con l'utilizzazione di schede real-time in grado di lavorare con file compressi (per esempio con formati di compressione TIFF, ECW e JPEG20001). I sensori CCD possono essere a elemento singolo, a linea, a matrice quadrata. Gli svantaggi sono relativi all'elevato costo e alle modalità di utilizzazione e di impiego del software di gestione, che non risultano sempre semplici.

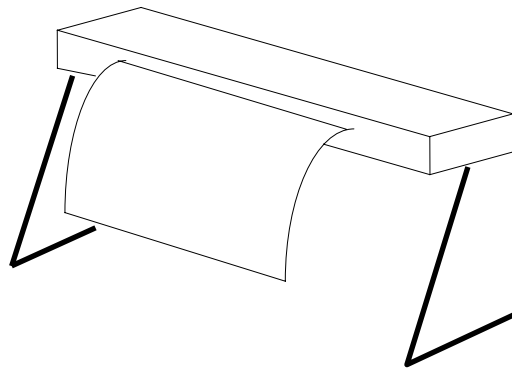


Figura 30 - Schema di uno scanner cartografico

La Tabella 5 elenca alcuni tra i principali scanner fotogrammetrici esistenti oggi sul mercato:

modello	sensore	movimento	risoluzione max	bit max per pixel
Delta scan Gesystem	CCD matrice	piano	$8 \mu\text{m}$	24
DSW 700 Leica	CCD matrice	piano	$3 \mu\text{m}$	24
Vexcel Ultra scan 5000 T	CCD matrice	piano	$5 \mu\text{m}$	24
Photoscan Z/I	CCD matrice	piano	$7 \mu\text{m}$	24

Tabella 5 - Le caratteristiche di alcuni scanner fotogrammetrici

4.5.1.1.2 Scanner DTP

Sul mercato esistono anche altri tipi di scanner molto meno costosi utilizzati in applicazioni **DTP** (*DeskTop Publishing*): essi hanno una costruzione più semplice ed economica, ma comportano spesso distorsioni radiometriche e geometriche non trascurabili per applicazioni fotogrammetriche convenzionali. Nell'ottica di costituire un sistema fotogrammetrico di basso costo, la scelta dell'unità di acquisizione si rivolge agli scanner **DTP** con l'accortezza di studiarne le caratteristiche delle perturbazioni deformative indotte dalla scansione e individuando una procedura che permette di recuperarne il contenuto geometrico originale.

Gli scanner **DTP** sono stati sviluppati per applicazioni totalmente differenti da quelle fotogrammetriche. In ogni caso, sin dalla loro nascita, hanno costituito la fetta di mercato più

¹ A questo proposito sono da evitare memorizzazioni delle immagini digitali in formato JPEG con rapporti di riduzioni superiori a 7. Evidenze sperimentali hanno dimostrato infatti la pericolosa perdita di contenuto metrico dovuta all'algoritmo di compressione JPEG.

consistente. Gli scanner **DTP** sono usualmente piani (**flatbed scanners**), di formato A4 o A3 e dotati di una fila di sensori **CCD**. La loro risoluzione geometrica migliora costantemente ed esistono oggi degli scanner capaci di acquisire ad una risoluzione ottica di 2400 d.p.i. con risoluzione radiometrica di 1 o 3 byte. Gli scanner **DTP** possono essere collegati a diverse piattaforme hardware (PC, workstation, ecc.) e sono dotati di software per la gestione del processo di acquisizione, per l'elaborazione e l'editing delle immagini e del colore.

Test sperimentali effettuati su alcuni scanner **DTP** dimostrano come questi presentino alcuni problemi dal punto di vista radiometrico. In particolare:

- rumore dovuto alle componenti elettroniche quali variazioni termiche, guadagno dei sensori, differenze dimensionali dei singoli sensori **CCD**;
- disomogeneità e instabilità del sistema di illuminazione sia nel caso di acquisizione da supporti trasparenti sia nel caso di utilizzo di supporti opachi in particolare nelle regioni di bordo del formato massimo di illuminazione;
- saturazione dei toni e variazioni del dynamic range;
- imperfezioni del sistema ottico che possono creare ombre e discontinuità;
- anomalie nella risposta spettrale, in particolare nella banda del blu;
- imperfetto campionamento lungo le colonne di scansione dovuto a imprecisi movimenti meccanici.

A fronte di queste considerazioni sono da preferirsi scanner con area di illuminazione superiore al formato dell'immagine da acquisire al fine di limitare gli effetti di bordo. Inoltre sono da preferirsi scanner in grado di effettuare scansioni complete in singola passata e dotati di buffer di grandi dimensioni, per evitare operazioni di arresto e riavvio del sensore **CCD**.



Figura 31 – Alcuni esempi di scanner fotogrammetrici

La risoluzione geometrica può essere misurata con l'ausilio di speciali campioni. Dopo avere acquisito il campione a differenti risoluzioni geometriche, l'immagine acquisita può essere ispezionata visivamente; ogni elemento del campione è risolto se ognuna delle tre linee di ogni gruppo di elementi è perfettamente separabile dagli altri. Dal momento in cui il campione presenta gruppi di elementi perpendicolari tra di loro, è possibile determinare la risoluzione geometrica nelle due direzioni degli assi coordinati. Il risultato migliora notevolmente in funzione dell'incremento di contrasto: è quindi necessario usare alti rapporti di contrasto al fine di valutare la massima risoluzione geometrica raggiungibile.

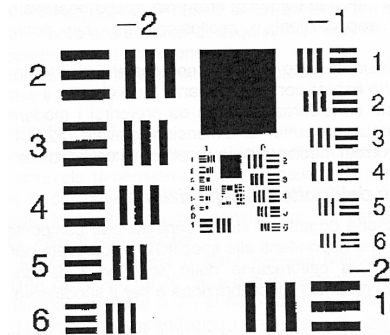


Figura 32 - Il campione USAF utilizzato per la definizione della risoluzione degli scanner DTP

Negli scanner **DTP** la risoluzione geometrica nominale è minacciata da alcuni effetti che possono essere così sintetizzati:

- mancato allineamento dei sensori **CCD** (nel caso di scanner con acquisizione a tre passate): questo effetto provoca la presenza di discontinuità nel posizionamento dei pixel delle immagini acquisite nelle tre bande spettrali principali e può essere eliminato mediante il ricampionamento delle tre immagini fondamentali, con conseguente perdita di contrasto dell'immagine;
- vibrazioni lungo l'asse del sensore lineare: questo effetto è costante lungo ogni linea di acquisizione e può essere eliminato con una modellazione di tipo sinusoidale di ampiezza pari a metà della dimensione del pixel;
- distorsioni dell'ottica di acquisizione: questo effetto provoca variazioni di scala lungo la direzione del sensore e possono essere corrette con trasformazioni geometriche basate su osservazioni di reticoli di calibrazione;
- discontinuità nell'acquisizione: dipende essenzialmente dalla capacità del buffer dello scanner. L'acquisizione avviene nel seguente modo: si acquisisce una prima parte dell'immagine di dimensioni pari a quella del buffer; quindi il contenuto viene scaricato nella **RAM** del computer collegato e il sensore viene riposizionato per iniziare la scansione della porzione seguente. In alcuni casi sono stati messi in evidenza errori nel riposizionamento del sensore, che provocano sovrapposizioni o scollamenti tra due porzioni di immagine adiacenti;
- deformazioni residue: sono fenomeni non costanti all'interno dell'area di scansione e possono essere corrette mediante l'uso di reticoli di calibrazione. Alla luce di queste considerazioni sono da preferirsi i moderni scanner **DTP** a singola passata dotati di buffer di dimensioni elevate (>2Mb): gli errori residui possono essere corretti mediante l'uso di reticoli di calibrazione.

In Figura 33, è visibile la distorsione indotta da uno scanner **DTP** in formato A3 di produzione **UMAX** su un reticolo di calibrazione: si noti che le maggiori deformazioni (amplifica-

te in figura di un fattore 100) si ritrovano in direzione della linea del sensore di scansione (anche 150 μm di distorsione).

E' possibile mettere a punto apposite procedure che permettono di recuperare la gran parte del contenuto metrico delle immagini acquisite mediante questi scanner. Il software che si usa in fase di acquisizione deve essere comunque in grado di applicare un modello deformativo determinato in situazione stabile (scanner caldo) alle successive acquisizioni che vengono effettuate. In tal modo vengono ricampionate le immagini acquisite generando un'immagine sostanzialmente indeformata rispetto all'originale.

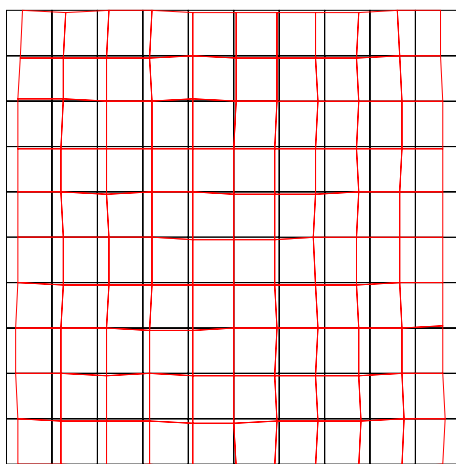


Figura 33 - La distorsione indotta da uno scanner Umax A3 (DITAG - Politecnico di Torino)

4.5.1.2 Camere fotogrammetriche digitali

Le camere fotografiche digitali possono avere strutture molto diverse, ma, allo scopo di chiarire alcuni concetti fondamentali sulla tecnica che permette di acquisire l'immagine di una scena in forma digitale, considereremo per ora la struttura di una camera digitale che sia concettualmente il piú possibile simile a una camera fotografica tradizionale.

Prendiamo cioè in considerazione una camera digitale con la quale la scena viene ripresa in modo istantaneo attraverso un obiettivo da un unico punto dello spazio e nella quale l'elemento che raccoglie l'immagine sul piano focale è un sensore, cioè un dispositivo elettronico che descriveremo tra breve e che possiamo dire che svolga quella funzione di cattura e memorizzazione dell'immagine che veniva svolta dalla tradizionale pellicola.

Il sensore fa parte del *chip* elettronico che è l'elemento fondamentale della camera digitale. Esistono oggi due tipi di *chip* elettronici che vengono utilizzati dalle camere digitali: il **CCD**, *charged-coupled device* e il **C-MOS**; il **CCD** è quello da piú tempo utilizzato rispetto al **C-MOS** e quindi prenderemo in considerazione solo il primo.

L'invenzione del **CCD**, che in italiano può essere tradotto come "dispositivo ad accoppiamento di carica", è avvenuta all'inizio degli anni '70 del secolo scorso nei laboratori della Bell. Alcune volte il **CCD** viene anche detto dispositivo a trasferimento di carica poiché i pixel che lo compongono, oltre a svolgere la funzione di trasformare l'energia della luce incidente su di essi in una carica elettrica, svolgono anche la funzione di trasferirla in modo sequenziale da un pixel a quello adiacente. Il **CCD** non ha solo la funzione di catturare l'immagine che si forma sul sensore, ma anche quella di trasformarla in una matrice di numeri e memorizzarla su un supporto elaborabile da un computer.

Nel tipo di camera digitale che stiamo considerando per introdurre l'argomento, il sensore è costituito da una piastra di silicio, quadrata o rettangolare, sulla quale vi è inciso un fitto grigliato che la suddivide in tanti elementi quadrati: i pixel. I pixel possono essere anche di forma rettangolare, ma ora e nel seguito, per semplicità di trattazione, considereremo che essi siano di forma quadrata. Un sensore così fatto, cioè costituito da un grigliato, quadrato o rettangolare, di tante linee e colonne di pixel viene detto di tipo a matrice o, con terminologia anglosassone, di tipo *area array*.

Si chiamano invece sensori lineari, o *linear array*, i sensori formati da un'unica riga di pixel. Di questi parleremo in seguito quando tratteremo l'argomento delle camere aeree per fotogrammetria.

Per avere un'idea della dimensione fisica dei sensori consideriamo per il momento quelli delle camere digitali amatoriali, le quali peraltro vengono anche impiegate, come diremo nel seguito, in riprese fotogrammetriche terrestri ed aeree grazie alla grande stabilità che esse offrono nel mantenimento di un orientamento interno determinato per via indiretta mediante un processo di autocalibrazione.

Come è noto il formato classico delle camere fotografiche tradizionali amatoriali è di 24 x 36 mm². Il sensore delle camere amatoriali digitali, che si pongono in alternativa alle camere a pellicola di questo formato, ha dimensioni molto più limitate. Solo recentemente la Kodak ha realizzato per la camera DCS Pro 14n un sensore di 3024 x 4536 pixel (13 megapixel) di 8 µm di lato e che ha dunque la dimensione del formato pellicola 24 x 36 mm². Le camere digitali che si pongono in alternativa alle camere 6 x 6 cm² tendono invece a raggiungere la dimensione dei sensori di 6 x 4 cm². I sensori più avanzati, che si trovano anche nei dorsi digitali, hanno dunque dimensioni di 38,8 x 50 mm² essendo composti da un *array* di 4080 x 5440 pixel (22 megapixel) di 9 µm di lato².

Quindi, rimanendo invariate la distanza dell'oggetto dall'obiettivo e la focale dell'obiettivo, la risoluzione con cui viene acquisita un'immagine è tanto maggiore quanto più piccola è la dimensione del lato del pixel del sensore.

Poiché però le riprese terrestri ed aeree vengono effettuate con camere che possono avere una gran varietà di distanze focali e con distanze obiettivo/oggetto molto variabili, se vogliamo confrontare in termini di risoluzione le immagini che esse possono acquisire, occorre stabilire un criterio oggettivo che tenga conto contemporaneamente della dimensione del pixel del sensore, della focale dell'obiettivo e della distanza dell'oggetto dall'obiettivo.

A questo scopo si introduce il concetto di **GSD** (*Ground Sample Distance*). Il **GSD** è l'area di superficie reale la cui immagine, proiettata sul piano focale e quindi sul sensore, copre la superficie di un pixel. Potremmo rendere l'espressione in italiano con la dizione "dimensione del pixel al suolo".

Il fatto che la risoluzione di un'immagine sia legata al valore del **GSD** potrebbe far pensare che la camera che produce immagini con maggior risoluzione sia quella che ha la dimensione dei pixel del sensore più piccoli. In realtà non è così, perché, se D è la distanza di presa, f è la focale della camera ed L la dimensione del lato del pixel, il **GSD** è dato dalla relazione:

$$\text{GSD} = D \cdot (L / f) \quad (11)$$

dalla quale risulta che il **GSD** dipende dai tre parametri L , f e D .

² Nel mese di giugno 2006 è stato presentato un nuovo sensore areale CCD dotato di 39 megapixel. Tale dispositivo non viene descritto in quanto non sono ancora stati pubblicati risultati sperimentali in grado di far comprendere il loro effettivo potenziale nelle applicazioni qui trattate.



Quindi, se vogliamo confrontare due camere digitali rispetto alla risoluzione delle immagini che esse possono produrre, si deve valutare il valore di **GSD** che esse producono a parità di distanza di presa. Deve inoltre essere chiaro che se, a parità di distanza di presa, una camera produce un **GSD** più piccolo di un'altra, non è detto che la prima abbia il sensore con pixel di lato minore, poiché nel determinare la dimensione del **GSD** interviene anche la focale dell'obiettivo; in altre parole la dimensione del **GSD**, a parità di distanza, è determinata non dal lato L del pixel, ma dal rapporto L/f . Ad esempio: una camera con un sensore con pixel di $10\ \mu\text{m}$ di lato e con focale di $100\ \text{mm}$, a parità di distanza di presa dall'oggetto, produce immagini con risoluzione superiore a una camera con pixel di $8\ \mu\text{m}$ di lato ma con focale di $60\ \text{mm}$.

Ricordiamo infine che ridurre le dimensioni del pixel può essere un vantaggio da un punto di vista della risoluzione geometrica, ma non lo è dal punto di vista della qualità radiometrica dell'immagine; infatti al diminuire della dimensione del pixel diminuisce il rapporto segnale/rumore a causa dei fenomeni di interferenza tra pixel adiacenti.

4.5.1.2.1 Sistemi a prospettiva centrale unica

Con la dizione di *frame camera*, si intende una camera che cattura l'immagine su uno o più sensori matriciali. Se la camera è dotata di un unico sensore matriciale la chiameremo *frame camera mono-CCD* (questo termine, come altri usati nel seguito, non fanno parte di una terminologia ufficiale, ma sono funzionali al discorso che si sta facendo); le *frame camera mono-CCD*, quando usate per riprese aeree, possono venir impiegate in configurazioni multi-camera, cioè, come vedremo nel seguito, in una configurazione che prevede l'assemblaggio di più camere, in genere quattro, per la ripresa simultanea dell'immagine in quattro diverse bande dello spettro elettromagnetico. Se una *frame camera* è invece dotata di più sensori matriciali che sono alloggiati in un'unica camera la chiameremo *frame camera multi-CCD*. Vedremo che queste camere sono quelle usate per la realizzazione delle camere aerofotogrammetriche propriamente dette.

Le *frame camera mono-CCD* sono indifferentemente usate per riprese terrestri ed aeree. Le *frame camera* possono essere costituite da camere fotografiche digitali nate come tali, oppure da camere tradizionali aventi la caratteristica di essere dotate di dorso porta-pellicola, e nelle quali il dorso porta-pellicola è stato sostituito da un dorso digitale, cioè in pratica da un dorso dove al posto della pellicola è stato montato un **CCD** per l'acquisizione dell'immagine in forma digitale; il **CCD** può essere di tipo matriciale o di tipo lineare. I sensori delle *frame camera mono-CCD* hanno dimensioni variabili, da un minimo di 1000×1000 pixel fino a un massimo di 4000×5000 pixel. In genere le camere dotate di sensori fino a 2000×3000 pixel vengono dette di piccolo formato, mentre quelle che sono dotate di sensori fino a 4000×5000 pixel vengono dette di medio formato.

Che una camera digitale **mono-CCD**, specie se con sensori di dimensioni di 1000×1000 pixel o poco più, possa essere usata per riprese aeree può sembrare strano per chi associa automaticamente l'idea della ripresa di immagini aeree con la fotogrammetria e la produzione di cartografia; in Paesi invece come gli Stati Uniti, il Canada e l'Australia è molto comune l'impiego della ripresa aerea non solo per tutte le finalità che riguardano gli scopi del telerilevamento inteso come strumento di conoscenza dell'ambiente, dello stato di inquinamento o altro, ma anche come strumento di acquisizione di informazioni nel caso di calamità naturali e controllo delle emergenze. Nella letteratura scientifica si possono riscontrare numerosissimi impieghi di *frame camera mono-CCD* con sensori da 1000×1000 pixel o da 1000×1500 pixel per il rilevamento a fini di controllo degli incendi boschivi, per il controllo dell'erosione delle coste, per la valutazione, da parte delle Compagnie di assicurazione, dei danni a seguito di calamità naturali, e così via. E' anzi sorprendente vedere come sia praticamente uno standard dotare queste camere digitali, di uso praticamente amatoriale, di stru-

mentazione **GPS** e anche di **IMU** (*Inertial Measuring Unit*) e anche, nelle configurazioni multicamera di cui diremo più avanti, di sistemi di controllo dell'assetto nadirale.

Le *frame camere mono-CCD* che nascono come camere da presa terrestri vengono adattate alle riprese aeree montandole su appositi dispositivi che hanno la funzione di mantenere la camera con asse ottico dell'obiettivo in direzione quasi-nadirale; questi dispositivi sono in genere dotati di dispositivi antivibranti che hanno lo scopo di attenuare le vibrazioni che possono essere trasmesse alla camera dal corpo del mezzo aereo su cui essa è montata.

Una limitazione nell'uso di queste camere per riprese aeree consiste nel fatto che esse non sono dotate di alcun dispositivo di **FMC** (*forward motion compensation*, = compensazione dell'effetto di trascinamento sull'immagine dovuto al moto dell'aereo) e quindi questo limite deve essere sempre tenuto presente nel pianificare il rapporto tra velocità dell'aereo e il tempo di esposizione per evitare l'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale.

Le *frame camera mono-CCD* multicamera sono sistemi di ripresa basati sull'uso simultaneo di più camere da presa, in genere quattro. Nella configurazione più semplice, che è stata quella più usata specialmente per le riprese aeree non fotogrammetriche, nella quale si usano camere da presa con **CCD** dotati di sensori con risoluzione variabile all'incirca tra 1000 x 1500 pixel e 2000 x 3000 pixel, il sistema di presa viene realizzato assemblando quattro camere e mantenendo gli assi ottici degli obiettivi tra loro paralleli.



Figura 34 - Camere digitali terrestri predisposte per il montaggio su velivolo

Esaminiamo ora due camere digitali espressamente realizzate per riprese aeree fotogrammetriche: la Z/I Imaging Digital Mapping Camera (DMC) e la Vexcel UltraCamD. Queste due camere appartengono anch'esse alla categoria delle *frame camera* a camere multiple, anche se nel loro caso è più appropriato parlare di camere multi-cono più che di camere multicamera; infatti queste camere sono entrambe dotate di otto coppie obiettivo – sensore nelle quali ciascun obiettivo proietta l'immagine del terreno sul sensore matriciale ad esso accoppiato, ma queste coppie obiettivo - sensore sono rigidamente montate in un corpo camera e non sono cioè delle camere a sé stanti come vedremo ad esempio nel caso della DiMAC.

Esse inoltre si caratterizzano per un metodo peculiare di realizzare il **FMC**. Si vedrà che nella camera DiMAC il dispositivo **FMC** consiste in una traslazione reale del sensore nel senso del moto, analogo, come principio, a quello delle camere tradizionali. Nella camera a pellicola Wild RC10, ad esempio, il dispositivo di **FMC** consiste nel far traslare il dispositivo di spianamento nel senso del moto dell'aereo con una velocità v :

$$v = V \cdot (f / H) \quad (12)$$

essendo V la velocità dell'aereo. La traslazione massima che il dispositivo può subire è di 640 μm . Nelle due camere che vengono descritte non viene usata una traslazione fisica dei sensori, ma un particolare artificio elettronico detto *Time Delay and Integration (TDI)*.

Ogni camera che utilizza questo metodo per la correzione dell'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale è caratterizzata da un numero massimo di righe sulle quali può essere distribuito l'accumulo progressivo delle cariche. Questo valore viene detto *maximum FMC capability*.

4.5.1.2.1.1 Camera ZEISS

La camera DMC della Z/I imaging è composta da un corpo esterno che contiene rigidamente assemblati due gruppi di obiettivi: un gruppo di quattro obiettivi posti in posizione centrale (vedi Figura 35) aventi focale di 120 mm; ciascuno di questi obiettivi proietta l'immagine del terreno su un proprio **CCD** Philips avente un sensore di 4096 x 7168 pixel con lato del pixel di 12 μm .

Questi quattro coni sono montati nella camera in modo che gli assi ottici degli obiettivi siano leggermente convergenti così da creare una zona di sovrapposizione tra le quattro parti di territorio riprese da ciascuno di essi. Un software di post-processing ricompone le quattro immagini riprese dai quattro sensori e forma un'immagine virtuale le cui dimensioni sono di circa 13824 x 7680 pixel. Questa immagine è quella destinata ad essere impiegata per scopi fotogrammetrici.

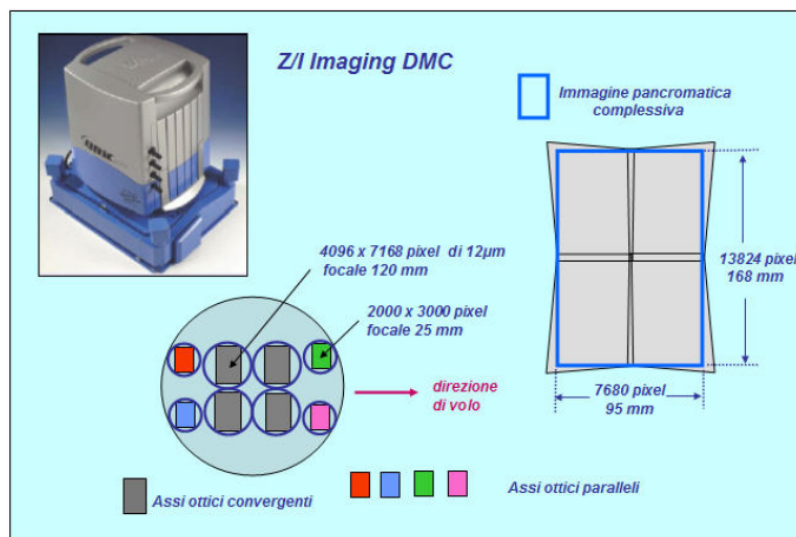


Figura 35 - Composizione della camera DMC

L'acquisizione dei toni di grigio avviene con una profondità di 12 bit. In posizione esterna a questo corpo centrale di quattro coni (vedi Figura 35) sono montati altri quattro coni con obiettivi di focale molto più corta degli altri quattro, pari a 25 mm. Ciascuno di essi proietta l'immagine del terreno su un **CCD** con sensore di 2000 x 3000 pixel; questi quattro coni forniscono l'immagine multispettrale del terreno nelle quattro bande **RGB** e **IR**. Stante la corta focale di questi coni il campo abbracciato da ciascuno di essi, sia nella direzione di volo che trasversalmente ad essa, risulta maggiore di quello complessivo dei quattro coni che registrano le immagini pancromatiche. Ad un'altezza di volo di 2000 m, che assumiamo come ter-

mine di paragone, la proiezione al suolo del sensore di una delle camere multispettrali vale $1920 \times 2880 \text{ m}^2$, mentre quella equivalente all'insieme dei quattro sensori pancromatici vale $1550 \times 2800 \text{ m}^2$.

Come si vede nella Figura 35 la camera viene montata sulla piattaforma giroscopica stabilizzatrice Zeiss T-AS. Nella Figura 36 vengono rappresentate le caratteristiche geometriche di presa della DMC; il campo abbracciato trasversalmente alla direzione di volo è quasi uguale a quello di un'analogica camera metrica analogica, mentre nella direzione di volo è sensibilmente minore, con una conseguente riduzione della base di presa e quindi dell'angolo di osservazione stereoscopica.

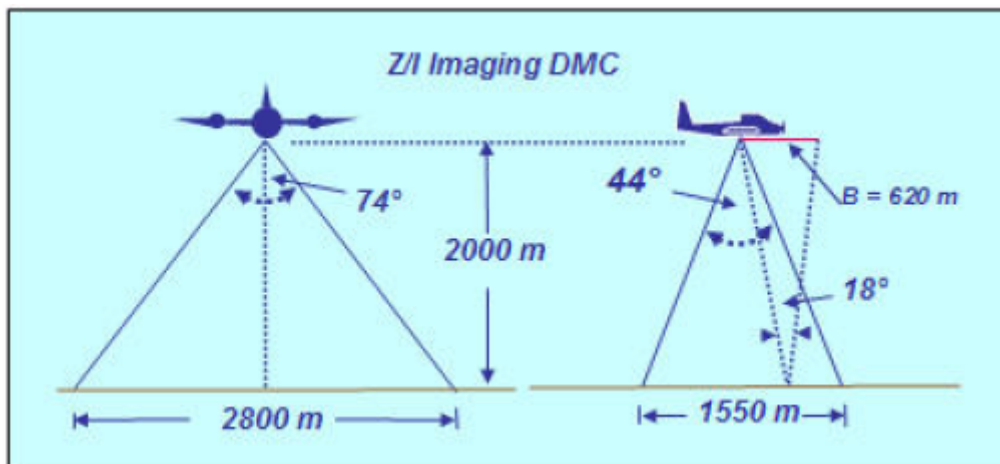


Figura 36 - Geometria di presa della camera DMC

Praticamente uguale risulta invece il **GSD** che è di 20 cm contro i 19 cm di una camera tradizionale.

4.5.1.2.1.2 Camera VEXCEL

Anche questa camera fotogrammetrica è una camera multi-cono e si caratterizza per il modo in cui viene acquisita e formata l'immagine pancromatica per l'uso fotogrammetrico. Un'altra caratteristica è quella di usare **CCD** di dimensioni non eccessive e quindi di costo più contenuto. Il corpo della camera contiene otto coni: i quattro coni dedicati alla ripresa delle immagini parziali che formano via software l'immagine pancromatica virtuale, sono disposti in linea, secondo quella che è la direzione di volo durante la presa (vedi Figura 37).

In posizione simmetrica all'asse su cui sono allineati questi quattro coni sono posizionati a coppia altri due coni che forniscono l'immagine multispettrale (**RGB** e **IR**). Gli obiettivi dei quattro coni che acquisiscono l'immagine pancromatica hanno focale di 100 mm; quelli dei coni che acquisiscono le immagini multispettrali hanno focale di 28 mm. I **CCD** usati sia per l'acquisizione dell'immagine pancromatica virtuale che per le immagini multispettrali hanno sensori di 4008×2672 pixel, con pixel di lato di $9 \mu\text{m}$. Per ognuno dei quattro coni in linea l'immagine viene proiettata dall'obiettivo su un piano focale dove sono disposti dei **CCD**. Dei quattro coni uno è detto cono principale e il suo obiettivo proietta l'immagine del terreno su quattro **CCD** che sono disposti sul piano focale come indicato in Figura 38; il formato fisico del piano focale che risulta da questa disposizione dei sensori è di $103.5 \times 67.5 \text{ mm}^2$.

Gli altri tre coni hanno la funzione di acquisire delle immagini che devono riempire i vuoti lasciati tra i quattro sensori del cono principale.

Mediante un software le 9 immagini acquisite vengono assemblate per formare l'immagine virtuale, che risulta di 11.500 x 7500 pixel. Una caratteristica importante della UltraCamD è la seguente: se i quattro coni acquisissero le immagini nello stesso istante, le quattro immagini da essi acquisite non sarebbero riprese dallo stesso punto di presa e quindi non sarebbero tra di loro geometricamente congruenti ai fini della formazione via software dell'immagine pancromatica risultante.

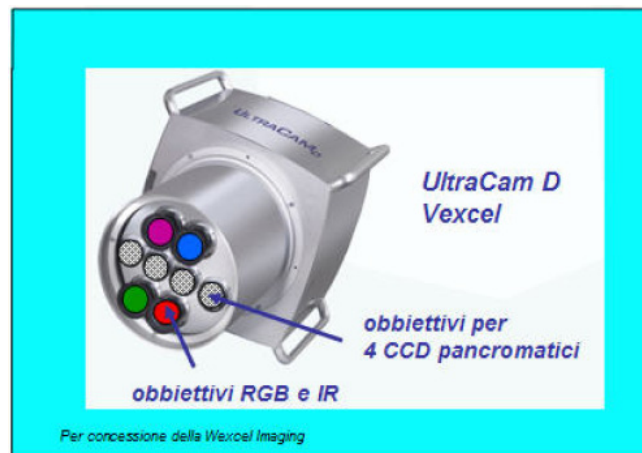


Figura 37 - Disposizione delle ottiche nella camera Vexcel

E' per ovviare a questo inconveniente che i quattro coni sono stati posti in asse con la direzione di volo. L'esposizione non avviene infatti contemporaneamente per tutti i coni, ma in sequenza, ad un intervallo temporale che dipende dalla velocità dell'aereo, in modo che l'esposizione dei sensori di ciascun cono avvenga quando il centro dell'obbiettivo di ciascun cono si trova sempre nella stessa posizione spaziale. La cadenza di presa massima è di 1 fotogramma la secondo. Nella Figura 39 sono riassunte le caratteristiche geometriche di presa che possono esser confrontate con quella della camera tradizionale.

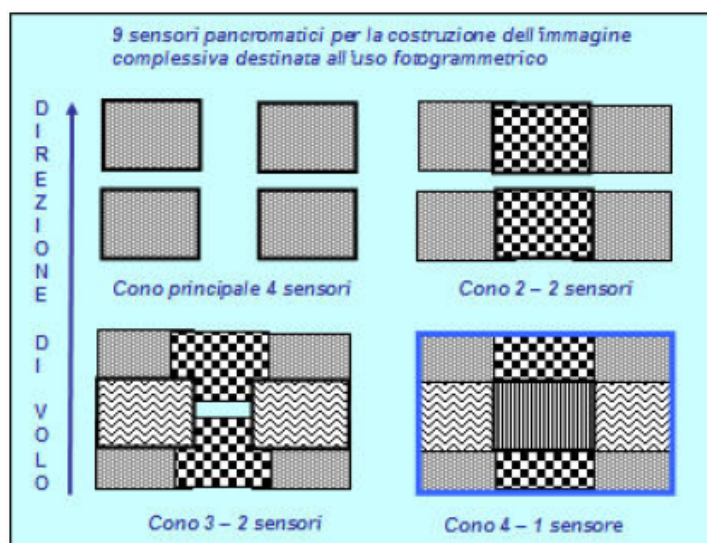


Figura 38 - Sensori della camera Vexcel

Come si vede dalla figura il campo abbracciato da ciascun cono multispettrale, sia nella direzione di volo che trasversalmente ad esso, è maggiore di quello che corrisponde all'immagine pancromatica virtuale. Paragonabile a quello della camera tradizionale a pellicola è il **GSD**, mentre invece alquanto ridotta risulta la base di presa, che considerando una quota relativa di volo $H = 2000$ m vale 560 m con un angolo di massima stereoscopia di soli 16° . Nella camera UltraCamD il maximum FMC capability è di 50 righe. Tenuto conto che i sensori hanno pixel di $9 \mu\text{m}$ di lato, si vede che il *maximum FMC capability* della UltraCamD vale 540 m, ed è quindi molto prossimo al valor massimo del **FMC** della Wild RC10, che, come abbiamo già ricordato, è di 640 m.

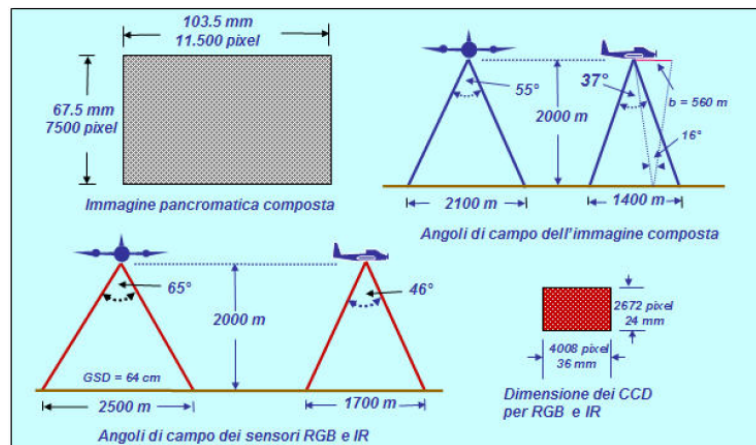


Figura 39 - Geometria di presa della camera Vexcel

4.5.1.2.1.3 Camera DIMAC

Esaminiamo ora la camera DiMAC (*Digital Modular Aerial Camera*) che è un sistema multicamera che si basa sull'impiego di una stessa camera, basata su un CCD matriciale, assemblata in più esemplari in un apposito contenitore, la quale rappresenta il sistema più evoluto e di recente introduzione sul mercato di questo tipo di sistemi multicamera. Questo sistema si basa sull'impiego di un corpo cilindrico che può ospitare da una a quattro camere. La camera base (vedi Figura 40) è costituita da una camera digitale con un sensore a matrice Kodak da 5440×4080 pixel (circa 22 Mpixel); i pixel hanno il lato di $9 \mu\text{m}$ e la dimensione reale del sensore risulta perciò di 48.9×36.7 mm². I fotodiodi sono caratterizzati da un ampio range dinamico (da 8 a 16 bits) e la frequenza di presa è inferiore ai 2 s. Nella Figura 40, a destra è riportata la camera base e a sinistra una sua sezione schematizzata. La camera può essere dotata di obiettivi con diverse focali (60, 80, 100, 120, 150 mm).



Figura 40 - Sezione della camera di base DiMAC

La frequenza di scatto è di 2,1 s. Una caratteristica importante di questa camera è che dispone del dispositivo di correzione dell'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale durante il tempo di integrazione del sensore (**FMC**). Ricordiamo che nelle camere fotogrammetriche aeree a pellicola più evolute il dispositivo **FMC** consisteva nella possibilità di traslare la pellicola rispetto al corpo camera e cioè praticamente rispetto all'obiettivo; in tal modo il fotogramma veniva spostato nella direzione opposta a quella di volo con una velocità $v = V \cdot f / H$ per la durata del tempo di esposizione. In questa camera la traslazione viene data al sensore, realizzando quindi un effetto di **FMC** analogo a quello delle camere a pellicola tradizionali.

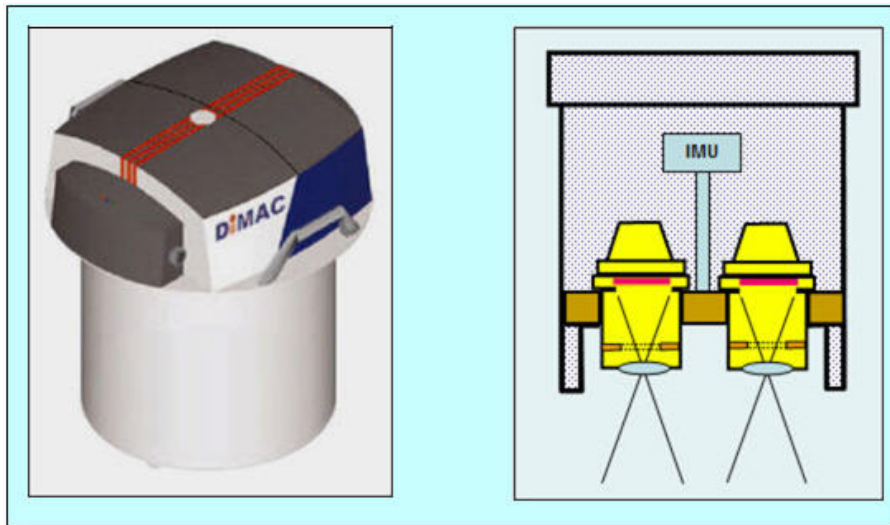


Figura 41 - Sezione dell'involucro della camera DiMAC

Nella Figura 41, a sinistra, è rappresentato il corpo cilindrico che ha la funzione di contenitore delle varie camere; a destra è rappresentato uno spaccato schematico della camera sezionata secondo un piano verticale mediano; il disegno mostra le due camere alloggiata in una metà del corpo cilindrico; altre due possono essere alloggiata nell'altra metà del corpo cilindrico. Si noti la presenza dell'otturatore tra l'obiettivo e il sensore che ha la funzione di oscurare il sensore durante il tempo di svuotamento del medesimo. Il corpo cilindrico alloggia al suo interno anche il dispositivo IMU la determinazione diretta dell'orientamento esterno delle immagini.

Come detto le riprese possono essere effettuate con una o più camere sistemate nel corpo cilindrico; quando si usa più di una camera un software opportuno ricompono in un'unica immagine virtuale le immagini che vengono acquisite dai sensori delle diverse camere. Poiché i sensori sono rettangolari, utilizzando diverse combinazioni di camere e diverso orientamento dei sensori (cioè o col lato più lungo o col lato più corto disposto nella direzione di volo) si possono ottenere molte diverse configurazioni di presa e conseguentemente molte diverse immagini virtuali ricomposte.

Nella Figura 42 si vede una configurazione a tre camere col lato lungo dei sensori disposti secondo la direzione di volo. In questo caso l'immagine virtuale che si ottiene ricomponendo quella acquisita dalle tre camere ha la dimensione di 5440 x 10000 pixel. Nella Figura 43 è riprodotta la posizione della camera rispetto all'asse di volo e la posizione dei sensori che corrisponde alla situazione di presa della Figura 42. Per le riprese fotogrammetriche la DiMAC suggerisce la configurazione con quattro camere e i sensori orientati nella direzione di volo (Figura 42/b) e un obiettivo con focale di 80 mm; adottando una quota relativa di volo pari a 2000 m, l'immagine virtuale che si ricava ha una dimensione di 6500 x 8500 pixel, che proiettata al suolo, porta ad una larghezza della strisciata di 1460 m e ad una dimensione nel

senso del volo di 1900 m; la base di presa risulta di 760 m, mentre il **GSD** vale 23 cm. Nella Figura 43 è riprodotta la posizione della camera rispetto all'asse di volo e la posizione dei sensori che corrisponde alla situazione di presa della Figura 42.

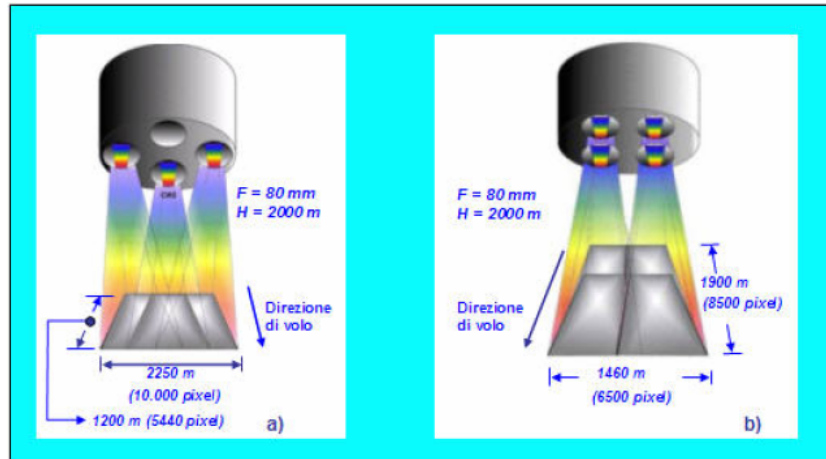


Figura 42 - Configurazioni della camera DiMAC

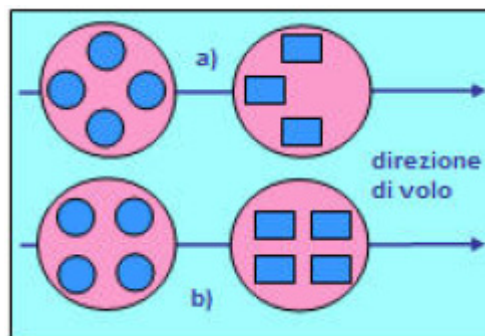


Figura 43 - Alcune configurazioni possibili della camera DiMAC

4.5.1.2.2 Sistemi a prospettiva centrale multipla

In questo paragrafo viene presentato il panorama attuale dei sensori digitali in grado di acquisire immagini a prospettiva centrale multipla. Sono descritte nel seguito le caratteristiche costruttive di tali sensori, le modalità di acquisizione, i dati tecnici delle piattaforme satellitari operanti in tale ambito e delle principali camere fotogrammetriche dedicate alle piattaforme aeree. Particolare rilevanza viene data alle modalità e alle tecnologie di acquisizione delle immagini, con l'intento di evidenziarne le oggettive potenzialità geometriche e radiometriche che hanno reso possibile l'utilizzo di tale tipologia di sensori in ambito fotogrammetrico, dove solo fino a poco tempo fa risultava predominante, in fase di produzione del dato, l'utilizzo di strumentazione analogica.

I componenti principali del sistema di acquisizione sono il sensore e l'ottica. La strumentazione ottica consente di convogliare verso il sensore di acquisizione l'energia elettromagnetica riflessa dalle superfici inquadrature. Relativamente alle piattaforme satellitari sono spesso utilizzati sistemi di lenti e specchi per incrementare la lunghezza focale dell'ottica minimizzandone le dimensioni effettive, essendo valori medi di tale parametro dell'ordine della decina di metri (vedi Figura 44).

L'utilizzo congiunto di più sensori **CCD** caratterizzati da sensibilità spettrali differenti (vedi Figura 47) consente di acquisire immagini multispettrali in cui le diverse bande sono genera-

te dal segnale riflesso in una determinata porzione dello spettro elettromagnetico. Dal punto di vista tecnico le soluzioni per effettuare acquisizioni multispettrali sono differenti: una scelta diffusa è quella di utilizzare ottiche diverse per le immagini pancromatiche e multispettrali. Per le acquisizioni multispettrali il segnale elettromagnetico viene suddiviso nelle bande di interesse e convogliato verso il relativo sensore CCD mediante l'interposizione, tra gli elementi rilevatori e l'ottica, di opportuni filtri diecrici. In Figura 48 viene riportato lo schema strumentale per l'acquisizione multispettrale a 3 bande nel visibile. Il numero di bande indagate dello spettro elettromagnetico, generalmente 4 per i sensori descritti in questo paragrafo, definisce la risoluzione spettrale del dato.



Figura 44 - Ottica della piattaforma satellitare QuickBird

Il sensore di acquisizione è costituito da una serie di *array* lineari di elementi CCD (vedi Figura 45) opportunamente assemblati.

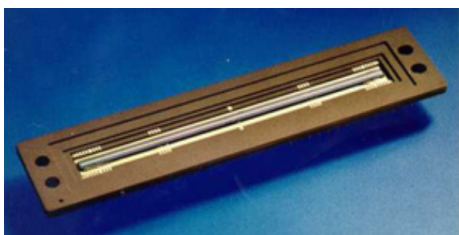


Figura 45 - Array lineare CCD



Figura 46 - Schema di un singolo sensore CCD

La modalità pancromatica registra invece il contributo energetico di un ampio intervallo dello spettro elettromagnetico, generalmente relativo al visibile e parte dell'infrarosso vicino (ovvero l'insieme delle singole bande multispettrali). Ciò rende possibile il ridurre la superficie fisica del singolo elemento CCD aumentando così la risoluzione dell'immagine acquisita: il rapporto tra risoluzione geometrica dell'immagine pancromatica e di quella multispettrale è generalmente di 1 a 4. La risoluzione geometrica, ovvero la dimensione al suolo di ogni cella dell'immagine, è invece funzione di più parametri: le dimensioni del singolo elemento CCD, la quota dell'orbita, la focale dell'ottica o l'angolo solido sotteso da ogni cella del sensore (**IFOV**, *Instantaneous Field of View*). Per questo motivo la radiometria associata ad ogni cella risulta una media delle radianze registrate all'interno dell'IFOV.

La tecnologia civile attualmente disponibile, unitamente all'aspetto della concessione delle autorizzazioni necessarie, consente di acquisire immagini caratterizzate da una risoluzione geometrica massima pari a 0,60 m (QuickBird, banda pancromatica). La futura missione Or-

bView-5, programmata per l'anno 2007, prevede invece una dimensione al suolo del singolo pixel pari a 0,41 m per la banda pancromatica. Il problema tecnologico non è soltanto relativo alla dimensione fisica del singolo elemento **CCD**, ma anche al rapporto segnale/rumore caratteristico di ogni sensore. Diminuendo le dimensioni del rilevatore diminuisce proporzionalmente l'energia elettromagnetica incidente, con il rischio quindi di generare un'immagine con caratteristiche radiometriche insufficienti (rumore troppo elevato).

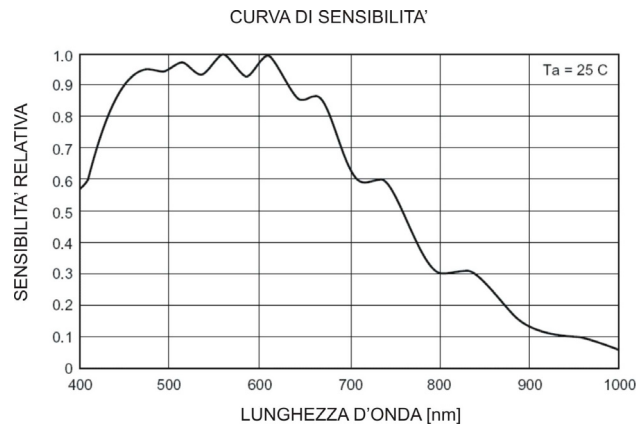


Figura 47 - Curva di sensibilità spettrale. Esempio di un array lineare CCD pancromatico

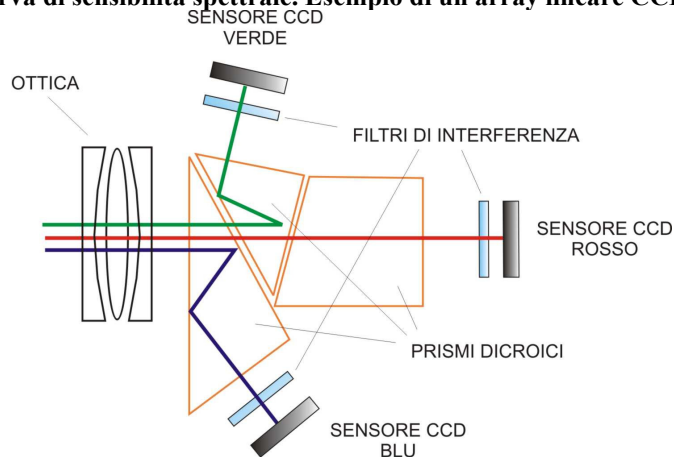


Figura 48 - Schema di acquisizione multispettrale a 3 bande nello spettro del visibile

La metodologia operativa di acquisizione basata su *array* lineari di sensori **CCD** è nota in letteratura come modalità *pushbroom*³. Il termine anglosassone, traducibile (letteralmente ma non adeguatamente) con “spazzola”, viene utilizzato per esemplificare il concetto alla base dell'acquisizione: viene cioè “spazzolata” l'intera superficie per porzioni lineari trasversali al moto. Le immagini digitali sono cioè assemblate linea per linea, acquisite ad intervalli di tempo regolari (tempo di integrazione o *dwell time*) dal sensore lineare **CCD** (o da *n* sensori lineari che acquisiscono in bande diverse dello spettro elettromagnetico o con angoli di vista differenti) solidale alla piattaforma (aerea o satellitare) in movimento lungo la propria traiettoria. Lo schema descritto è illustrato in Figura 49 e Figura 50.

Dal punto di vista geometrico lo schema di riferimento è quello della prospettiva centrale, relativo però non all'intera immagine ma alla singola linea, da cui il nome immagini a prospettiva centrale multipla. Dal punto di vista fotogrammetrico questo implica una variazione continua nel tempo dei parametri di orientamento esterno, ovvero posizione del centro di presa ed angoli di assetto. In particolare le piattaforme satellitari possono orientarsi, variando

³ Tale modalità di acquisizione differisce in modo sostanziale dalla modalità *whiskbroom*, a specchio oscillante, utilizzata da altri sensori (es: Landsat, Mivis).

il proprio assetto angolare, per inquadrare porzioni della superficie terrestre non posizionate lungo la traccia orbitale. Tale caratteristica implica che la risoluzione geometrica nominale di un'immagine telerilevata (riferita ad acquisizioni nadirali) diminuisca progressivamente con l'aumentare dell'angolo di vista medio del sensore, come evidenziato dal grafico di Figura 51.

Una distinzione operativa necessaria è quella tra *pushbroom* sincrono ed asincrono. Nel primo caso la velocità della piattaforma è uguale alla velocità di scansione della superficie terrestre, mentre nel secondo caso la velocità del sensore è superiore rispetto a quella di acquisizione. Questa seconda modalità, distintiva dei satelliti Eros A1⁴ ed Orbview-3, implica la necessità di variare con continuità l'assetto angolare della piattaforma (a cui il sensore è solidale). Tale variazione di assetto induce sull'immagine delle distorsioni geometriche aggiuntive rispetto a quelle comuni ad un'acquisizione *pushbroom* sincrona, che devono quindi essere adeguatamente modellizzate durante la fase di stima dei parametri di orientamento esterno.

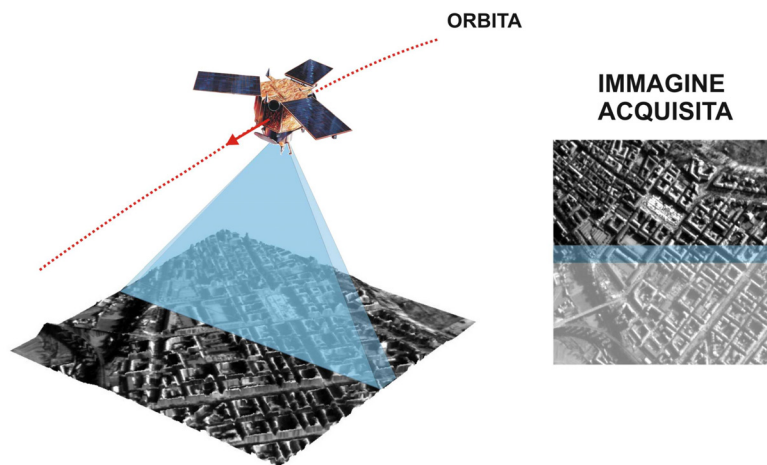


Figura 49 - Schema di acquisizione Pushbroom da piattaforma satellitare

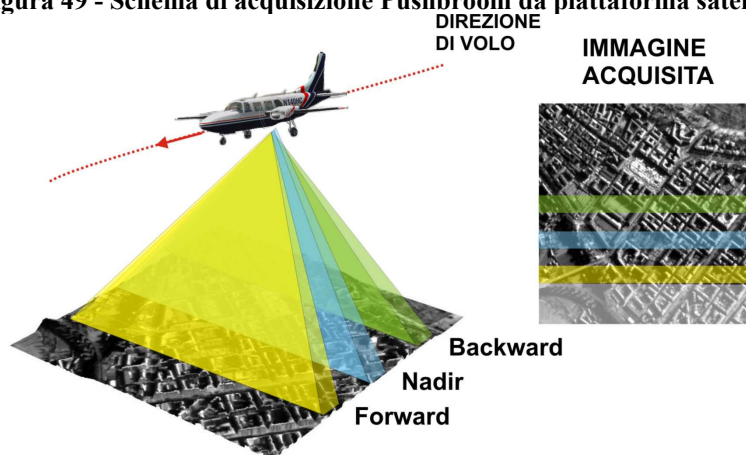


Figura 50 - Schema di acquisizione Pushbroom da piattaforma aerea

Esistono inoltre sistemi *pushbroom* dotati di sensori lineari multipli (SLM) che riprendono con continuità il territorio sorvolato con tre o più viste simultanee: una vista nadirale (nadir), una vista inclinata nella direzione di volo (*forward*) ed una vista inclinata in direzione oppo-

⁴ Piattaforma israeliana che ha ereditato la caratteristica di asincronia dal precedente progetto gemello militare, con la finalità di tracciare oggetti in movimento a terra.

sta al volo (*backward*). Ciò si ottiene posizionando sul piano focale tre sensori **CCD** lineari sensibili generalmente a diverse bande dello spettro elettromagnetico. Un possibile schema di acquisizione è riportato in Figura 50, nel quale risulta evidente che mano a mano che l'aereo avanza lungo la strisciata il territorio inquadrato viene acquisito tre volte.

In Tabella 6 viene presentato in forma schematica il panorama attuale dei sensori digitali in grado di acquisire immagini a prospettiva centrale multipla, suddivisi in funzione delle caratteristiche descritte in precedenza. Per ognuno di essi viene riportata nei paragrafi successivi una scheda tecnica sintetica, al fine di evidenziarne similitudini e peculiarità. I dati, aggiornati a Maggio 2006⁵, sono stati estrapolati dalla documentazione tecnica e divulgativa fornita dai rispettivi distributori.

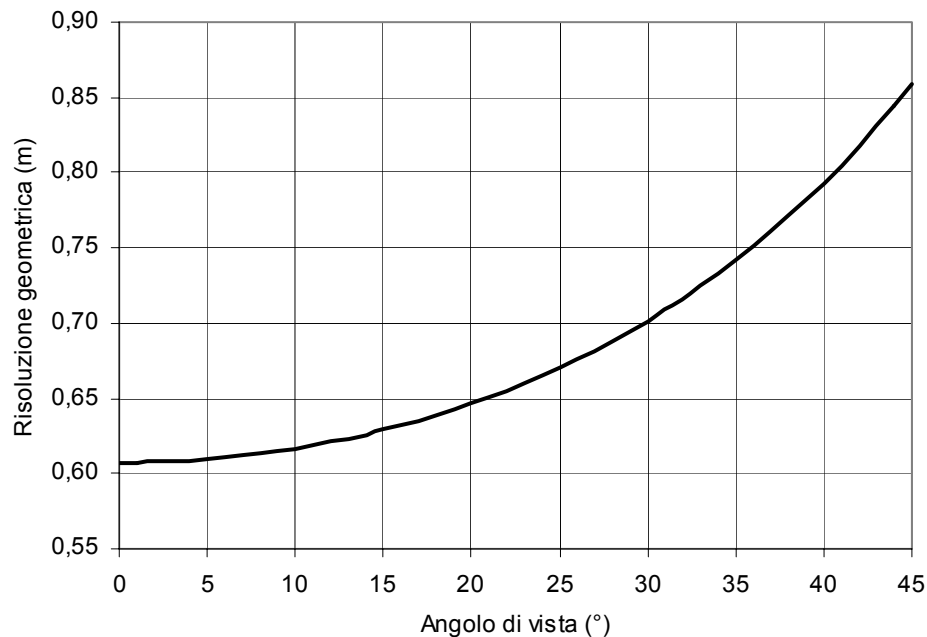


Figura 51 - Dipendenza della risoluzione geometrica dall'angolo di vista del sensore. Dati relativi alle immagini QuickBird pancromatiche

Nome	Piattaforma		Pushbroom	
	Satellitare	Aerea	Sincrono	Asincrono
QuickBird	✓		✓	
Ikonos	✓		✓	
Spot 5	✓		✓	
Formosat-2	✓		✓	
Terra (sensore Aster)	✓		✓	
Eros A-1 ed Eros B	✓			✓
Orbview-3	✓			✓
Leica ADS40		✓	✓	
Jena JAS 150		✓	✓	
HRSC		✓	✓	
Starimager TLS		✓ ⁶	✓	

Tabella 6 - Panorama attuale dei sistemi a prospettiva centrale multipla

⁵ Si consiglia di verificare i prezzi di listino per immagini di archivio e nuove acquisizioni, in funzione del continuo aggiornamento degli stessi.

⁶ Camera appositamente progettata per essere utilizzata da elicottero.

4.5.1.2.2.1 Camera ADS40



La camera ADS40 è una camera a sensori lineari multipli che, oltre a riprendere il territorio per strisciate continue (affrancandosi dallo schema dei fotogrammi parzialmente sovrapposti) e a fornire immagini ideali per la realizzazione delle ortofoto, trova la soluzione per far convivere in modo ottimale diverse esigenze fondamentali della ripresa aerea con scopi fotogrammetrici realizzando un grande angolo di campo trasversale, una elevata risoluzione geometrica (**GSD**), una elevato angolo di massima visione stereoscopica e flessibilità di configurazione in funzione delle richieste dell'utenza. L'ADS40 rappresenta senza dubbio un concentrato delle soluzioni più avanzate della tecnologia digitale che la accomuna per certi aspetti alla tecnologia del rilevamento satellitare di ultima generazione.

Nella Figura 52 viene mostrato uno spaccato della camera che ne mostra le componenti interne. Su un corpo cilindrico che contiene l'ottica è montato il contenitore della parte elettronica che ospita i sensori disposti sul piano focale e l'unità di misura inerziale **POS** dell'Applanix rigidamente fissata al piano focale.

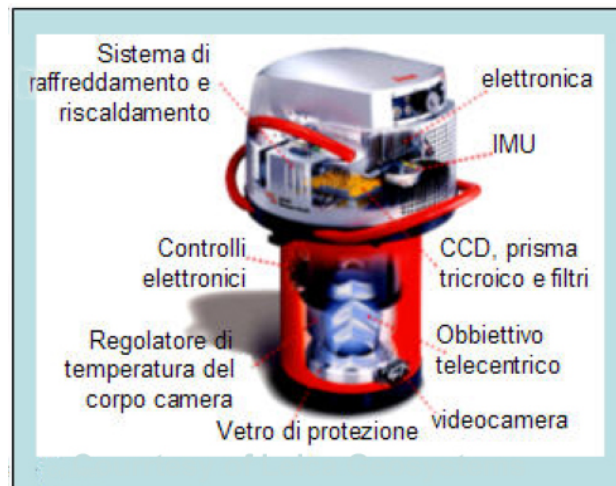


Figura 52 - Schema costruttivo della camera ADS40 (courtesy of LEICA GEOSYSTEMS)

L'ottica della camera è costituita da un sofisticato obiettivo telecentrico che ha la caratteristica di orientare ad angolo retto sul piano focale tutti i raggi uscenti da esso nello spazio immagine. Sul piano focale della camera sono posizionati:

- tre gruppi di due sensori pancromatici che raccolgono le immagini *Forward*, *Nadir* e *Backward*;
- un gruppo di tre sensori pancromatici che raccolgono l'immagine RGB mediante un prisma tricroico;
- un sensore che raccoglie l'immagine nella banda dell'infrarosso vicino.

I sensori sono costituiti da 12.000 pixel di 6.5 μm di lato. Le immagini *Forward*, *Nadir* e *Backward* vengono raccolte da tre coppie di sensori. Ciascuna coppia di sensori è costituita da due sensori accostati e sfalsati mezzo pixel (Figura 53c); con questa configurazione sfalsando opportunamente il tempo di integrazione nei due sensori si riesce a raddoppiare la risoluzione dell'immagine acquisita, che risulta essere paragonabile a quella acquisita con un sensore di 3.5 μm . Il vantaggio è quello di avere la risoluzione di 3.5 μm , ma di avere un fotodiodo di 6.5 μm , in grado quindi di aver un *range* dinamico di 12 bit (4096 livelli di grigio).

Nella Figura 53 è indicata una delle possibili disposizioni dei sensori lineari sul piano focale della ADS40; essa rappresenta una delle possibili disposizioni poiché la tecnica con la quale la camera è realizzata consente di disporre i sensori in altre configurazioni. Ad esempio si possono posizionare i sensori **RGB** in posizione intermedia tra due coppie di sensori pancromatici, oppure posizionare i sensori **RGB** in posizione *Nadir* spostando dalla posizione *Nadir* la coppia di sensori pancromatici.

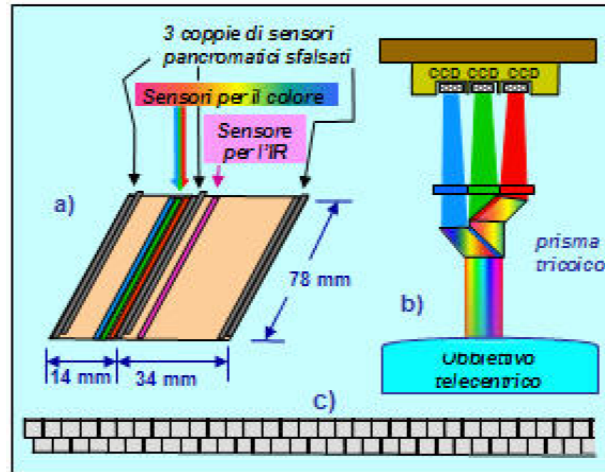


Figura 53 - Esempio di disposizione dei sensori lineari sul piano focale della ADS40

Il sistema di separazione della luce che va ad incidere sui sensori che forniscono l'immagine a colori è basato sull'impiego di un filtro tricoico (vedi Figura 53d); questo fa sì che, contrariamente a quelle camere in cui vengono usati sensori trilineari normali, l'immagine che si forma nelle tre componenti primarie della luce siano rigorosamente uguali. Le tre componenti **RGB** all'uscita dal prisma tricoico passano attraverso un filtro a banda stretta in modo da effettuare una più accurata selezione delle tre componenti.

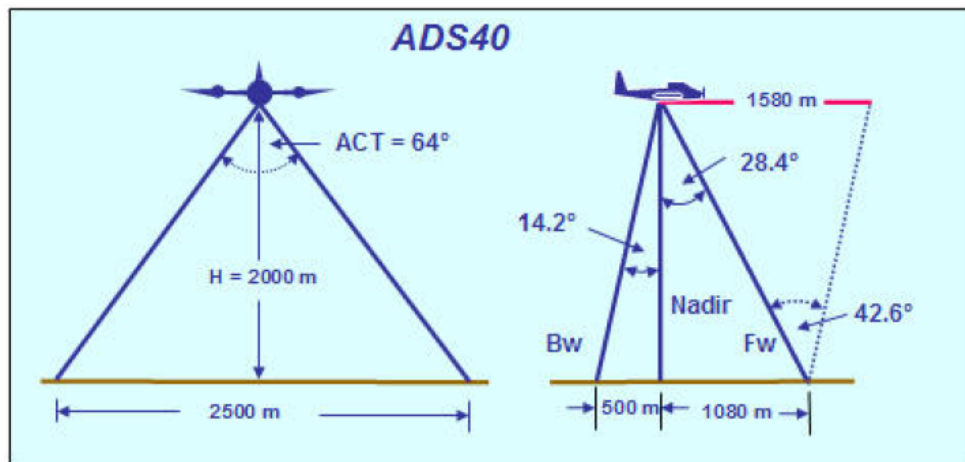


Figura 54 - Campo di vista trasversale ed angolo di massima stereoscopia della camera ADS40

Come indicato in figura la dimensione fisica dei sensori lineari nel senso trasversale alla direzione di volo è di 78 mm (6.5 μ m x 12.000). Poiché la distanza focale dell'obiettivo è di

62 mm ne risulta un angolo di campo trasversale di 64° . Nella direzione di volo, se si considera la combinazione di visuali *Forward* e *Backward*, si ha una base di presa virtuale cui corrisponde un angolo di massima stereoscopia di 42.6° , addirittura superiore a quello che si ha con le camere aerofotogrammetriche tradizionali, come evidenziato in Figura 54.

Per quanto riguarda la risoluzione geometrica in termine di **GSD** si ha che a 2000 m di quota relativa di volo il **GSD** dell'ADS40 è di 10 cm se si sfrutta la possibilità di usare i due sensori sfalsati, nettamente superiore quindi a quello ottenibile con camere tradizionali a pellicola; mentre è di 20 cm se si usa solo uno dei sensori pancromatici. La frequenza di scansione può variare da 200 a 800 linee al secondo.

4.5.1.2.2 Camera JENA



La Jena-Optronik GmbH, nota per lo sviluppo della camera analogica multispettrale MKF 6 per piattaforme spaziali e della MSK 4 per piattaforme aeree, ritorna sul mercato con un prodotto tecnologicamente avanzato: il sensore lineare multiplo aviotrasportato JAS 150. Attraverso la precedente esperienza nella progettazione di sensori **CCD** lineari a grazie alla conoscenza acquisita nell'ambito di camere fotogrammetriche e spettrometri, è stato sviluppato un sensore digitale lineare di tipo *pushbroom* dedicato al telerilevamento ed alla fotogrammetria.

La caratteristica peculiare della camera in oggetto è l'orientamento delle ottiche, che consente di acquisire la stessa porzione di territorio da cinque angoli di vista differenti come schematizzato in Figura 55. Ciò consente un

approccio di precisione in fase di generazione delle ortofoto digitali nonché la generazione di modelli digitali del terreno densi.

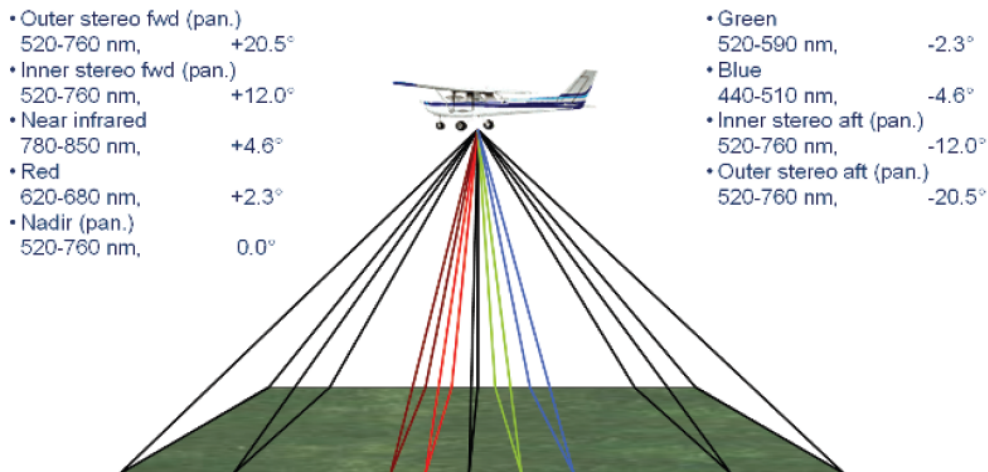


Figura 55 - Angoli di vista dei nove sensori CCD lineari della JAS 150

Il piano focale è composto da nove sensori **CCD** lineari integrati in tre moduli ricoperti da filtri differenti. L'utilizzo di un'ottica con lunghezza focale di 150 mm consente di ottenere risoluzioni geometriche longitudinali di 8,8 cm (con velocità di 70 m/s) e trasversali di 13,0 cm (ad una quota relativa di volo di 3000 m). L'utilizzo congiunto di strumentazione **GPS** e piattaforme inerziali consente di ottenere precisioni di georeferenziazione inferiori al pixel. Tali valori sono compatibili con una scala cartografica massima dei prodotti derivati ottenibili equivalente ad 1:1000.

Dal punto di vista del processamento dei dati acquisiti, è in fase di sviluppo un software proprietario denominato JenaStereo, che consentirà l'automatizzazione del flusso di lavoro. Vi è comunque piena compatibilità con il diffuso software fotogrammetrico SocetSet® per la gestione delle fasi di triangolazione aerea delle strisciate e successiva ortoproiezione e mosaicatura delle stesse.

Le caratteristiche tecniche principali sono riportate in Tabella 7.

Lunghezza focale	150 mm
Numero di array lineari CCD	9
Numero di pixel per ogni array	12000
Dimensione del pixel	6,5 µm
Risoluzione radiometrica	12 bit
Tempo di integrazione minimo	1.25 ms
Bande spettrali	
Pancromatico Nadir	520-760 nm a 0°
Pancromatico Forward/Backward stereo	520-760 nm a ± 20.5°
Pancromatico Forward/Backward fotogrammetrico	520-760 nm a ± 20.5°
Infrarosso vicino	780-850 nm a + 4.6°
Rosso	620-680 nm a + 2.3°
Verde	520-590 a - 2.3°
Blu	440-510 a - 4.6°
Risoluzione geometrica	
Across flight (quota di volo 3000 m)	0.13 m
Swath (quota di volo 3000 m)	1.6 km
Accuratezza	< 1 pixel
Periferiche	
Archiviazione su dischi rigidi	1,6 TB
Ridondanza	RAID 3
IMU	IGI AeroControlo® Applanix POS AV 510®
Dimensioni	
Peso [kg]	65

Tabella 7 - Caratteristiche del sensore JAS350

4.5.1.2.2.3 QUICKBIRD



QuickBird, lanciato il 18 Ottobre del 2001, è operativo dalla primavera del 2003, su un'orbita polare eliosincrona con 97,2° di inclinazione e con una velocità al suolo pari a 7,1 km/s. Come evidenziato in tabella è in grado di acquisire sia in modalità multispettrale (tre bande nel visibile ed una nell'infrarosso vicino) sia pancromatica, con risoluzione geometrica variabile tra 0.61 m e 0.66 m per angoli di acquisizione standard, cioè compresi tra 0° e 15°. Il satellite è in grado di effettuare acquisizioni stereoscopiche, caratteristica che tuttavia non viene ancora sfruttata dal punto di vista commer-

ciale. I dati QuickBird sono disponibili essenzialmente in due modalità: *Basic* e *Standard*, ai quali si aggiunge la disponibilità di prodotti ortorettificati. Il prodotto *Basic*, al quale sono applicate solo correzioni radiometriche, è basato sulla singola scena di circa $16.5 \times 16.5 \text{ km}^2$. La risoluzione geometrica al suolo è variabile, e dipende dall'angolo di acquisizione della scena come descritto in precedenza. Nel packaging (circa 1.6 Gb per scene panoramiche) sono forniti sia il file immagine non georeferito sia file ausiliari relativi a metadati, *Rational Polynomial Coefficients (RPC)*, effemeridi, calibrazione geometrica ed assetto angolare. Per la produzione di ortofoto, le informazioni fornite a corredo dell'immagine possono essere integrate con un **DTM** e con punti di controllo a terra, dalla cui accuratezza dipende la precisione del prodotto finale. Per le sue caratteristiche, il prodotto *Basic* è rivolto ad utenti in grado di effettuare un processamento avanzato dell'immagine dal punto di vista geometrico, in modo da ottenere la massima precisione nella georeferenziazione del dato. Il prodotto *Standard* differisce dal precedente in quanto ad esso vengono applicate correzioni geometriche volte all'inquadramento in un sistema di riferimento ed al ricampionamento del pixel ad una dimensione di 0.60 o 0.70 m. Il *packaging* comprende: il file immagine, i metadati, il file degli **RPC**. Questo tipo di prodotto può essere acquistato anche su una superficie complessiva minore della singola scena.

Altitudine dell'Orbita	450 km
Sensore pancromatico	Si
Sensore multispettrale	Si (4)
Swath (nadir)	16,5 km
Pushbroom	Sincrono
Dimensione Scena	272 km^2
Risoluzione geometrica pancromatico	0,61 m
Risoluzione geometrica multi-spettrale	2,44 m
Risoluzione radiometrica	11 bit per pixel
Angolo max di off-nadir	$0^\circ\text{-}25^\circ$
Periodo di Rivisitazione	2-5 giorni
Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)	21 US\$/ km^2
Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)	16 US\$/ km^2
Produttore	DigitalGlobe

Tabella 8 - Caratteristiche del sistema QuickBird

4.5.1.2.2.4 ORBVIEW-3



Lanciato il 26 giugno 2003, OrbView-3 è uno degli ultimi satelliti, dal punto di vista cronologico, ad affacciarsi nel panorama dell'alta risoluzione geometrica. Come i suoi predecessori acquisisce sia in modalità pancromatica sia in modalità multispettrale, con una risoluzione geometrica massima pari a 1 m. Le caratteristiche tecniche dettagliate sono riportate in

Tabella 9. I dati OrbView-3 sono disponibili attualmente in due modalità: OrbView BASIC™ and OrbView ORTHO™.



Altitudine dell'Orbita	470 km
Sensore pancromatico	Si
Sensore multispettrale	Si (4)
Swath (nadir)	8,0 km
Pushbroom	Sincrono
Dimensione Scena	64 km ²
Risoluzione geometrica pancromatico	1 m
Risoluzione geometrica multispettrale	4 m
Risoluzione radiometrica	11 bit/pixel
Angolo max di off-nadir	50°
Periodo di Rivisitazione	1-3 giorni
Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)	10 US \$/km ²
Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)	Non ancora presente
Produttore	Orbimage
Distributore	Orbimage

Tabella 9 - Caratteristiche del sistema OrbView-3

L'accuratezza di posizionamento planimetrico massima dichiarata è in entrambi i casi pari a 12 m. È imminente la commercializzazione di ulteriori prodotti a valore aggiunto quali OrbView DEM™, OrbView DSM™, OrbView Thematic Map™ e OrbView Feature Map™. I primi due prodotti forniscono informazioni di tipo altimetrico, il terzo è un indice differenziale di vegetazione normalizzato (NDVI) e l'ultimo è una restituzione vettoriale di entità cartografiche effettuata a partire dal dato ortoproiettato.

4.5.1.2.2.5 TERRA ASTER

Tale sensore, montato anche a bordo del satellite Acqua, acquisisce immagini multispettrali a 15 bande in un range spettrale compreso tra i 0.556 μm (visibile, banda del verde) e gli 11.32 μm (infrarosso termico).

Lo strumento si compone di 3 telescopi separati, ognuno dei quali caratterizzato da differenti risoluzioni geometriche e sensibilità spettrali, come specificato nel seguito:

- **VNIR** (*Visible and Near-InfraRed* – Visibile e infrarosso vicino) con 3 bande a risoluzione pari a 15 m, dotato di un telescopio addizionale per l'acquisizione "all'indietro" (*backward*) nella banda dell'infrarosso vicino (banda 3B), grazie al quale vengono generate coppie stereoscopiche. Le immagini acquisite in queste lunghezze d'onda, oltre ad essere utili per le applicazioni a media risoluzione geometrica risultano idonee per studi vegetazionali;
- **SWIR** (*Short-Wave InfraRed* – infrarossi medi) con 6 bande a risoluzione pari a 30 m fornisce immagini la cui elaborazione permette di effettuare mappature mineralogiche della superficie terrestre, nonché studi climatologici (in particolare per la distinzione tra nubi e neve);



- **TIR** (*Thermal InfraRed* – infrarosso termico) con 5 bande a risoluzione pari a 90 m è utilizzato in tutte le applicazioni che richiedono un'analisi termica della superficie osservata, attraverso lo studio degli spettri di emissività.

Altitudine dell'Orbita	705 km
Sensore pancromatico	Si
Sensore multispettrale	Si (14 di cui 5 nel IR termico)
Swath (nadir)	60 km
Pushbroom	Sincrono
Dimensione Scena	3600 km ²
Risoluzione geometrica pancromatico	15 m
Risoluzione geometrica multi-spettrale	15m - 30 m 90 m (termico)
Risoluzione radiometrica	8 bit per pixel (12 nel IR termico)
Angolo max di off-nadir	0°-25°
Periodo di Rivisitazione	2-5 giorni
Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)	Disponibili solo per progetti di ricerca
Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)	80\$/scena
Produttore	NASA METI ERSDAC
Distributore	Eos data gateway

Tabella 10 - Caratteristiche del sistema ASTER

Queste ed altre caratteristiche tecniche della piattaforma sono sintetizzate nella Tabella 10.

I tre sistemi che compongono ASTER possono operare in modo indipendente l'uno dall'altro oppure venire utilizzati congiuntamente e con differenti impostazioni. Sono infatti previste delle modalità operative standard: il modello *daytime* (acquisizione di giorno) prevede che tutti e tre i telescopi acquisiscano in contemporanea la stessa scena di 60 km di ampiezza; la modalità *night-time* (acquisizione di notte) prevede invece il solo utilizzo del sensore **TIR**, in quanto è l'unico sensore passivo che può fare a meno della riflessione della luce solare per l'acquisizione. Per l'osservazione nell'infrarosso termico degli oceani sono predisposte acquisizioni diurne nella banda **TIR**, mentre quelle notturne analoghe mirate al monitoraggio dei vulcani prevedono anche l'utilizzo di strumenti **SWIR**.

Lo strumento **VNIR** (vedi Figura 56) è formato da due telescopi indipendenti assemblati per minimizzare la distorsione dell'immagine tra il telescopio *backward* e quello *nadir*. Ognuna delle bande ha un dispositivo di acquisizione formato da 5000 elementi **CCD**, di cui sono in uso solo 4000 alla volta. Esiste un intervallo di tempo tra l'acquisizione dell'immagine *backward* e quella nadirale, durante il quale la rotazione terrestre causa lo spostamento del centro di acquisizione. Il sistema **VNIR** estrae automaticamente i 4000 pixel corretti basandosi sulle informazioni relative alla posizione orbitale (effemeridi) fornite dalla piattaforma.

Il piano focale del telescopio *backward* contiene solo un singolo *array* **CCD** ed utilizza un filtro di interferenza per la discriminazione della lunghezza d'onda incidente. Il piano focale del telescopio nadirale contiene invece 3 *array* lineari ed usa un prisma e filtri di interferenza per la separazione spettrale, permettendo alle tre bande di inquadrare simultaneamente la stessa area

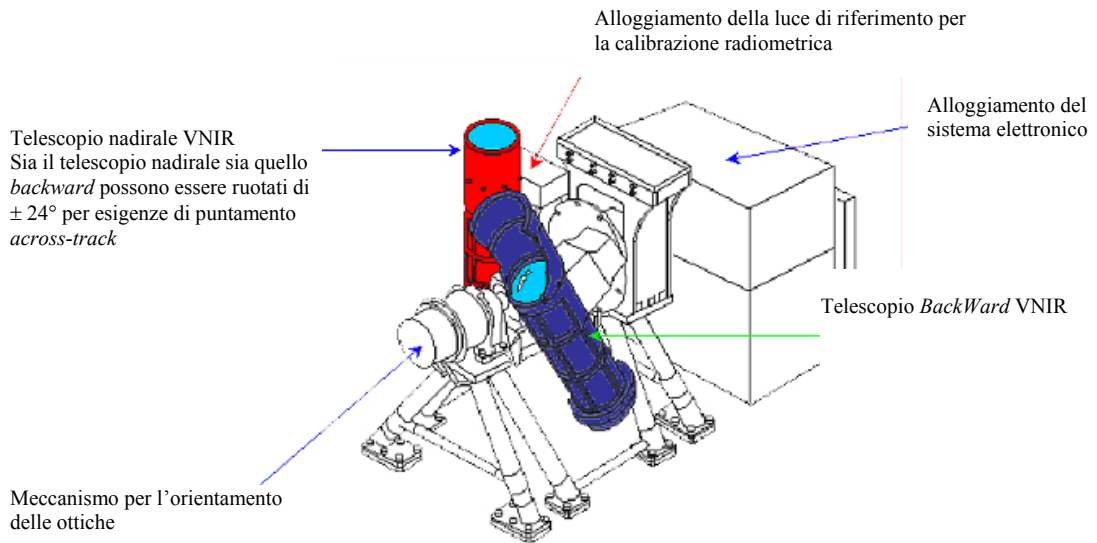


Figura 56 - Elementi principali del sottosistema VNIR del sensore Aster.

4.5.1.2.2.6 FORMOSAT-2



Lanciato in orbita il 21 maggio 2004, questo satellite è caratterizzato da un tempo di rivisitazione di un giorno che lo rende unico nel campo dell'alta risoluzione satellitare. Le immagini (pancromatiche e multispettrali) sono infatti acquisite alla stessa ora e con lo stesso angolo di vista. Tale caratteristica consente di minimizzare i cambiamenti di illuminazione e di presenza di ombre fra acquisizioni successive, con evidenti vantaggi in fase di elaborazione di immagini multitemporali.

L'ora locale di passaggio all'equatore, antecedente di un'ora rispetto alle altre piattaforme satellitari operanti in tale ambito, consente di aumentare le probabilità di acquisire immagini prive di copertura nuvolosa nelle zone equatoriali.

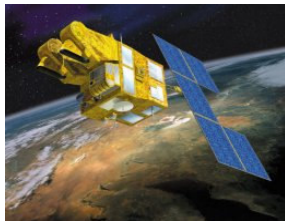
Queste caratteristiche, congiuntamente all'elevata risoluzione geometrica, rendono le immagini Formosat-2 ideali per scopi di *change detection* e per il monitoraggio di eventi calamitosi quali le alluvioni.

Altitudine dell'Orbita	891 km
Sensore pancromatico	Si
Sensore multispettrale	Si (4)
Swath (nadir)	24 km
Pushbroom	
Dimensione Scena	576 km ²
Risoluzione geometrica pancromatico	2 m
Risoluzione geometrica multispet-	8 m

trale	
Risoluzione radiometrica	8 bit/pixel
Angolo max di off-nadir	45°
Periodo di Rivisitazione	1 giorno
Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)	2800 €/scena
Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)	N/A
Produttore	NSPO
Distributore	Spotimage

Tabella 11 - Caratteristiche del sistema FORMOSAT-2

4.5.1.2.2.7 SPOT-5



Il satellite SPOT 5, lanciato il 4 maggio 2002, è operativo dal 16 luglio 2002. Esso continua la missione dei precedenti satelliti SPOT (1÷4), lanciati a partire dal 1986 e tuttora in orbita, ma monta a bordo strumenti tecnologicamente innovativi, come il **HRG** (*High Resolution Geometric*) e il **HRS** (*High Resolution Stereoscopic*). La risoluzione geometrica dei dati del satellite Spot 5 è fino a quattro volte maggiore di quella dei dati SPOT precedenti (5 m nel pancromatico e 10 m del multispettrale, invece di 20 m) mentre la dimensione delle immagini è la stessa: 60 km x 60 km, oppure 60 km x 120 km quando sono usati i due strumenti **HRG** di cui il satellite dispone. L'accuratezza di posizionamento planimetrico, senza punti di controllo, è superiore ai 50 metri, contro i 350 metri dei satelliti delle missioni precedenti. Questi miglioramenti risultano particolarmente vantaggiosi per le applicazioni che richiedano scale di riferimento da 1:25.000 a 1:10.000.

Altitudine dell'Orbita	832 km
Sensore pancromatico	Si
Sensore multispettrale	Si (4)
Swath (nadir)	60 km
Pushbroom	Sincrono
Dimensione Scena	3600 km ²
Risoluzione geometrica pancromatico	5 m (2,5 supermode)
Risoluzione geometrica multispettrale	10 m
Risoluzione radiometrica	8 bit/pixel
Angolo max di off-nadir	31°
Periodo di Rivisitazione	1 giorno
Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)	0,98 €/ km ²
Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)	0,75 €/km ²
Produttore	Spotimage
Distributore	Telespazio

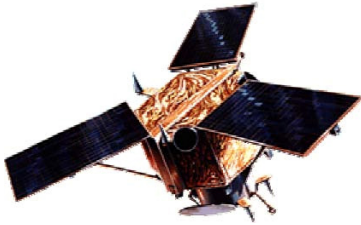
Tabella 12 - Caratteristiche del sistema SPOT-5

Grazie al nuovo strumento **HRS** a bordo della piattaforma SPOT 5, sono inoltre possibili, solamente per la produzione di modelli digitali del terreno, acquisizioni simultanee di stereocoppie con uno *swath* eccezionalmente ampio (600 km x 120 km). Questi prodotti offrono un'eccellente accuratezza senza punti di controllo, dell'ordine di 10 metri in altezza e di 15 m in planimetria.

La modalità pancromatica è caratterizzata da una risoluzione a terra di 5 m (2.5 m in modalità SUPERMODE) e una radiazione misurata in banda unica nello spettro elettromagnetico corrispondente al visibile, con esclusione del blu (0.51-0.73 μm).

La modalità multispettrale è caratterizzata da risoluzione a terra di 10 m (la banda 4, relativa all'infrarosso medio, ha una risoluzione effettiva di 20 m, ma viene fornita ricampionata a 10 m, per uniformità con le rimanenti tre bande) e uno spettro di radiazione osservata di 4 bande spettrali (corrispondenti al verde, rosso, infrarosso vicino e infrarosso medio dello spettro elettromagnetico).

4.5.1.2.2.8 IKONOS



Il satellite IKONOS, in orbita dal settembre 1999 e operativo dall'inizio del 2000, è stata la prima piattaforma ad acquisire immagini ad alta risoluzione. Come evidenziato in

Tabella 13 esso è dotato di un sensore pancromatico ed uno multispettrale: il primo ha una risoluzione geometrica al suolo di 0.82 m ad 11 bit e acquisisce nella banda spettrale dei 0.45-0.90 μm ; il sensore multispettrale ha invece una risoluzione geometrica al suolo di 3.2 m e 4 bande ad 11 bit (3 nel visibile ed 1 nell'infrarosso vicino). I prodotti IKONOS sono distribuiti in tre diverse modalità: GEO, STEREO ed ORTHO.

Altitudine dell'Orbita	681 km
Sensore pancromatico	Si
Sensore multispettrale	Si (4)
Swath (nadir)	11 km
Pushbroom	Sincrono
Dimensione Scena	120 km ²
Risoluzione geometrica pancromatica	0,82 m
Risoluzione geometrica multispettrale	3,2 m
Risoluzione radiometrica	8/11 bit/pixel
Angolo max di off-nadir	26°
Periodo di Rivisitazione	1-14 giorni
Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)	N/A (richiedere preventivo)
Prezzo per immagini da archivio (pancromatico prodotto base)	Circa 35\$/km ² (richiedere preventivo)
Produttore	Space Imaging
Distributore	EUSI, Planetek

Tabella 13 - Caratteristiche del sistema IKONOS

I prodotti GEO rappresentano il livello più elementare di elaborazione, con una correzione geometrica preliminare effettuata utilizzando i dati di posizionamento e assetto della piattaforma ed una successiva georeferenziazione per uniformarla alla proiezione cartografica assegnata; il livello standard di accuratezza è di 25 m. Possono essere distribuiti in diverse opzioni: come dato pancromatico, come multispettrale o come *pan sharpened* (iniezione dell'informazione radiometrica del multispettrale alla banda del pancromatico alla massima risoluzione geometrica). I prodotti STEREO sono ottenuti da stereocoppie acquisite nello stesso passaggio orbitale, minimizzando così le variazioni di luminosità. Sono distribuiti in due differenti livelli di accuratezza: *Standard* con 12 m di accuratezza orizzontale e 13 m verticale; *Precision* con 1 m di accuratezza orizzontale e 2 m verticale. Il processo di ortorettifica caratteristico delle immagini ORTHO corregge le distorsioni causate dalla geometria dell'acquisizione e dalla variabilità del suolo, utilizzando modelli digitali del terreno e punti di controllo al suolo. Essendo IKONOS operativo già da tre anni, è possibile disporre di un consistente archivio di immagini.

4.5.1.2.2.9 EROS A1 – B



Di proprietà di ImageSat International Ltd, Eros A1 è il primo dei 6 satelliti che costituiranno la costellazione di piattaforme operative tale da garantire un tempo di rivisitazione dello stesso sito di due satelliti al giorno. I satelliti EROS sono caratterizzati da un'elevata manovrabilità grazie al ridotto peso, circa 250 kg al momento del lancio (5 dicembre 2000), e possono quindi essere orientati e stabilizzati in breve tempo sul sito di

interesse a partire da una ripresa nadirale fino a raggiungere un angolo di assetto massimo pari a 45° con azimuth selezionabile nei 360°. La capacità di osservazione off-nadir permette con il solo satellite attualmente in orbita di osservare qualsiasi sito sulla superficie terrestre nel raggio di copertura delle stazioni riceventi a terra con una frequenza di circa tre volte per settimana.

Il satellite Eros B, lanciato il 26 aprile 2006, è equipaggiato sia con sensori pancromatici sia multispettrali, con risoluzione radiometrica a 10 bit e risoluzione geometrica di 0.69 m nel pancromatico e 2.76 m nel multispettrale. In

Tabella 14 vengono riportate sinteticamente le principali caratteristiche delle due piattaforme in esame (relativamente ad Eros B non sono ancora disponibili tutte le caratteristiche tecniche della piattaforma e delle immagini).

	EROS A1	EROS B
Altitudine dell'orbita	480 km	500 km
Sensore pancromatico	Si	Si
Sensore multispettrale	No	Si
Swath (nadir)	13,5 km	7 km
Pushbroom	Asincrono	N/A
Dimensione Scena	169 km ²	49 km ²
Risoluzione geometrica pancromatico	1 m	0,69 m
Risoluzione geometrica multispettrale	N/A	2,76 m
Risoluzione radiometrica	11 bit/pixel	10 bit/pixel
Angolo max di off-nadir	45°	N/A
Periodo di Rivisitazione	1-7 giorni	N/A
Prezzo per nuove acquisizioni (pancromatico prodotto base)	10 US \$/km ²	N/A
Prezzo per immagini da archivio	5 US \$/km ²	N/A

(pancromatico prodotto base)		
Produttore	ImageSat	ImageSat
Distributore italiano	IPT	N/A

Tabella 14 - Caratteristiche dei sistemi EROS

4.5.1.2.2.10 Le camere HRSC

La camera HRSC-AX deriva dalla camera HRSC (*High resolution Stereo Camera*) che fu originariamente realizzata per la missione su Marte progettata all'Istituto di Esplorazioni Planetarie del German Space Centre di Berlino-Adlershof.

La camera HRSC-AX, che è dotata di dispositivo **GPS/IMU** dell'Applanix, è visibile in Figura 57. Essa ha un obiettivo di 150 mm di focale che proietta l'immagine sul piano focale dove sono posizionati 9 sensori, di cui cinque destinati a raccogliere l'immagine pancromatica, tre le bande **RGB** e uno la banda dell'**IR**. I filtri che operano la separazione della luce nelle diverse bande spettrali sono applicati direttamente sui fotodiodi. Ciascun sensore lineare è costituito da 12.172 pixel con lato di 6.5 μm . La risoluzione radiometrica è di 12 bit.

La posizione dei sensori è illustrata nella Figura 57; nella stessa figura è illustrata la situazione dei campi abbracciati trasversalmente e nella direzione di volo; come si vede l'angolo di massima stereoscopia è molto buono, mentre la larghezza della strisciata è decisamente inferiore a quella che si può ottenere con una camera tradizionale

Grazie alla ridotta dimensione del pixel ed alla notevole focale dell'obiettivo risulta un **GSD** pari a 8,6 cm ad una quota relativa di volo di 2000 m. Recentemente è stata introdotta sul mercato una nuova versione della camera HRSC-AX, denominata HRSC-AXW, dove la W aggiunta sta per *wide angle*. Mentre la camera HRSC-AX viene proposta per la realizzazione di **DTM** di precisione e di ortofoto di precisione o comunque per fotogrammetria di precisione, la camera HRSC-AXW è rivolta all'uso fotogrammetrico tradizionale. Essa è dotata di un obiettivo di 46 mm di focale, quindi notevolmente più corto della HRSC-AX e inoltre è dotata di soli cinque sensori lineari: tre pancromatici in posizione *Forward*, *Nadir* e *Backward* a cui si aggiungono due sensori nella banda del verde e del rosso per la creazione di immagini multispettrali.

L'angolo di campo trasversale abbracciato è di 80° che a 2000 m di quota relativa produce una strisciata di larghezza di 3360 m, che risulta quindi superiore, anche se di non molto, a quella media di una camera tradizionale. A 2000 m di quota relativa di volo il GSD della HRSC-AXW è di 28 cm. La frequenza di scansione di entrambe le camere è molto elevata, pari a 1640 linee al secondo.

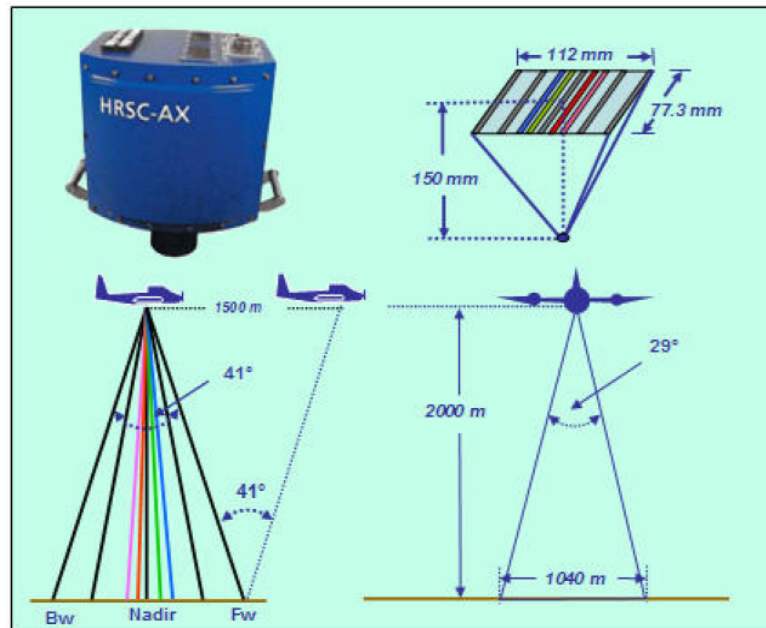


Figura 57 - Camera HRSC-AX e principali parametri tecnici

4.5.1.2.2.11 La camera STARIMAGER TLS (Three Line Scanner) della STARLABO CORPORATION

La camera Starimager è stata concepita per uso da elicottero. Come si vede dalla Figura 58 essa viene montata all'esterno del velivolo agganciata ad una apposita piattaforma stabilizzatrice antivibrazione; la camera è dotata di strumentazione GPS/IMU.

La camera ha un obiettivo di 60 mm che proietta l'immagine sul piano dove sono posizionati tre sensori trilineari **RGB** in posizione *Forward*, *Nadir* e *Backward* e un sensore per l'**IR**. I sensori sono composti da 14.400 pixel di 5 μm di lato. La dimensione fisica del sensore è pertanto di 72 mm. La risoluzione radiometrica è di 9 bit. L'angolo tra le visuali *Forward*, *Nadir* e *Backward* è indicata nella Figura 59 che presenta le caratteristiche di abbracciamento della camera.

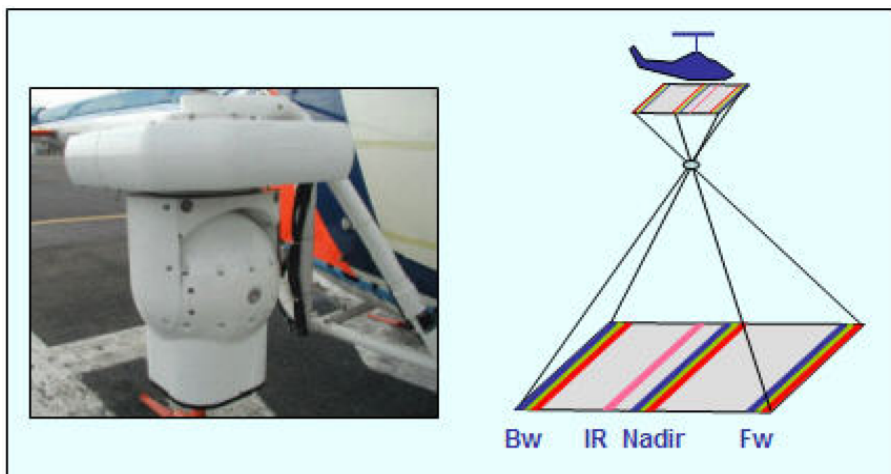


Figura 58 - Camera Starimager TLS e configurazione del piano focale

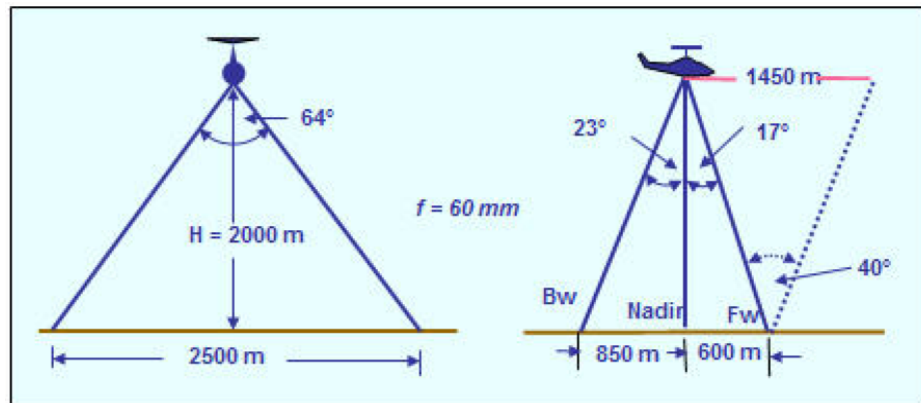


Figura 59 - Parametri geometrici di presa della Starimager TLS (quota di volo di 2000 m)

In virtù della corta focale e dell'elevato numero di pixel per linea si ha un buon angolo di campo trasversale e un buon angolo di massima stereoscopia. Anche il GSD ha un buon valore pari a 16 cm. L'acquisizione massima è di 500 linee/s, valore non molto alto, ma che non pregiudica l'efficienza della camera che è appunto studiata per essere usata da elicottero e quindi a velocità del mezzo aereo non elevate.

4.6 Algoritmi di base della fotogrammetria analitica

I paragrafi seguenti offrono una panoramica semplice ma esaustiva sulle basi analitiche della fotogrammetria che consentono di apprendere i meccanismi di calcolo della tecnica fotogrammetrica e una più approfondita comprensione degli aspetti pratici legati alla valutazione delle precisioni, delle potenzialità e delle applicazioni di tale tecnica.

4.6.1 La rototraslazione piana

Si consideri un punto $P(x,y)$ in un sistema di coordinate $[O;x,y]$ ruotato di un angolo α rispetto al sistema di coordinate $[O;X,Y]$. Si vogliono determinare le coordinate X e Y di P in quest'ultimo sistema:

$$\begin{aligned} X &= x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ Y &= x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

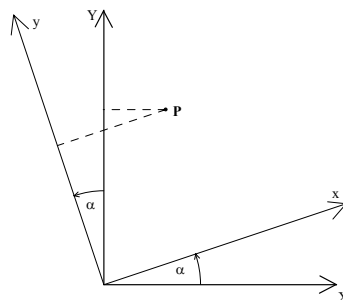


Figura 60 - Rotazione nel piano

Se si introducono i coseni direttori degli assi x,y rispetto al sistema $[O;X,Y]$ e si riscrivono le equazioni (13) in forma matriciale, risulta:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(xX) & \cos(yX) \\ \cos(xY) & \cos(yY) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (14)$$

che, a sua volta, può essere scritta in forma compatta (con i simboli dei vettori e delle matrici in grassetto):

$$X = R x \quad \text{con} \quad R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{pmatrix} \quad (15)$$

R è detta matrice di rotazione. Essa è una matrice quadrata, ma non simmetrica, che contiene i coseni direttori degli assi coordinati x,y rispetto al sistema $[O;X,Y]$.

Inoltre, esiste una importante proprietà sull'inversione della matrice di rotazione. Per definizione, moltiplicando la matrice inversa R^{-1} per la matrice R , si ottiene la matrice unitaria I :

$$R^{-1} R = I \quad (16)$$

Poiché, d'altra parte, anche moltiplicando la matrice trasposta R^T per la R si ottiene la matrice unitaria I :

$$\begin{pmatrix} i^T \\ j^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i & j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i^T i & i^T j \\ j^T i & j^T j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

ne segue l'importante proprietà delle matrici di rotazione:

$$R^{-1} = R^T \quad (18)$$

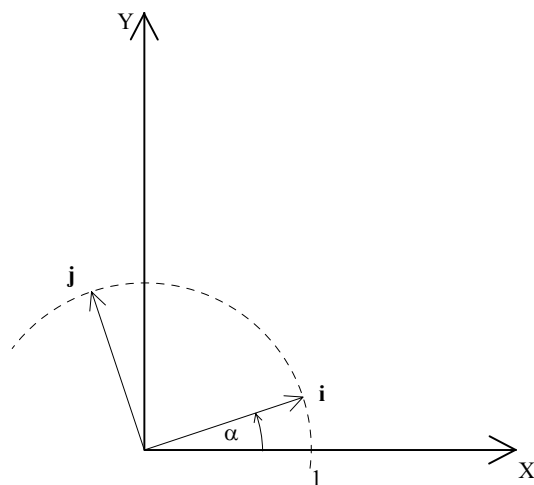


Figura 61 - Introduzione dei vettori unitari (versori)



Per quanto riguarda la trasformazione inversa, i punti riferiti al sistema XY possono essere trasformati nel sistema [O;x,y], come segue.

Dalla (15), moltiplicando per R^T , risulta:

$$R^T X = R^T R x = I x = x \quad (19)$$

da cui la formula risolutiva:

$$x = R^T X = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} \\ r_{12} & r_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (20)$$

4.6.2 La rototraslazione spaziale

Le equazioni viste in 4.6.1 possono essere estese alla trasformazione di un punto $P(x,y,z)$ in un sistema [O;X,Y,Z], utilizzando i coseni direttori degli assi coordinati:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(xX) & \cos(yX) & \cos(zX) \\ \cos(xY) & \cos(yY) & \cos(zY) \\ \cos(xZ) & \cos(yZ) & \cos(zZ) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (21)$$

ossia:

$$X = R x \quad \text{con} \quad R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (22)$$

Introduciamo i tre versori i, j, k (vedi Figura 62) che danno luogo, in analogia con quanto descritto in 4.6.1, alla matrice $R = (i, j, k)$.

Una rotazione nello spazio è definita da tre parametri indipendenti. In fotogrammetria si adottano, di solito, i tre angoli ω, ϕ e κ di rotazione intorno ai tre assi coordinati. Bisogna avere ben chiara in mente la sequenza delle rotazioni, come risultano dall'esame di un giunto cardanico (vedi Figura 63):

- ω = primaria (x = asse primario)
- ϕ = secondaria (y = asse secondario)
- κ = terziaria (z = asse terziario)

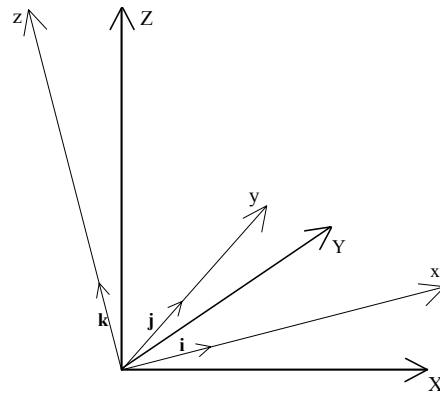


Figura 62 - Rotazioni spaziali

Se si applica una rotazione ω intorno all'asse x , le direzioni degli altri due assi cambiano. Invece, se si ruota dell'angolo ϕ intorno a y , si muove solo l'asse z , e non l'asse x . Una rotazione κ intorno all'asse z non determina nessun movimento negli altri due assi. La rotazione arbitraria del sistema x,y,z può quindi considerarsi come il risultato complessivo delle tre rotazioni ω , ϕ e κ suddette, ciascuna considerata positiva se eseguita in senso antiorario, quando si guarda in direzione dell'asse corrispondente, verso l'origine delle coordinate (vedi Figura 64).

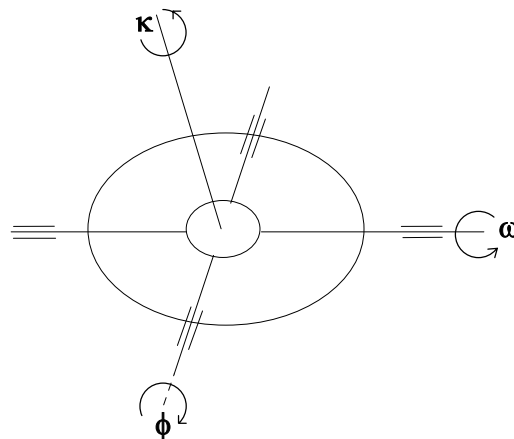


Figura 63 - Rotazioni attorno agli assi di un sistema cardanico

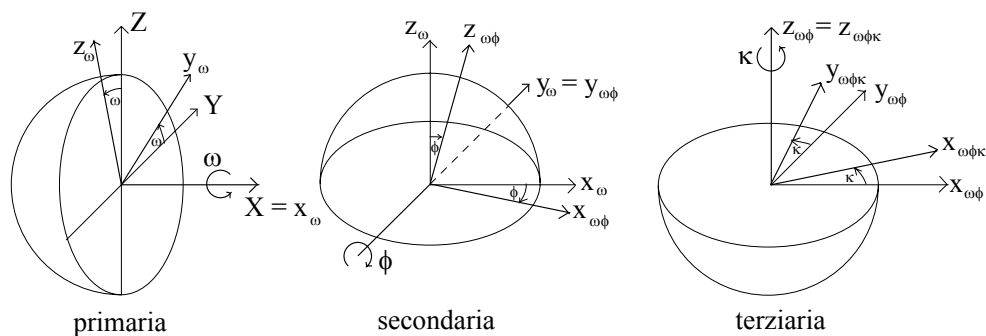


Figura 64 - Sequenza delle tre rotazioni di un sistema di coordinate

Un punto P nel sistema $[O;x,y,z]$ può quindi trasformarsi nel sistema $[O;X,Y,Z]$ mediante le rotazioni ω , ϕ e κ . La matrice di rotazione spaziale R dell'equazione di trasformazione assume la seguente forma:

$$\mathbf{R}_{\omega\phi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\kappa & -\cos\phi \sin\kappa & \sin\phi \\ \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\phi \sin\kappa & -\sin\omega \cos\phi \\ \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\phi \end{pmatrix} \quad (23)$$

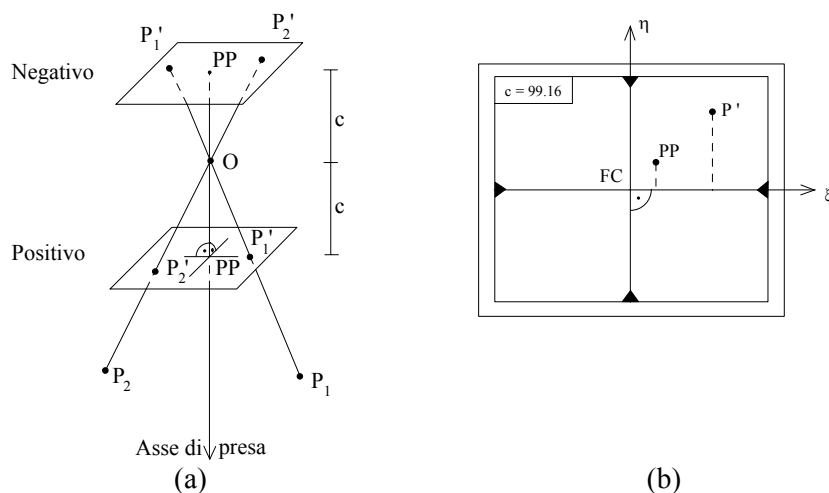
Se la sequenza delle rotazioni è diversa da quella descritta, gli elementi della matrice di rotazione cambiano in conformità. In conseguenza delle condizioni di ortogonalità, l'inversa \mathbf{R}^{-1} della matrice di rotazione spaziale \mathbf{R} è uguale alla trasposta \mathbf{R}^T , come descritto in 4.6.1.

Per riassumere, possiamo interpretare gli elementi r_{ik} della matrice di rotazione spaziale \mathbf{R} in tre modi diversi:

- coseni direttori degli assi del sistema $[O;x,y,z]$ rispetto a $[O;X,Y,Z]$;
- componenti dei vettori unitari del sistema di coordinate ruotato, rispetto a quello principale;
- funzioni trigonometriche delle rotazioni intorno ai tre assi di un sistema cardanico.

4.6.3 Le equazioni di collinearità

Per ricostruire la posizione e la forma degli oggetti a partire da fotografie, dobbiamo conoscere le relazioni geometriche in base a cui si sono formate le immagini. Le camere usate in fotogrammetria producono fotografie (dette fotogrammi, per indicare che esse sono adatte a misure di precisione) che, con sufficiente approssimazione, possono essere considerate prospettive centrali, geometricamente rigorose, dell'oggetto fotografato. Nella Figura 65 sono illustrate alcune definizioni.



- O** Centro di proiezione (o "punto di presa")
- PP** Punto principale, di coordinate ξ_0, η_0
- c** Distanza principale (o "costante della camera")
- FC** Centro fiduciale (intersezione fra rette che uniscono marche fiduciali opposte)

Figura 65 - Fotogramma nella posizione negativa e positiva (a) e schema del fotogramma (b)

Le relazioni fra le coordinate ξ e η^7 di un punto immagine \mathbf{P}' e le X, Y, Z del corrispondente punto oggetto \mathbf{P} sono mostrate in Figura 66 ed espresse dalle equazioni seguenti:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (24)$$

I parametri r_{ik} sono gli elementi della matrice di rotazione spaziale \mathbf{R} , che in questo caso indica l'assetto spaziale del fotogramma relativo al sistema di coordinate oggetto $[O; X, Y, Z]$. Gli elementi r_{ik} possono essere espressi in funzione delle tre rotazioni ω , ϕ e κ , come abbiamo visto in 4.6.2.

Queste equazioni dimostrano analiticamente quanto già affermato in 4.2, e cioè che ad ogni punto oggetto corrisponde un punto immagine e che, invece a causa della presenza delle Z al secondo membro, per ogni punto immagine esistono infiniti possibili punti oggetto. E' quindi impossibile ricostruire la geometria spaziale di un oggetto a partire da un solo fotogramma. E' necessario disporre o di un secondo fotogramma dello stesso oggetto, o di ulteriori informazioni sulle coordinate Z (per es.: tutti i punti oggetto giacciono su un piano orizzontale di quota nota).

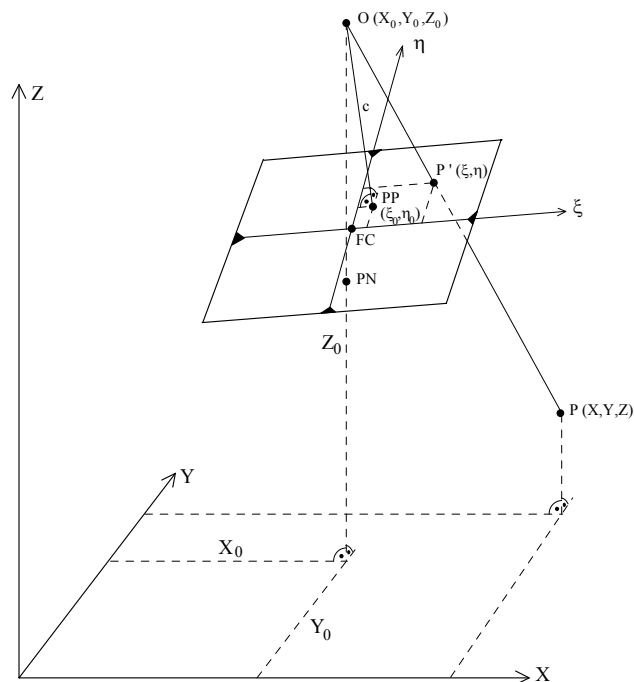


Figura 66 - Relazione fra le coordinate di punti immagine

Ricavando le coordinate oggetto X e Y , si ottiene:

⁷ Notare la simbologia adottata nel testo:

ξ, η = coordinate immagine (bi-dimensionali)

x, y, z = coordinate in un sistema locale, o "coordinate-modello" (bi- o tridimensionali)

X, Y, Z = coordinate nel sistema-oggetto o "coordinate-terreno", spesso nel sistema cartografico nazionale (bi- o tri-dimensionali)



$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \end{aligned} \quad (25)$$

4.6.4 I parametri di orientamento interno ed esterno di un fotogramma

Le equazioni di collinearità (4.6.3) richiedono la conoscenza delle seguenti variabili indipendenti (parametri di orientamento).

- ξ_0, η_0 coordinate immagine del punto principale PP
- c distanza principale.

Questi tre elementi sono i parametri di orientamento interno. Essi definiscono la posizione del centro di proiezione relativamente al piano dell'immagine.

- X_0, Y_0, Z_0 coordinate oggetto del punto di presa
- ω, ϕ, κ (o altri) 3 angoli di rotazione del fotogramma

Questi sei elementi sono i parametri di orientamento esterno. Essi definiscono la posizione e l'assetto della camera nel sistema di coordinate oggetto.

La definizione della prospettiva centrale, rappresentata da un fotogramma, richiede in totale nove parametri, che si possono determinare in molti modi. Nei limiti della nostra trattazione quelli dell'orientamento interno sono costanti, caratteristici della particolare camera, e vengono determinati dal costruttore con misure di laboratorio ("calibrazione della camera") e comunicati mediante un certificato di calibrazione.

I sei parametri di orientamento esterno possono essere determinati con metodi topografici, se le condizioni lo permettono.

In fotogrammetria aerea, fino a qualche tempo fa non era possibile raggiungere in questo modo una precisione sufficiente, e pertanto era necessario ricorrere ad un metodo indiretto, usando punti di coordinate note nel sistema oggetto (i punti d'appoggio).

4.6.5 Il certificato di calibrazione delle camere fotogrammetriche

Il certificato di calibrazione di una camera fotogrammetrica contiene le seguenti informazioni sull'orientamento interno:

- le coordinate immagine delle marche fiduciali;
- nello stesso sistema, le coordinate di PPA, PBS;
- la distanza principale c ;
- la curva di distorsione radiale residua;
- la data della calibrazione;
- informazioni sulla risoluzione dell'immagine.

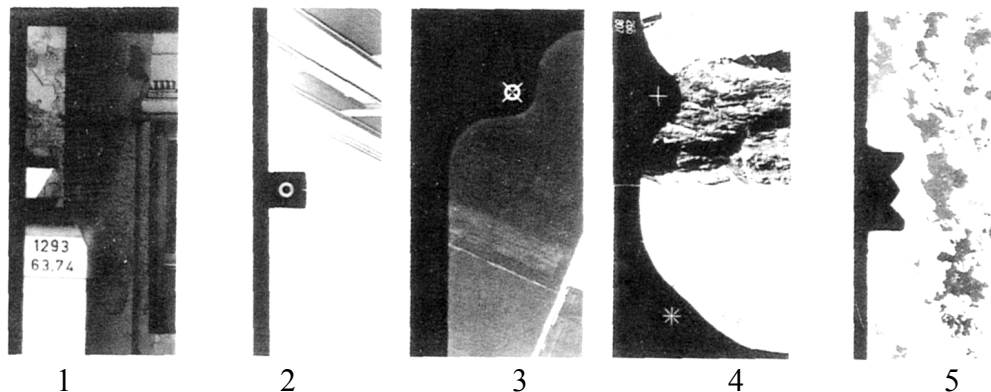


Figura 67 - Vari tipi di marca fiduciale Wild C120 (1), Jena UMK 10/1318 (2), Wild RC20 (3), Jena LMK 2000 (4), Zeiss RMK (5)

Le camere fotogrammetriche dovrebbero essere ricalibrate ad intervalli regolari, ad esempio ogni anno⁸. Una camera aerea è molto pesante e pertanto può subire lievi danni per urti durante il trasporto o il montaggio sull'aereo. Inoltre essa è sottoposta a forti sbalzi di temperatura. Fra la temperatura al suolo e quella all'esterno di un aereo che vola ad una quota, ad esempio, di 7000 m, ci può essere una differenza fino a 50°C. Essa si verifica, per la camera, nel tempo relativamente breve di circa un'ora. Filtri, obiettivo e la camera stessa si trovano allora ad una temperatura completamente diversa da quella in cui è stata fatta la calibrazione. Per particolari lavori di alta precisione, è opportuno scattare alcuni fotogrammi di calibrazione, prima e/o dopo i fotogrammi normali, alle stesse condizioni del volo da effettuare, al di sopra di un'area-test in cui siano stati pre-segnalizzati alcuni punti noti.

4.6.6 Stima indiretta dei parametri di orientamento esterno

Le procedure di orientamento esterno sono necessarie per determinare i parametri di orientamento esterno (posizione del centro di presa X_0 , Y_0 , Z_0 , e assetto angolare ω , ϕ , κ) dei fotogrammi, o delle porzioni di esso considerabili come unica prospettiva centrale, utilizzati per la descrizione dell'oggetto. L'approccio comunemente utilizzato, nel caso in cui non si utilizzino tecniche dirette prevede l'uso di punti d'appoggio, ovvero di punti fotografici (visibili sui fotogrammi) di coordinate note (rilevate mediante tecniche topografiche come GPS o stazioni totali).

4.6.6.1 Orientamento di immagini a prospettiva centrale unica

Nel caso in cui si disponga di immagini geometricamente assimilabili ad un'unica prospettiva centrale è possibile prevedere 3 differenti procedure di orientamento:

- l'orientamento di singole immagini, qualora sia necessario definire i parametri di orientamento esterno di una sola immagine;
- l'orientamento di una coppia di fotogrammi, qualora sia necessario effettuare una restituzione dell'oggetto o la definizione della sua geometria tridimensionale (ad es. per la generazione di un DTM), nel caso in cui l'oggetto abbia dimensioni limitate in funzione della scala del fotogramma;

⁸ In Italia, molti capitolati tecnici per lavori fotogrammetrici esigono che il certificato di calibrazione sia più recente di 2-3 anni. E' importante pretendere che questa norma sia rispettata, anche se l'operazione di calibrazione è assai onerosa per la Ditta che la effettua: oltre ai costi derivanti dall'immobilizzo della camera per qualche mese (la calibrazione e la revisione vanno eseguite presso le Case costruttrici, all'estero), la spesa viva è di qualche decina di milioni (N.d.T.)

- l'orientamento di un blocco di fotogrammi qualora sia necessario effettuare una restituzione dell'oggetto o la definizione della sua geometria tridimensionale (ad es. per la generazione di un **DTM**), nel caso in cui l'oggetto non può essere contenuto in una sola coppia stereoscopica in funzione della precisione che si vuole ottenere.

4.6.6.1.1 Orientamento di immagini singole

Per questa procedura, sono necessari almeno tre punti d'appoggio in ciascun fotogramma. Tali punti sono noti nelle coordinate oggetto (X_i, Y_i, Z_i) e sono stati osservati mediante restitutore determinandone le coordinate immagine (ξ_i, η_i) con $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n = numero di punti d'appoggio utilizzati).

In tal caso, si possono scrivere due equazioni di collinearità per ogni punto d'appoggio utilizzato (almeno sei con 3 punti d'appoggio) nelle sei incognite sottolineate:

$$\begin{aligned} \xi_i &= f(\underline{\xi}_0, c, \underline{X}_0, \underline{Y}_0, \underline{Z}_0, \underline{\omega}, \underline{\phi}, \underline{\kappa}, X_i, Y_i, Z_i) \\ \eta_i &= f(\underline{\eta}_0, c, \underline{X}_0, \underline{Y}_0, \underline{Z}_0, \underline{\omega}, \underline{\phi}, \underline{\kappa}, X_i, Y_i, Z_i) \end{aligned} \quad (26)$$

Si possono risolvere queste sei equazioni, dopo averle linearizzate mediante l'introduzione di valori approssimati delle incognite. Questa procedura presenta i seguenti inconvenienti, illustrati dalla Figura 68:

- non si sfrutta l'informazione che i raggi omologhi si intersecano in corrispondenza dei punti oggetto (per es. P_4);
- sono necessari tre punti di appoggio plano-altimetrici (X, Y, Z noti), mentre vedremo che la procedura descritta in seguito richiederà soltanto due punti planimetrici (X, Y noti) e tre punti altimetrici (Z nota).

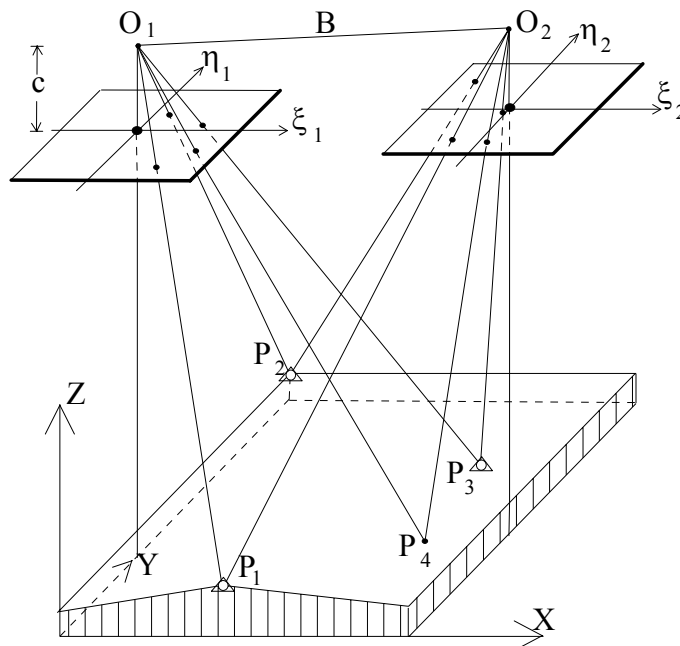


Figura 68 - Modello stereoscopico con tre punti d'appoggio P1, P2, P3

4.6.6.1.2 Orientamento di coppie stereoscopiche (in una sola fase)

Mediante osservazione stereoscopica sui due fotogrammi da orientare (modello stereoscopico), si misurano le coordinate immagine dei punti d'appoggio e di alcuni altri punti (ad es. P_4



in Figura 68) Per ogni punto d'appoggio, si possono scrivere quattro equazioni di collinearità nelle 12 incognite (sottolineate):

Foto 1

$$\xi_{i1} = f(\xi_0, c, \underline{X}_{01}, \underline{Y}_{01}, \underline{Z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{\kappa}_1, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$\eta_{i1} = f(\eta_0, c, \underline{X}_{01}, \underline{Y}_{01}, \underline{Z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{\kappa}_1, X_i, Y_i, Z_i)$$

Foto 2

$$\xi_{i2} = f(\xi_0, c, \underline{X}_{02}, \underline{Y}_{02}, \underline{Z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{\kappa}_2, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$\eta_{i2} = f(\eta_0, c, \underline{X}_{02}, \underline{Y}_{02}, \underline{Z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{\kappa}_2, X_i, Y_i, Z_i)$$

Per ciascun altro punto, si hanno tre ulteriori incognite (in grassetto), ma quattro equazioni:

Foto 1

$$\xi_{i1} = f(\xi_0, c, \underline{X}_{01}, \underline{Y}_{01}, \underline{Z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{\kappa}_1, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i)$$

$$\eta_{i1} = f(\eta_0, c, \underline{X}_{01}, \underline{Y}_{01}, \underline{Z}_{01}, \underline{\omega}_1, \underline{\phi}_1, \underline{\kappa}_1, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i)$$

Foto 2

$$\xi_{i2} = f(\xi_0, c, \underline{X}_{02}, \underline{Y}_{02}, \underline{Z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{\kappa}_2, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i)$$

$$\eta_{i2} = f(\eta_0, c, \underline{X}_{02}, \underline{Y}_{02}, \underline{Z}_{02}, \underline{\omega}_2, \underline{\phi}_2, \underline{\kappa}_2, \mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i)$$

Dapprima si linearizza il sistema, di solito ampiamente esuberante, utilizzando valori approssimati delle incognite, e poi di ricava la soluzione con il metodo di compensazione delle misure indirette. Come risultato, si ottengono i 12 parametri di orientamento esterno e le coordinate terreno dei punti incogniti osservati.

Questa procedura di orientamento è la più precisa, poiché si può utilizzare un numero qualsivoglia di punti di appoggio e di altri punti osservati, e poiché il metodo di compensazione delle misure indirette si applica alle equazioni indicate, che rappresentano la relazione funzionale diretta fra le grandezze osservate (le coordinate immagine) e le incognite. E' una soluzione a un solo passaggio, a differenza di quella descritta nel paragrafo seguente, che separa l'orientamento in due fasi e che, pertanto, necessariamente trascura le correlazioni fra le grandezze determinate nella prima fase e quelle ricavate nella seconda.

4.6.6.1.3 Orientamento simultaneo dei due fotogrammi (in due fasi successive)

L'orientamento schematizzato in Figura 69 si esegue in due fasi successive. Nella prima, si crea un modello stereoscopico a partire dai due fotogrammi, in un sistema x,y,z arbitrario. Nella seconda, si trasforma questo modello nel sistema [O;X,Y,Z].

Il metodo prevede che si formi dapprima il modello stereoscopico inteso come il luogo di intersezione di tutte le infinite coppie di raggi omologhi (i raggi proiettanti che hanno generato le due immagini di uno stesso punto oggetto) e che quindi si rototrasli questo corpo nello spazio in modo tale da riferirlo al sistema di riferimento oggetto.

Questo metodo di orientamento esterno viene ancora usato anche negli approcci analitici e digitali della fotogrammetria anche se non esistono ragioni per preferirlo al metodo descritto nel paragrafo precedente che è dunque da prediligere sempre a meno di comprovati motivi di ordine pratico.

4.6.6.1.4 Orientamento di blocchi di fotogrammi

Quando si devono orientare più di due fotogrammi è conveniente da un punto di vista tecnico ed economico ricorrere al metodo della triangolazione fotogrammetrica.

Questo metodo libera la fotogrammetria dalla necessità di disporre di almeno tre punti di appoggio per ciascun modello stereoscopico, da rilevarsi con metodi topografici a terra. Come risultato della triangolazione aerea, si ottengono i parametri di orientamento di tutti i fotogrammi (o dei modelli), e le coordinate XYZ di un certo numero di punti singoli, in un sistema di riferimento assoluto (di solito il sistema di coordinate terreno). Si parla quindi di determinazione fotogrammetrica di punti. Questi possono essere:

- punti segnalizzati prima del volo;
- punti "naturali" scelti sui fotogrammi e individuati, di solito, da uno schizzo monografico.

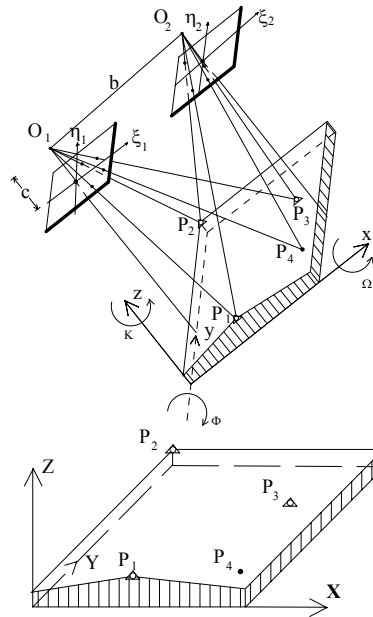


Figura 69 - Procedura di orientamento in due fasi successive

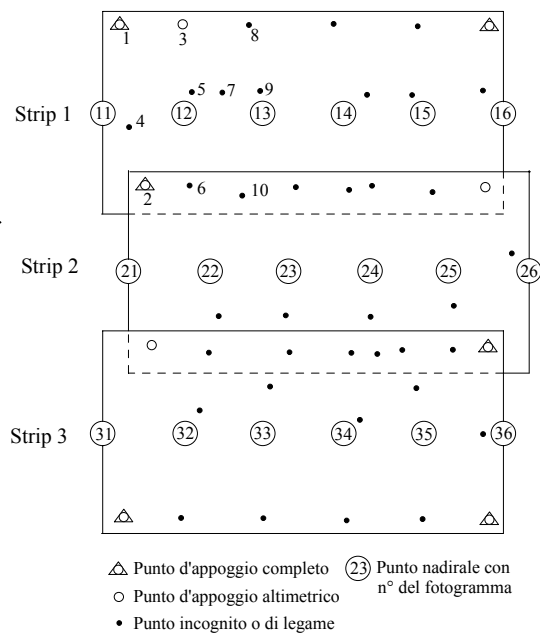


Figura 70 - Serie di fotogrammi costituenti un blocco

La misura di punti mediante triangolazione fotogrammetrica è utilizzata nelle seguenti applicazioni:

determinazione delle coordinate di punti per l'appoggio dei singoli modelli, ai fini di una successiva produzione di cartografia tradizionale od ortofotografica.

determinazione delle coordinate di un gran numero di punti, come nel caso, ad esempio, di vertici di particelle catastali o di una rete geodetica di inquadramento.

determinazione delle coordinate di punti di controllo di movimenti, nelle applicazioni ingegneristiche.

La Figura 70 illustra uno schema di triangolazione aerea. L'esempio mostra 18 fotogrammi di tre strisciate. Il ricoprimento longitudinale è di circa il 60%, quello trasversale di circa il

25%. Per l'orientamento di questa serie di fotogrammi, disponiamo di sei punti di appoggio completi (plano-altimetrici) e di tre punti solo altimetrici. Vogliamo determinare i parametri di orientamento dei modelli e le coordinate terreno di nuovi punti. Questi ultimi collegano i modelli fra loro, lungo la strisciata, e collegano le strisciate adiacenti. Per esempio, il punto incognito 7 cade solo nei fotogrammi 12 e 13, il 5 nei fotogrammi 11, 12 e 13, il 6 nei fotogrammi 11, 12, 13, 21, 22 e 23.

Due sono le tecniche possibili per il calcolo di una triangolazione fotogrammetrica e costituiscono le generalizzazioni dei due metodi di orientamento esterno indiretto di coppie di fotogrammi stereoscopici descritte nei due paragrafi precedenti.

4.6.6.1.4.1 Compensazione del blocco a modelli indipendenti

Questo metodo è la generalizzazione del metodo descritto al paragrafo 4.6.6.1.3.

Supponiamo, all'inizio, che il blocco sia costituito da fotogrammi con ricoprimento longitudinale (lungo la strisciata) del 60% circa, e trasversale (fra strisciate adiacenti) di circa il 25%. La compensazione a modelli indipendenti parte dalle coordinate modello, ottenute dopo che si è effettuato l'orientamento relativo analitico e si è formato ciascun modello. Nel corso della compensazione del blocco, ogni modello verrà connesso agli altri in un unico blocco e, contemporaneamente, trasformato nel sistema di riferimento terreno. Perciò le unità elementari della triangolazione aerea a modelli indipendenti sono i singoli modelli stereoscopici.

Nella compensazione spaziale di un blocco, si calcolano le coordinate XYZ dei punti nel sistema terreno. I dati di partenza sono le coordinate modello xyz di punti, appartenenti a modelli stereoscopici formati con operazioni di orientamento relativo. Oltre alle coordinate modello dei punti di legame e di appoggio, si considerano anche quelle dei centri di presa (v. Figura 71), ricavate dall'orientamento relativo analitico e dalla formazione del modello.

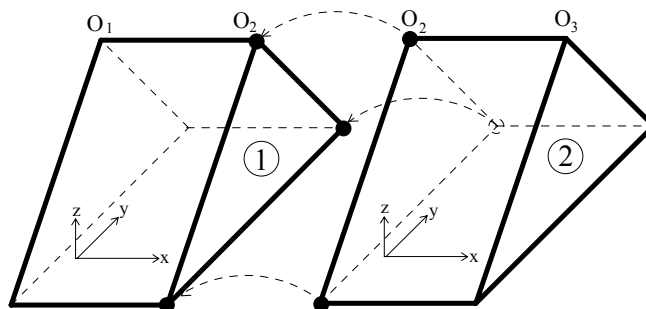


Figura 71 - Concatenamento di modelli tramite i centri di presa

I centri di proiezione vincolano le quote lungo la strisciata. Poiché non esiste un analogo irrigidimento trasversale, come si vede in Figura 72, è necessario disporre di una rete di punti disposti perpendicolarmente agli assi delle strisciate. In alternativa, si potrebbe ottenere una buona rigidità in quota delle strisciate in senso trasversale, solo prevedendo un ricoprimento trasversale, fra strisciate adiacenti, di circa il 60%.

Il principio della compensazione spaziale di un blocco è illustrato in Figura 71 e Figura 72: i punti di ciascun modello sono definiti in un sistema di riferimento tridimensionale indipendente, che si può trasformare nel sistema terreno mediante l'orientamento assoluto. Per determinare l'orientamento assoluto simultaneo di tutti i modelli del blocco, abbiamo da un lato le coordinate modello dei punti di legame (compresi i centri di proiezione), e dall'altro le coordinate modello e terreno dei punti di appoggio.

Ciascun modello viene quindi:

- traslato (tre traslazioni X_u, Y_u, Z_u);
- ruotato (tre rotazioni Ω, Φ, K);
- dimensionato (un fattore di scala m);

in modo che i punti di legame (compresi i centri di presa) risultino il più possibile coincidenti e gli scarti residui sui punti di appoggio siano i più piccoli possibile.

Nella compensazione tridimensionale del blocco, la precisione planimetrica risultante non è influenzata dalla precisione delle quote modello, nè dalla disposizione dei punti di appoggio in quota. Analogamente, la precisione altimetrica è indipendente da quella delle coordinate modello x, y e dalla disposizione dei punti d'appoggio planimetrici. Perciò le precisioni planimetrica e altimetrica si possono trattare separatamente.

4.6.6.1.4.2 Compensazione del blocco a stelle proiettive

Nel metodo di compensazione a stelle proiettive ("bundle adjustment"), di una strisciata o di un blocco di fotogrammi con ricoprimento longitudinale di almeno il 60% e trasversale del 20%, si calcolano direttamente le relazioni fra coordinate immagine e coordinate oggetto, senza introdurre le coordinate modello quale passaggio intermedio. Con questo metodo l'entità elementare è costituita dal fotogramma.

La Figura 73 illustra il principio. I punti immagine e il centro di proiezione di ciascun fotogramma definiscono una stella di raggi nello spazio. I parametri di orientamento esterno di tutte le stelle del blocco, ossia di tutti i fotogrammi, vengono calcolati simultaneamente. I dati di partenza sono le coordinate immagine dei punti di legame (punti presenti in più di un fotogramma), e le coordinate immagine ed oggetto dei punti di appoggio.

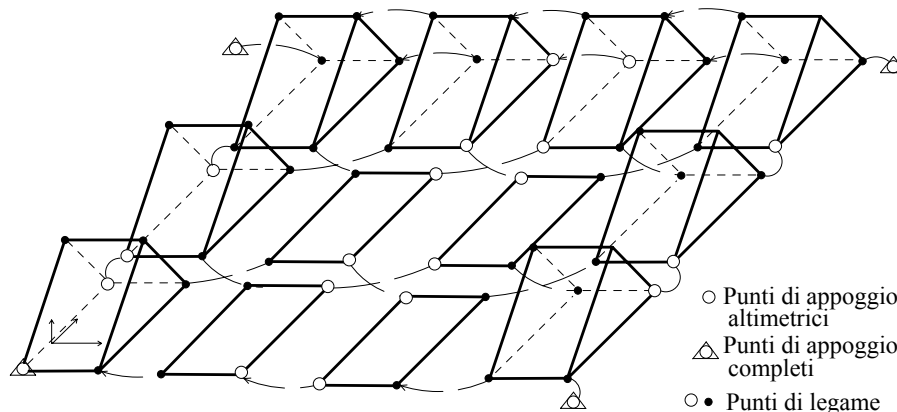


Figura 72 - Compensazione spaziale di un blocco a modelli indipendenti

Il principio della compensazione si può definire come segue. Le stelle proiettive vengono traslate (tre traslazioni X_0, Y_0, Z_0) e ruotate (tre rotazioni ω, ϕ, κ) in modo che i raggi si intersechino al meglio in corrispondenza dei punti di legame e passino il più possibile per i punti d'appoggio.

Le relazioni matematiche che sussistono fra coordinate immagine e coordinate oggetto (o terreno) sono definite mediante le equazioni di collinearità (vedi 4.6.3). Queste equazioni non sono lineari nei parametri incogniti e richiedono pertanto una linearizzazione per poter risolvere il sistema derivato.

Un esempio schematico, con soli quattro fotogrammi (vedi Figura 74), ci aiuterà a chiarire il procedimento. Il bilancio fra equazione ed incognite è:

- Coordinate immagine osservate:

$$2 \times 6 \times 4 = 48$$

- Incognite:

$$3 \times 4 = 12 \text{ coord. centri di presa}$$

$$3 \times 4 = 12 \text{ rotazioni}$$

$$3 \times 4 = 12 \text{ coord. di punti incogniti}$$

- Ridondanza:

$$48 - 36 = 12$$

Esaminiamo ora i vantaggi e gli svantaggi della compensazione a stelle proiettive rispetto almetdo di compensazione a modelli indipendenti.

Gli svantaggi principali sono:

- problema non lineare, in cui la ricerca dei valori approssimati richiede lunghe e pesanti pre-elaborazioni;
- uso massiccio del calcolatore, con grande potenza di calcolo;
- non si possono usare strumenti analogici per l'acquisizione dei dati;
- è sempre un problema tridimensionale, per cui non è possibile effettuare separatamente le compensazioni in planimetria e in quota.

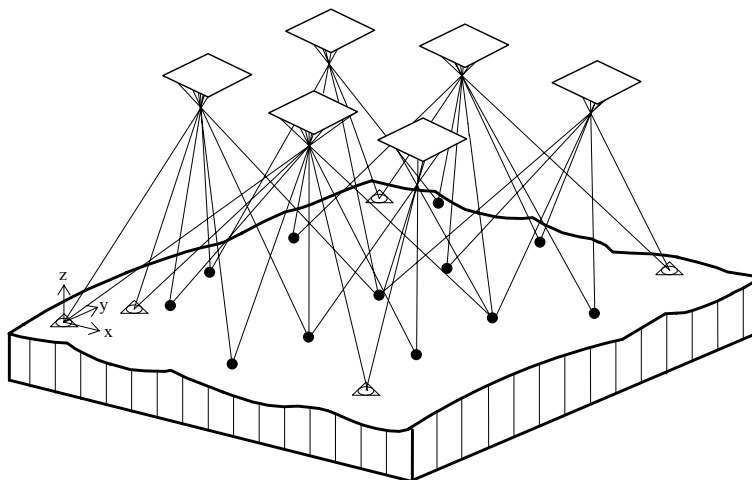


Figura 73 - Principio della compensazione di un blocco a stelle proiettive

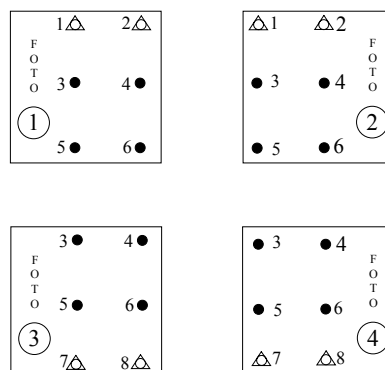


Figura 74 - Esempio di triangolazione fotogrammetrica a stelle proiettive



I vantaggi principali sono:

- è il metodo più preciso: si basa sulla relazione diretta fra coordinate immagine e terreno, senza il passaggio intermedio della formazione del modello;
- rende semplice l'applicazione delle tecniche di eliminazione degli errori sistematici;
- rende semplice l'utilizzazione di informazioni ausiliarie nella compensazione (per es.: parametri di orientamento esterno noti, misure eseguite sul terreno quali lunghezze, angoli, ecc., informazioni sul fatto che i punti giacciono su linee rette, piani, superfici note, ecc.);
- rende possibile l'uso di camere posizionate comunque, e di camere non metriche, ciò che si verifica spesso in fotogrammetria ravvicinata;
- rende possibile ricavare i parametri di orientamento esterno da impostare sugli strumenti di restituzione, analogici o analitici. Diventa quindi inutile la collimazione di punti di appoggio sul modello da restituire.

Oggi il metodo a stelle proiettive è largamente utilizzato specialmente nelle applicazioni della fotogrammetria digitale.

4.6.6.1.4.3 La precisione di una triangolazione fotogrammetrica

Le considerazioni che verranno svolte in questo paragrafo relativamente alla precisione dei blocchi fotogrammetrici orientati mediante triangolazione valgono qualunque sia il tipo di compensazione adottata (a modelli indipendenti o a stelle proiettive).

Negli anni passati, numerosi test nazionali e internazionali promossi da enti di riferimento nell'ambito della fotogrammetria (SIFET, OEEPE, ecc.) hanno permesso di definire alcune regole per determinare le precisioni ottenibili da una procedura di triangolazione aerea sui punti di legame e sui parametri di orientamento. Queste valutazioni sono state svolte generalmente in funzione della distribuzione dei punti d'appoggio presenti all'interno del blocco fotogrammetrico. In particolare è stato notato che, utilizzando uno schema di appoggio molto semplice (4 punti d'appoggio posti nei 4 vertici del blocco):

- la precisione cala fortemente al crescere della dimensione del blocco;
- lo s.q.m. massimo si ha nella mezzeria dei lati del blocco.

Perciò risulta ovvio che, se vogliamo aumentare la precisione complessiva, dobbiamo predisporre una serie fitta di punti d'appoggio lungo i bordi del blocco. In questo infatti si può dimostrare che la precisione è quasi indipendente dalle dimensioni del blocco, ed è simile a quella del singolo modello. Ulteriori punti di appoggio interni al blocco non portano ad aumenti significativi di precisione.

In una forma più generale, questi risultati sono stati pubblicati da Ackermann⁹, Ebner¹⁰ e Meissl¹¹, relativamente alle diverse disposizioni dei punti d'appoggio che compaiono in Figura 75.

In Figura 75 la dimensione del blocco è variabile. In P1 il numero di punti di appoggio (distanti 2b) cresce al crescere del blocco, per P2, P3 e P4 esso rimane costante.

La letteratura scientifica citata riporta le seguenti formule empiriche per il calcolo delle precisioni dei blocchi fotogrammetrici:

⁹ BuL 36, 3-15, 1968

¹⁰ BuL 40, 214-221, 1972

¹¹ ÖZfV, 61-65, 1972

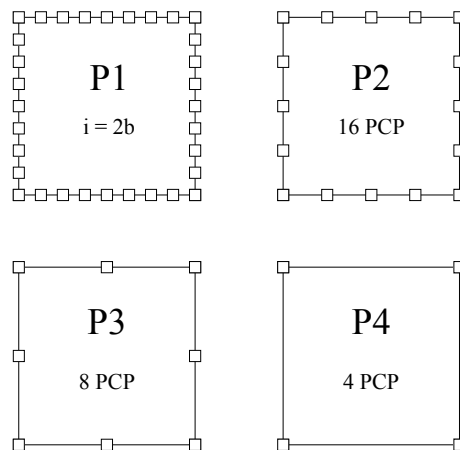


Figura 75 - Disposizioni di punti di appoggio.

$$\begin{aligned}
 \text{P1: } \sigma_{B,L,mean} &\approx (0.70 + 0.29 \log ns) \sigma_{M,L} \\
 \text{P2: } \sigma_{B,L,mean} &\approx (0.83 + 0.02 ns) \sigma_{M,L} \\
 \text{P3: } \sigma_{B,L,mean} &\approx (0.83 + 0.05 ns) \sigma_{M,L} \\
 \text{P4: } \sigma_{B,L,mean} &\approx (0.47 + 0.25 ns) \sigma_{M,L}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

dove ns = numero delle strisciate nel blocco

Le regole per la determinazione della precisione, fin qui viste, sono applicabili anche, in via approssimata, ai casi di blocchi rettangolari, ma non valgono nel caso limite di strisciate singole. Pertanto, la precisione di una strisciata isolata verrà trattata separatamente. La quasi-uguaglianza fra precisione del blocco e quella del singolo modello, nel caso di appoggio fitto lungo i bordi - che è il caso più importante nella pratica - vale anche se i bordi del blocco sono irregolari.

Alla luce del problema dell'individuazione degli errori grossolani e della loro posizione, tuttavia, le conclusioni precedenti devono essere riesaminate: si dovrebbero usare sempre almeno otto punti di legame in ciascun modello, due per ciascuno spigolo, e non punti d'appoggio singoli, ma gruppi di almeno due.

La precisione altimetrica, in seguito alla compensazione di un blocco, si può ricavare in analogia a quanto abbiamo già visto per la compensazione planimetrica. La precisione in quota dipende in primo luogo dal numero di modello fra due serie di punti d'appoggio altimetrici (disposti perpendicolarmente all'asse delle strisciate). E' anche un buon criterio quello di aumentare la precisione lungo i bordi superiore ed inferiore del blocco, introducendo punti di appoggio in quota ad intervalli di $i/2$ modelli. Perciò la configurazione migliore della rete di appoggio in quota è quella illustrata in Figura 76.

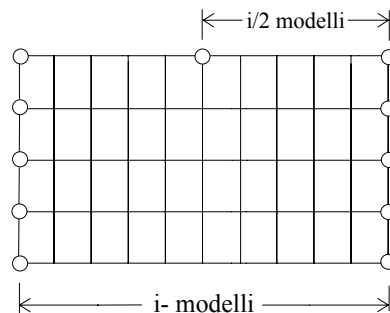


Figura 76 - Distribuzione ideale dei punti di appoggio in altimetria

La Figura 77 mostra la relazione fra la precisione in quota dei punti agli spigoli dei modelli e il numero i di modelli compresi fra due linee di punti di appoggio. Essa evidenzia la media

degli s.q.m. dell'intero blocco (σ_{mean}) e il valore massimo (σ_{max}) nella posizione più sfavorevole. Le espressioni corrispondenti sono:

$$\begin{aligned}\sigma_{B,Z,\text{mean}} &\approx (0.34 + 0.22 \cdot i) \sigma_{M,Z} \\ \sigma_{B,Z,\text{max}} &\approx (0.27 + 0.31 \cdot i) \sigma_{M,Z}\end{aligned}\quad (28)$$

Si vede che, rispetto alla precisione planimetrica, soprattutto nel caso di appoggio fitto lungo i bordi del blocco, la precisione in quota è sensibilmente meno favorevole. L'intervallo massimo fra linee di punti di appoggio altimetrici, se si vuole che il decadimento di precisione in quota, rispetto a quella del singolo modello, sia modesto, deve essere limitato a circa tre modelli. Ma, in tal caso, si influisce negativamente sull'economicità dell'intero procedimento. Una soluzione di compromesso, comunemente adottata, fra precisione ed economia, è quella che prevede almeno quattro modelli d'intervallo.

È stato accennato prima che il caso dell'orientamento di una strisciata singola necessita di una trattazione particolare.

In questo caso infatti la precisione dei punti ricavati per triangolazione dipende soprattutto dal numero i di modelli compresi fra punti di appoggio successivi. Come abbiamo già visto, ci interessa determinare due valori numerici significativi: la precisione media $\sigma_{S,\text{mean}}$, riferita all'intera strisciata e il valore massimo $\sigma_{S,\text{max}}$, dell'errore che si verifica nell'intervallo fra punti di appoggio.

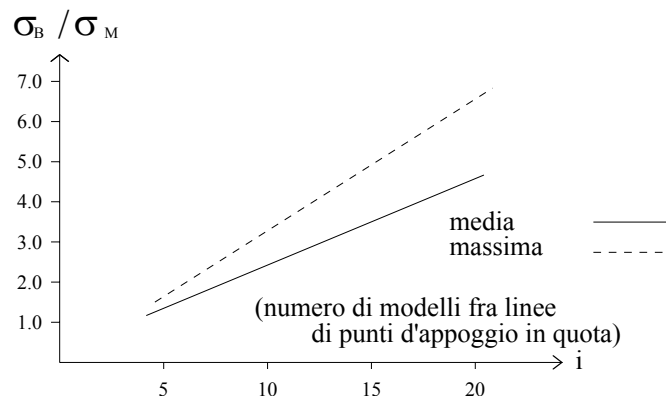


Figura 77 - Precisione in quota della compensazione di un blocco (σ_B), rapportata a quella di un singolo modello (σ_M)

I risultati di studi teorici e sperimentali sulla precisione nella triangolazione per strisciate, che talvolta hanno condotto a risultati contraddittori, sono illustrati in Figura 78. L'estrema semplificazione, con cui si è rappresentato il fenomeno in questo schema, ha il vantaggio di una facile interpretazione, nell'uso pratico. Notare, tuttavia, che in qualche caso potrebbero verificarsi differenze anche del 50% rispetto ai valori ottenuti dal diagramma.

4.6.6.2 Orientamento di immagini a prospettiva centrale multipla

Le tecniche utilizzate per il calcolo dell'orientamento di immagini a prospettiva centrale multipla ricalcano, con le dovute variazioni, le tecniche appena descritte per l'orientamento di immagini a prospettiva centrale unica. Nel seguito verranno quindi descritti solo i modelli matematici di base rimandando ai paragrafi precedenti per le applicazioni specifiche ai casi di orientamento di una, due o più immagini.

È invalsa l'abitudine, da parte dei proprietari dei sistemi di acquisizione, di non comunicare i dati dell'orientamento interno per cui sono stati sviluppati approcci alternativi che si basano sull'utilizzo di modelli matematici parametrici che collegano direttamente il sistema interno al sistema oggetto mediante rapporti di funzioni polinomiali. Questo approccio, meno preci-

so del metodo rigoroso fin qui esposto, si potrebbe anche applicare alle immagini a prospettiva centrale unica ma nella pratica questo non avviene preferendo gli approcci rigorosi.

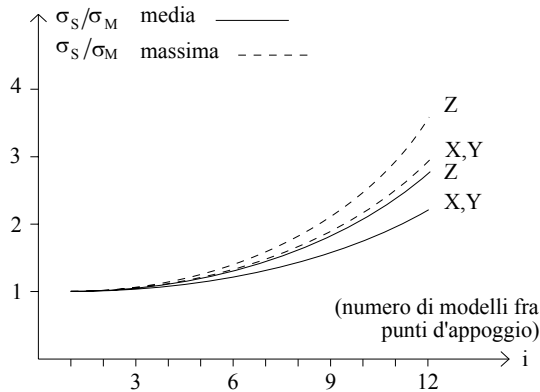


Figura 78 - Precisione della triangolazione per strisciate (σ_S), rapportata a quella dei singoli modelli (σ_M)

4.6.6.2.1 Il modello geometrico rigoroso delle immagini a prospettiva centrale multipla

Questa tipologia di modelli riflette la realtà fisica della geometria di presa per cui devono essere considerati tutti i parametri e fenomeni concorrenti alla generazione dell'immagine, quali tipo di sensore ed ottica utilizzati, metodologia di acquisizione, movimento della piattaforma lungo la propria orbita, rifrazione atmosferica, curvatura della Terra, ecc.

Assimilando ogni linea di cui si compone l'immagine ad una prospettiva centrale della corrispondente porzione di territorio acquisita, è possibile ipotizzare un approccio di tipo fotogrammetrico. Nel caso di prospettiva centrale il modello proiettivo è espresso, come noto, dalle equazioni di collinearità (per la descrizione delle quali si rimanda al paragrafo 4.6.3):

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (29)$$

Per esplicitare le equazioni di collinearità per le immagini a prospettiva centrale multipla è opportuno esprimere tutte le coordinate nel sistema **ECI** (*Earth Centered Inertial*, descritto nel seguito): a tal fine è indispensabile operare una serie di rotazioni nello spazio che coinvolgono i seguenti sistemi di coordinate:

- SISTEMA SENSORE (S - Sensor): l'origine del sistema è posizionata nel centro di presa (centro di massa del vettore aereo), l'asse x_S è approssimativamente tangente alla traiettoria, orientato secondo il moto del vettore, l'asse z_S è diretto dall'array di sensori **CCD** al centro di presa mentre l'asse y_S è parallelo all'array di pixel completando una terna destrorsa.
- SISTEMA PIATTAFORMA (B - Body): l'origine del sistema è posizionata nel centro di massa del vettore aereo e gli assi x_B , y_B , e z_B sono tali per cui il sistema coincide con il sistema orbitale quando gli angoli di assetto Φ , θ , ψ sono nulli.

- SISTEMA ORBITALE (F - Flight): l'origine del sistema è posizionata nel centro di massa del vettore aereo, l'asse x_F è tangente alla traiettoria di volo, orientato secondo il moto del vettore aereo (stessa direzione del vettore velocità del vettore aereo), l'asse z_F , giacente nel piano della traiettoria come l'asse x_F , è puntato verso il centro di massa della Terra e l'asse y_F completa una terna destrorsa.
- SISTEMA GEOCENTRICO INERZIALE (ECI – *Earth Centered Inertial*): l'origine del sistema è posizionata nel centro di massa della Terra, l'asse X giace sul piano equatoriale e punta verso l'equinozio di primavera ad una certa epoca (J2000 – 1 gennaio 200, ore 12 UT), l'asse Z è diretto verso il Polo Nord Celeste alla medesima epoca mentre l'asse Y completa una terna destrorsa.

Le trasformazioni tra i 4 sistemi di coordinate descritti sono rappresentabili tramite tre matrici di rotazione:

La matrice **RSB** (*Body-Sensor*) permette il passaggio dal sistema satellite (B) al sistema sensore (S). Tale matrice tiene conto dei difetti di parallelismo tra gli assi x_S, y_S, z_S e x_B, y_B, z_B ed è costante all'interno di una scena per ogni singolo sensore

La matrice **RBF** (*Flight-Body*) permette il passaggio dal sistema orbitale al sistema satellite (B) tramite la conoscenza della variazione temporale degli angoli di assetto Φ, θ, ψ .

La matrice **RFI** (*Inertial-Flight*) permette il passaggio dal sistema geocentrico inerziale (E-CI) al sistema orbitale (F): è funzione dei parametri orbitali kepleriani e varia perciò nel tempo all'interno di ogni singola immagine.

In relazione alla modalità di acquisizione pushbroom, descritta nel paragrafo 4.5.1.2.2, il centro di presa non risulta più unico per l'intera l'immagine ma varia per ogni linea acquisita in funzione del tempo. E' quindi necessario modificare gli algoritmi consolidati in ambito fotogrammetrico considerando che una scansione lineare del territorio rappresenta una prospettiva centrale unicamente nella direzione cross-track (coordinata immagine ξ) mentre nella direzione di avanzamento (in-track, coordinata immagine η) è assimilabile ad una proiezione parallela (la convenzione utilizzata per il sistema di riferimento è riportata in Figura 79).

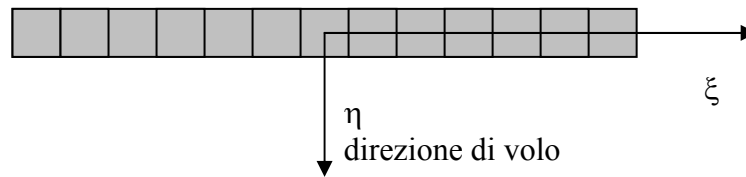


Figura 79 - Convenzione utilizzata per il sistema di riferimento immagine

In accordo alle convenzioni riportate precedentemente è possibile riscrivere le equazioni di collinearità nel modo seguente:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_i - X_{0,t}) + r_{21}(Y_i - Y_{0,t}) + r_{31}(Z_i - Z_{0,t})}{r_{13}(X_i - X_{0,t}) + r_{23}(Y_i - Y_{0,t}) + r_{33}(Z_i - Z_{0,t})} \\ \eta_i &= \eta_0 - c \frac{r_{11}(X_i - X_{0,t}) + r_{21}(Y_i - Y_{0,t}) + r_{31}(Z_i - Z_{0,t})}{r_{13}(X_i - X_{0,t}) + r_{23}(Y_i - Y_{0,t}) + r_{33}(Z_i - Z_{0,t})} \end{aligned} \quad (30)$$

Nelle equazioni (30) r sono gli elementi della matrice di rotazione spaziale che permette di attuare il passaggio da coordinate nel sistema di riferimento immagine a quelle nel sistema ECI al variare del tempo t. In relazione alle matrici descritte in precedenza si ha:

$$R = R_{SB} \cdot R_{BF} \cdot R_{FI} \quad (31)$$

$X_{0,t}$, $Y_{0,t}$, $Z_{0,t}$ sono le coordinate del centro di presa al tempo t , espresse da funzioni nella forma di polinomi del secondo ordine in funzione del tempo di campionamento t relativo alla prima linea di scansione, del tipo:

$$\begin{aligned} X_{0,t} &= x_0 + x_1 t + x_2 t^2 \\ Y_{0,t} &= y_0 + y_1 t + y_2 t^2 \\ Z_{0,t} &= z_0 + z_1 t + z_2 t^2 \end{aligned} \quad (32)$$

Lo stesso approccio può essere mantenuto per la modellizzazione degli angoli di assetto:

$$\begin{aligned} \phi_t &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \\ \theta_t &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \\ \varphi_t &= c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \end{aligned} \quad (33)$$

Le variazioni delle coordinate del centro di presa e degli angoli di assetto possono essere approssimate da polinomi di secondo grado in quanto la stabilità di una piattaforma satellitare è superiore rispetto ad una aerea, essendo favorita dal moto regolare del vettore lungo la propria traiettoria (descrivibile attraverso la stima dei parametri kepleriani nel caso di vettore satellitare).

Ipotizzando i parametri di orientamento interno costanti, in quanto caratteristici del sensore cui si fa riferimento e determinati dal costruttore, la fase di stima si riduce alla determinazione dei sei parametri di orientamento esterno per ognuna delle linee acquisite (18 incognite considerando la modellizzazione di tali parametri in funzione del tempo ipotizzata). In realtà la lunghezza focale della camera di acquisizione non è nota con sufficiente precisione ed è quindi opportuno utilizzare tale valore come approssimazione iniziale per procedere ad una stima più accurata. E' inoltre possibile utilizzare la *self-calibration* per la correzione di alcuni errori sistematici della strumentazione di acquisizione, quali traslazioni e rotazione dell'*array* lineare **CCD** nel piano focale, distorsione radiale e decentramento dell'ottica, variazione di scala lungo la direzione del sensore. Ciò implica ovviamente un aumento del numero di incognite del sistema impostato.

La soluzione viene ottenuta con un approccio iterativo ai minimi quadrati che prevede, come noto, la linearizzazione delle equazioni (32) attraverso uno sviluppo di Taylor arrestato ai termini del primo ordine in funzione delle incognite. I valori approssimati iniziali relativi alle traiettorie del velivolo e all'assetto angolare, indispensabili per innescare il processo iterativo ai minimi quadrati, possono essere desunti dal file di metadati generalmente fornito con le immagini. L'utilizzo di un adeguato numero di punti di appoggio a terra (GCPs) consente quindi di scrivere un numero di equazioni ridondante per procedere alla soluzione descritta.

Quanto descritto sono i fondamenti teorici di un approccio rigoroso al problema dell'orientamento di immagini a prospettiva centrale multipla: esistono comunque modalità differenti di implementazione di tali algoritmi di cui la più nota è senza dubbio quella del Dott. Thierry Toutin del *Natural Resources Canada Centre for Remote Sensing*. Tale modello è stato infatti il primo ad essere stato sviluppato e successivamente implementato nella totalità dei software commerciali leader nel settore del trattamento di immagini a prospettiva centrale multipla.

Nel seguito si vuole invece riportare una breve descrizione del modello rigoroso relativo al satellite Eros A1 (Baiocchi, Crespi, Università Roma "La Sapienza" – DITS), che rappresenta un approccio per certi aspetti innovativo all'orientamento di immagini acquisite in modali-

tà *pushbroom* asincrona. La decisione di sviluppare algoritmi dedicati a tale piattaforma è dovuta essenzialmente ai costi contenuti delle immagini (in relazione ai prezzi di piattaforme con analoghe caratteristiche) ed alla concreta disponibilità di coppie stereoscopiche associata all'elevata rapidità di rilascio.

Anche in questo caso l'approccio è di tipo fotogrammetrico basato sulle equazioni di collinearità ma è stato deciso di utilizzare come parametro di orientamento interno il **FOV** (differente dall'**IFOV** e relativo al singolo elemento **CCD**) a causa della conoscenza troppo approssimata della lunghezza focale dell'ottica.

E' stato considerato anche l'effetto della rifrazione atmosferica che, in funzione della quota di volo e dei possibili angoli di off-nadir elevati, non permette di ritenere valida l'ipotesi di raggi ottici rettilinei su cui si basano le equazioni di collinearità. Il problema, schematizzato in Figura 80, consiste nel fatto che il satellite inquadra un punto **P'** spostato di una distanza d dalla posizione **P** di quel punto, stimata considerando un cammino ottico rettilineo.

E' quindi necessario correggere le coordinate oggetto stimate del valore d in accordo con la seguente formula:

$$d = R \cdot \alpha = R \cdot (Z_0 - Z) \quad (34)$$

Il valore dell'angolo Z_0 viene ricavato dalla posizione stimata del punto a terra e da quella della piattaforma tramite l'intersezione della linea di vista con l'ellissoide. L'angolo Z , funzione di Z' , viene invece ricavato attraverso modelli empirici ritenuti non rilevanti in questa sede e quindi non riportati. Risulta invece interessante la Tabella 15 in cui sono riportate l'entità degli spostamenti dovuti alla rifrazione atmosferica in funzione dell'angolo Z_0 .

Angolo zenitale senza rifrazione Z_0 (°)	Distanza di rifrazione d (m)
10	0.45
20	1.02
30	1.91
40	3.52
45	4.92
50	7.08

Tabella 15 - Distanza di rifrazione d in funzione dell'angolo zenitale

4.6.6.2.2 Orientamento di scene stereoscopiche

L'acquisizione di coppie stereoscopiche a prospettiva centrale multipla, indispensabile qualora l'obiettivo dell'elaborazione delle immagini sia l'estrazione di informazioni tridimensionali del territorio, può essere ottenuta in modalità differenti.

La prima, ovvia, è quella di effettuare due scansioni in tempi differenti dopo un periodo tale per cui il velivolo ripercorre la stessa traiettoria in cui è stata acquisita la prima immagine. Questa opzione, sebbene risulti la più semplice dal punto di vista operativo, può presentare alcuni inconvenienti quali immagini con differente illuminazione, copertura nuvolosa o diffusione atmosferica in zone differenti delle immagini, variazioni dello stato vegetativo in caso di intervallo temporale elevato, ecc.

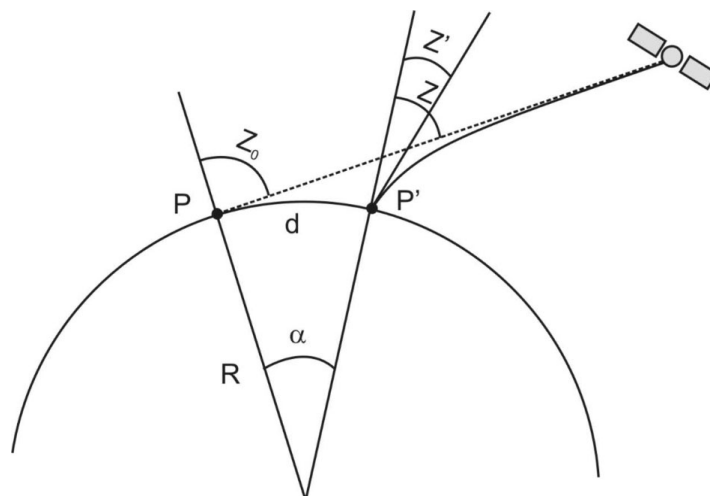


Figura 80 - Schematizzazione dell'effetto della rifrazione atmosferica

La seconda modalità, nota come stereoscopia across-track (Figura 81 a sinistra), implica che il vettore sia in grado di modificare il proprio assetto angolare orientando l'ottica di acquisizione, generalmente solidale alla piattaforma stessa. In questo modo è possibile inquadrare la stessa area acquisita durante il precedente passaggio o che verrà acquisita nel passaggio successivo. Anche questa opzione, seppure caratterizzata da una differenza temporale di un solo giorno, può presentare gli stessi aspetti negativi illustrati nel caso precedente. In aggiunta la risoluzione di almeno una delle due immagini è necessariamente inferiore a quella nominale (al nadir).

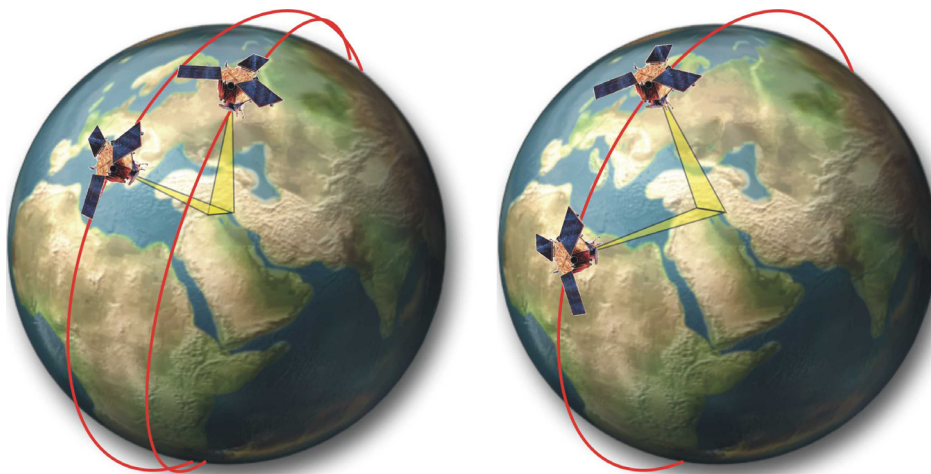


Figura 81 - Schema di acquisizione stereoscopica across-track (sinistra) ed along-track (destra)

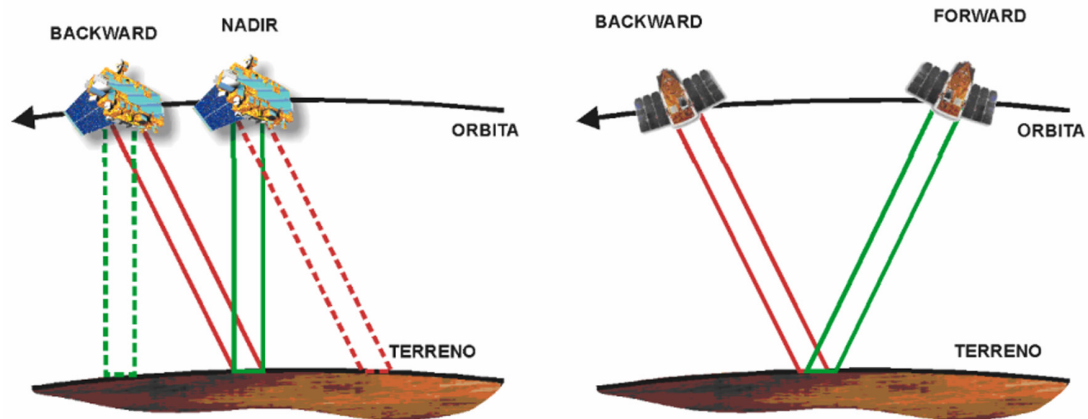


Figura 82 - Tipologie di acquisizioni along-track

Esiste infine la modalità in-track (o along-track – Figura 81 a destra), per cui le due immagini inquadranti la stessa area vengono acquisite durante la medesima orbita. Quest'ultima opzione è sicuramente la più idonea qualora le immagini siano elaborate per l'estrazione di informazioni metriche tridimensionali piuttosto che per analisi di movimenti e deformazioni. In questo caso sono infatti minimizzate le variazioni di illuminazione e le differenze locali fra le immagini.

La stereoscopia in-track può essere ottenuta essenzialmente attraverso due modalità:

presenza di ottiche fisse orientate secondo angoli di vista differenti. Tale tecnica di acquisizione stereoscopica è utilizzata dai satelliti Spot 5 e Terra (sensore Aster, Figura 82 a sinistra);

rapido orientamento della piattaforma tra le due acquisizioni. (E' questo il caso dei satelliti Eros (Figura 82 a destra), QuickBird e Ikonos che, grazie alle dimensioni ed al peso ridotto, sono definiti piattaforme "agili", in grado cioè di orientarsi e stabilizzarsi in tempi molto brevi). Sebbene tutte i satelliti citati siano dotati di tale caratteristica, attualmente Eros A1 è l'unico in grado di fornire sistematicamente ed in tempi brevi coppie stereoscopiche all'utenza civile.

La stima dei parametri di orientamento di coppie stereoscopiche satellitari non viene descritta nel seguito in quanto il procedimento è analogo a quanto illustrato per il caso delle immagini a prospettiva centrale unica, ovvero mediante l'utilizzo di punti di legame che consentono di aggiungere nuove equazioni al sistema risolutivo.

4.6.6.2.3 Correzioni geometriche dei sensori satellitari

Qualora non siano disponibili informazioni accurate dei parametri di orientamento interno (è questo il caso delle immagini satellitari ad alta risoluzione) si può far ricorso ad altri metodi più approssimati che si sono affermati grazie ad un accordo tra i principali proprietari dei sistemi di acquisizione e case produttrici di software per consentire un trattamento svincolato da diritti di esclusiva dei dati satellitari. (OpenGis Consortium).

In passato risultava sufficiente, per effettuare tale operazione, l'utilizzo di modelli bidimensionali (trasformazioni 2-D), considerata la piccola scala delle applicazioni correlate ad immagini telerilevate a media e bassa risoluzione geometrica.

Con l'incremento della risoluzione delle immagini satellitari (anche di un ordine di grandezza, da 30 m a 0.6 m) questa tipologia di approccio non risulta più compatibile con le scale nominali attese dei prodotti derivati dalle immagini stesse (1:10.000). Si è quindi reso neces-



sario l'utilizzo di modelli proiettivi opportuni, che devono necessariamente considerare anche la componente altimetrica (trasformazioni 3-D).

Nei paragrafi successivi verranno descritte le basi teoriche delle trasformazioni piane e tri-dimensionali, dedicando maggiore attenzione ai modelli utilizzati nell'ambito dell'elaborazione geometrica di immagini satellitari a prospettiva centrale multipla.

Si sottolinea ancora il fatto che comunque questi modelli, pur essendo basati su un'attenta ed accurata analisi conducono a risultati meno apprezzabili, dal punto di vista metrico, a quelli ottenibili utilizzando modelli geometrici basati sul vero processo di acquisizione (vedi 4.6.6.2)

4.6.6.2.3.1 Trasformazioni 2-D

Si definiscono trasformazioni piane quelle operazioni grafiche o numeriche che fanno corrispondere biunivocamente ad un insieme piano di punti un altro insieme piano avente lo stesso numero di elementi. Le applicazioni di queste trasformazioni sono tipiche nel campo della topografia, della cartografia, della fotogrammetria e del telerilevamento. In particolare in questi ultimi due casi le trasformazioni piane sono utilizzate per ridurre le distorsioni geometriche da cui sono affette le immagini digitali, rendendole compatibili con il sistema di riferimento scelto.

L'equazione generale, in termini cartesiani, di una trasformazione piana per il passaggio dal sistema immagine $[O;\xi,\eta]$ ad un sistema cartografico $[O';X, Y]$ è rappresentata da un polinomio di ordine n del tipo:

$$\begin{aligned}\xi &= a_1 + b_1X + c_1Y + d_1XY + e_1X^2 + f_1Y^2 + \dots \\ \eta &= a_2 + b_2X + c_2Y + d_2XY + e_2X^2 + f_2Y^2 + \dots\end{aligned}\quad (35)$$

Le trasformazioni piane possono essere scritte in forma matriciale mettendo in evidenza i parametri in modo tale che essi corrispondano alle deformazioni geometriche subite dai punti elaborati. Le deformazioni semplici sono la rotazione, la variazioni di scala (isotropa o anisotropa), la traslazione ed il taglio (o sbandamento), mentre quelle composte realizzano trasformazioni più complesse generalmente interpretate mediante funzioni polinomiali, particolarmente utili nelle discipline del rilevamento.

Se ci si arresta al termine rettangolare, la trasformazione si chiama bilineare e dipende, così come è possibile notare nella (35), da otto parametri: un esempio di applicazione di tale trasformazione non lineare è riportato in Figura 83.

La trasformazione affine corrisponde ad una relazione polinomiale di primo grado ed è esprimibile con la seguente relazione:

$$\begin{aligned}\xi &= a_1 + b_1X + c_1Y \\ \eta &= a_2 + b_2X + c_2Y\end{aligned}\quad (36)$$

Tale trasformazione, costituita da 6 parametri, corrisponde ad una traslazione dell'origine, ad una rotazione α , a due distinte variazioni di scala lungo i due assi e ad un taglio: dal punto di vista applicativo l'utilizzo di questa trasformazione modifica un rettangolo in un parallelogramma, come esemplificato in Figura 84.

La trasformazione omografica, nota in ambito fotogrammetrico con il termine "Raddrizzamento", è rappresentata dalle equazioni (37), derivabile dalle equazioni di collinearità nel caso particolare di oggetti ripresi piani:

$$\xi = \frac{a_1 X + b_1 Y + c_1}{gX + hY + 1}$$

$$\eta = \frac{a_2 X + b_2 Y + c_2}{gX + hY + 1} \quad (37)$$

L'applicazione di tale relazione implica che un quadrato venga trasformato in un generico quadrilatero, come evidenziato in Figura 85

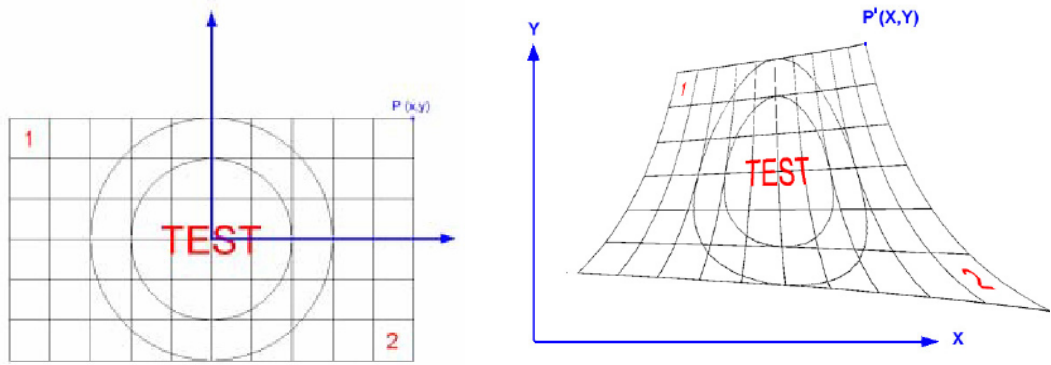


Figura 83 - Esempio di applicazione di una trasformazione bilineare

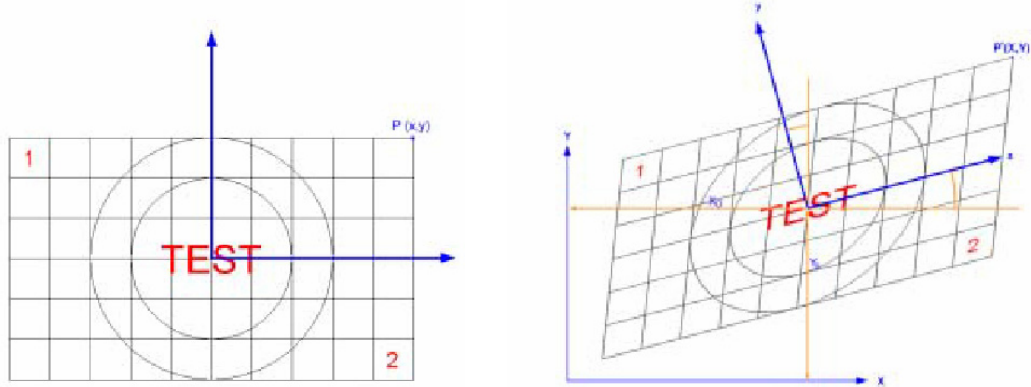


Figura 84 - Esempio di applicazione di una trasformazione affine

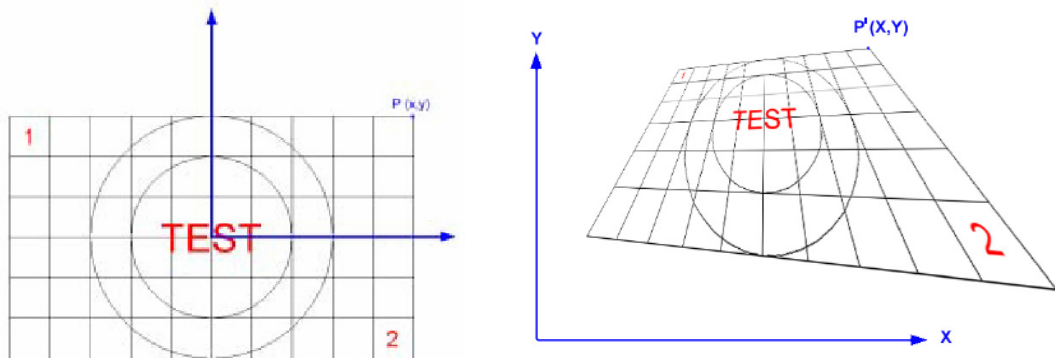


Figura 85 - Esempio di applicazione di una trasformazione omografica

Dopo aver scelto la tipologia di trasformazione piana da applicare all'immagine, è necessario stimare i relativi parametri incogniti, generalmente attraverso una stima ai minimi quadrati degli stessi. Nell'ambito delle immagini satellitari questo implica la necessità di collimare un sufficiente numero di punti di appoggio planimetrici (GCP, Ground Control Point), ovvero punti di coordinate immagine (ξ, η) e cartografiche (X, Y) note, utilizzando un supporto cartografico a scala adeguata¹². Il concetto illustrato è schematizzato in Figura 86. Data la validità locale della trasformazione, è necessario utilizzare un adeguato numero di GCP omogeneamente distribuiti sull'intera immagine.

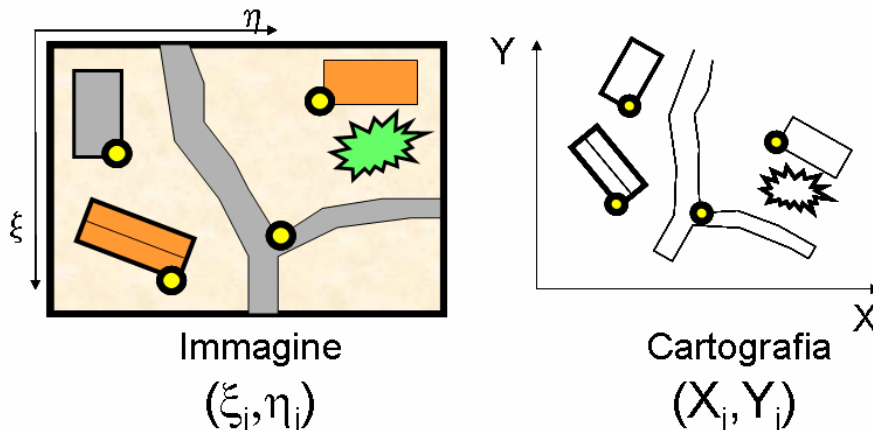


Figura 86 - Schema relativo all'individuazione dei punti di appoggio o GCP

4.6.6.2.3.2 Trasformazioni 3-D

Le trasformazioni tridimensionali possono essere distinte in due famiglie principali e concettualmente contrapposte: i modelli parametrici, o rigorosi (descritti in 4.6.6.2) a quelli non parametrici, o generalizzati¹³, descritti dettagliatamente nei seguenti paragrafi.

4.6.6.2.3.2.1 Modelli non parametrici (generalizzati)

I modelli non parametrici sono indipendenti dal tipo di sensore e dalla metodologia di acquisizione utilizzata. In generale utilizzano una relazione matematica indipendente dal processo fisico di acquisizione dell'immagine che si ritiene idonea alla modellizzazione della relazione esistente tra coordinate immagine e coordinate oggetto (Figura 87).

Come già accennato in precedenza, la scelta di tali algoritmi è obbligata qualora non siano disponibili informazioni tecniche relative alla piattaforma ed al sensore di acquisizione (in funzione delle politiche commerciali delle società distributrici di immagini).

Le trasformazioni 3-D più semplici sono le funzioni polinomiali tridimensionali, ovvero un'estensione delle funzioni polinomiali bidimensionali illustrate nel paragrafo precedente. Le coordinate immagine sono relazionate a quelle oggetto attraverso polinomi tridimensionali di grado variabile, come evidenziato nella (38):

¹² Generalmente non vengono effettuati appositi rilievi GPS in funzione della bassa precisione, in termini assoluti, ottenibile con queste tipologie di trasformazione.

¹³ La nomenclatura riportata, utilizzata nella letteratura internazionale di settore, potrebbe sembrare in prima analisi priva di logica. Come verrà descritto nel seguito i modelli non parametrici sono infatti caratterizzati dalla presenza di numerosi parametri incogniti per cui sembrerebbe opportuno denominarli modelli parametrici. In realtà non sono dei parametri ma dei coefficienti polinomiali che in fase di stima ai minimi quadrati vengono comunemente denominati parametri incogniti aggiuntivi. I modelli rigorosi utilizzano invece per la definizione della trasformazione alcuni parametri fisici correlati alla realtà ed al processo fisico di acquisizione dell'immagine, da cui il termine modelli parametrici.

$$\begin{aligned} \xi &= P_a(X, Y, Z) \\ \eta &= P_b(X, Y, Z) \end{aligned} \quad (38)$$

dove:

$$P(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k \quad (39)$$

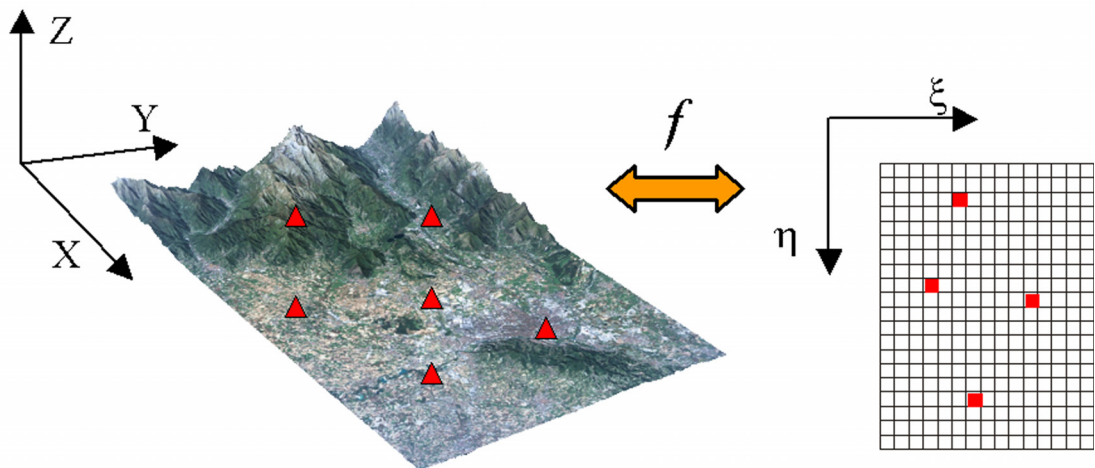


Figura 87 - Schema di relazione generalizzata f tra coordinate terreno ed immagine.

Le equazioni (38) sono state utilizzate quasi esclusivamente per immagini SPOT, che possono essere considerate, nell'ambito del telerilevamento ottico il dato di passaggio dalla media risoluzione all'alta risoluzione geometrica. Con questa tipologia di immagini spesso il contributo del dato di elevazione viene limitato al termine di primo grado.

Il modello non parametrico maggiormente diffuso, implementato in quasi tutti i software per il trattamento geometrico di immagini satellitari, è quello dei rapporti polinomiali (in letteratura anglosassone denominati Rational Function Model, RFM). Si è recentemente assistito ad una crescente diffusione dei modelli non parametrici trovando ampio consenso da parte degli utenti finali, in funzione sia delle precisioni di posizionamento plano-altimetrico ottenibili anche senza collimazione di GCP, sia della sempre maggiore esigenza di interoperabilità tra piattaforme differenti all'interno di un unico software. L'implementazione di modelli generalizzati permette inoltre di ridurre l'impatto economico imputabile al continuo aggiornamento dei modelli rigorosi e dei software che li utilizzano, operazione indispensabile per la frequenza con cui vengono rese operative nuove piattaforme e pianificate future missioni spaziali.

Il metodo dei rapporti polinomiali modella la relazione tra le coordinate immagine (ξ, η) e le coordinate tridimensionali oggetto (X, Y, Z) mediante rapporti di polinomi, come indicato nella (40):

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{P_a(X, Y, Z)}{P_b(X, Y, Z)} \\ \eta &= \frac{P_c(X, Y, Z)}{P_d(X, Y, Z)} \end{aligned} \quad (40)$$



P_a, P_b, P_c, P_d , sono generalmente polinomi di grado massimo pari a 3 (corrispondente a 20 coefficienti) esprimibili indifferentemente mediante le equazioni:

$$P_a(X, Y, Z) = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + \dots + a_{17}Y^2Z + a_{18}YZ^2 \quad (41)$$

Sebbene i modelli non parametrici non siano direttamente correlati alla fisica del problema, la scelta dell'utilizzo di polinomi di terzo grado è riconducibile alle seguenti considerazioni: le distorsioni prospettiche sono modellabili attraverso i termini di primo grado mentre le distorsioni dovute alla curvatura terrestre, alla rifrazione atmosferica ed alle distorsioni dell'ottica sono approssimabili mediante i termini di secondo grado. Ulteriori distorsioni incognite, quali le vibrazioni della piattaforma satellitare, possono essere invece corrette mediante termini di terzo grado.

Le equazioni (40) sono note in letteratura come RFM *Upward* (verso l'alto) in quanto permettono di ricavare le coordinate immagine a partire dalle coordinate tridimensionali di un punto terreno. In alcuni casi, ad esempio per la determinazione dell'ingombro della matrice immagine corretta, è necessario utilizzare le equazioni inverse che prendono il nome di RFM *Downward* (verso il basso):

$$\begin{aligned} X &= \frac{P'_a(\xi, \eta, Z)}{P'_b(\xi, \eta, Z)} \\ Y &= \frac{P'_c(\xi, \eta, Z)}{P'_d(\xi, \eta, Z)} \end{aligned} \quad (42)$$

Dal punto di vista operativo sono attuabili due approcci opposti per la stima delle incognite della trasformazione a_i, b_i, c_i, d_i , ovvero gli 80 coefficienti polinomiali dei 4 polinomi presenti nelle equazioni (40) o (42) (in realtà le incognite reali risultano 78 in quanto i due coefficienti di ordine zero a denominatore sono posti pari all'unità).

La prima strada percorribile è quella utilizzata dalle società distributrici di immagini che allegano i coefficienti polinomiali della trasformazione (denominati RPC, *Rational Polynomial Coefficient*) e nota come *Terrain Independent*. Applicando il modello rigoroso del sensore (supposto quindi noto) vengono calcolate le coordinate planimetriche oggetto a partire da un grigliato regolare di punti in coordinate immagine ed utilizzando differenti valori di quota costante (Figura 88). La conoscenza delle coordinate di tali punti in entrambi i sistemi di riferimento permette di stimare adeguatamente gli RPC con un processo iterativo ai minimi quadrati. Questo tipo di approccio viene utilizzato dai rivenditori di immagini per permettere agli utenti finali di ottenere prodotti a valore aggiunto quali ortoproiezioni senza la necessità di dover disporre del modello del sensore ma allegando unicamente i coefficienti RPC.

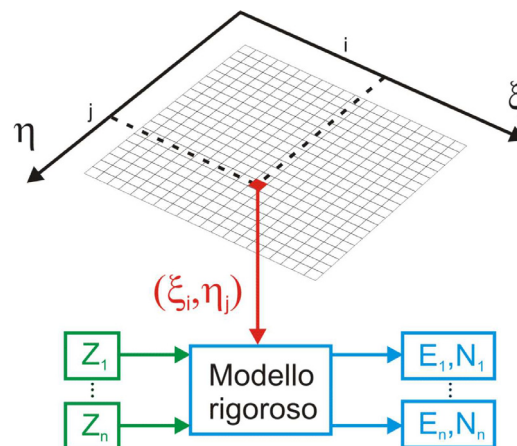


Figura 88 - Schema di calcolo delle coordinate oggetto di un grigliato di punti in coordinate immagine per diversi valori di quota (metodo RFM Terrain Independent)

La seconda possibilità è quella di individuare i punti necessari per la stima dei parametri in modo convenzionale, ovvero:

- collimazione dei punti omologhi su cartografia (raster/vettoriale) ed immagine e successiva estrazione dei valori di quota da un modello digitale del terreno dell'area inquadrata;
- pianificazione ed esecuzione di una campagna di rilievo GPS

In questo caso, considerando polinomi di grado massimo pari a 3 (20 coefficienti per ogni polinomio) i coefficienti incogniti sono al massimo 78, in quanto i termini noti dei polinomi a denominatore b_0 e d_0 sono posti uguali ad 1. E' quindi necessario collimare un numero minimo di GCP pari a 39 ($N \geq 39$), in quanto ogni punto genera 2 equazioni (si ricorda che per una soluzione ai minimi quadrati ottimale è consigliabile utilizzare una ridondanza pari almeno al 20% rispetto al numero minimo di equazioni richiesto). Poiché le equazioni (40) non sono lineari è innanzitutto necessario linearizzarle rispetto alle incognite, ovvero i 78 coefficienti RPC, mediante uno sviluppo in serie di Taylor arrestato al primo ordine:

Le soluzioni commerciali oggi disponibili possono generare problemi di convergenza della soluzione a causa della grande dipendenza statistica tra i coefficienti dei polinomi. In questi casi si può intervenire con tecniche di stabilizzazione della soluzione recentemente implementate dal Gruppo di ricerca del DITAG e sviluppate e testate con successo dall'ing. Fabio Giulio Tomolo all'interno della tesi di Dottorato di Ricerca in Geodesia e Geomatica.

4.6.6.2.3.2.2 Modello neurale (Neural Net)

L'approccio neurale può essere considerato un metodo innovativo di soluzione del problema della correzione di immagini mediante metodi non parametrici. E' stato sviluppato presso il DITAG del Politecnico di Torino dall'ing. Enrico Borgogno Mondino nell'ambito della tesi di Dottorato di Ricerca in Geodesia e Geomatica

Il panorama neurale è assai vasto ed algoritmi neurali sono stati sviluppati per far fronte alle più diverse applicazioni: sono queste che determinano la scelta dell'uno o dell'altro algoritmo.

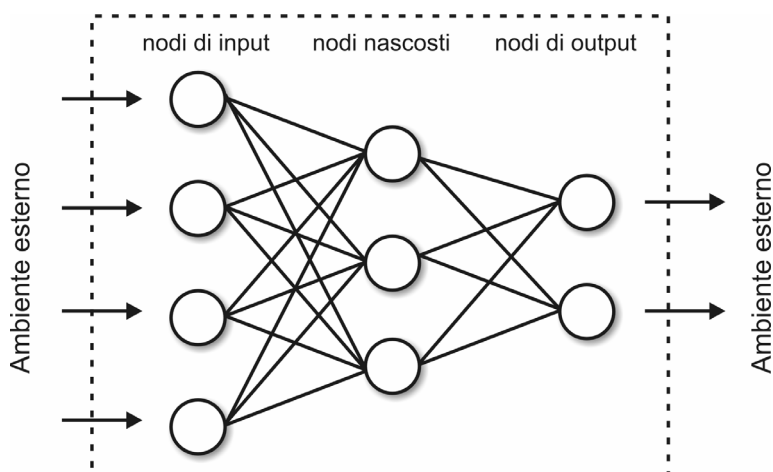


Figura 89 - Schema concettuale di rete neurale MLP a due layer computazionali (hidden e output).

Per la correzione geometrica di immagini satellitari l'attenzione è stata posta sull'algoritmo MLP (*Multi Layer Perceptron*), le cui caratteristiche di approssimazione e stima di funzioni (non lineari) sono già state ampiamente dimostrate nella letteratura scientifica di riferimento. L'idea base è quella di sostituire il modello proiettivo upward che relaziona le coordinate immagine (ξ, η) con quelle oggetto (X, Y, Z) con una rete neurale MLP opportunamente addestrata sulla base dei GCPs. Le motivazioni della scelta nascono dall'analisi dei problemi connessi all'approccio RFM precedentemente descritto. Le reti neurali preservano dalla forzata linearizzazione delle equazioni nell'intorno di una soluzione approssimata. Esse costituiscono una risposta non lineare ad un problema non lineare, la cui efficacia aumenta, al pari degli RFM, all'aumentare del numero di GCPs ed al diminuire delle deformazioni originarie dell'immagine.

Nelle reti MLP ciascun nodo svolge un'operazione molto semplice che consiste nel generare, attraverso una opportuna funzione, detta di trasferimento, una risposta ai segnali che su di esso convergono attraverso i canali di comunicazione. Tali canali simulano le sinapsi biologiche ed il loro compito consiste nel "pesare" l'intensità dei segnali trasmessi: per questo essi vengono definiti con il nome di "pesi sinaptici" o semplicemente "pesi".

L'approccio neurale per l'orientamento di immagini a prospettiva centrale multipla utilizza una rete MLP opportunamente addestrata. Le routine che la realizzano sono quelle presenti all'interno del Neural Network Toolbox di MATLAB 5.3.

L'accuratezza della soluzione (valutabile in termini di residui sui GCP e sui CP) varia sensibilmente al variare dei parametri utilizzati nel processo.

Le configurazioni di rete (architetture) che la procedura sviluppata è in grado di verificare dipendono da alcuni parametri che l'operatore deve fornire:

- intervallo di variabilità del numero dei nodi: deve essere definito il numero massimo e minimo di nodi da testare. Tale valore risulta influenzato dal numero di GCP forniti come pattern di addestramento. Un numero troppo elevato di nodi pregiudica la capacità di generalizzazione della rete, un numero troppo basso non approssima la funzione in modo adeguato;
- numero di inizializzazioni successive per ogni configurazione di nodi: deve essere indicato quante volte l'addestramento debba essere ripetuto per ogni architettura. I risultati ottenibili, con pari numero di nodi e di μ , possono differire anche molto tra di loro a seconda di come i pesi vengano inizializzati alla prima iterazione. Il rischio, per una sfortunata inizializzazione, è quella che l'algoritmo di ottimizzazione si blocchi all'interno di



minimi locali, della funzione d'errore, troppo pronunciati. La ripetizione per un numero di volte sufficientemente alto dell'addestramento preserva da questo rischio;

- livello di accuratezza richiesto ai residui sui GCP e sui CHK.

4.6.6.2.3.3 Considerazioni applicative

Innanzitutto si sottolinea nuovamente come le trasformazioni piane risultino inadeguate per la correzione geometrica di questa tipologia di dati, ad esclusione di casi molto particolari (immagini nadirali, area inquadrata con estensione limitata ed orografia sostanzialmente pianeggiante)

Relativamente al modello RFM, è possibile affermare che:

- presenta il grande vantaggio di poter essere utilizzati con qualsiasi tipo di immagine, indipendentemente dal sensore o dalla tipologia di acquisizione, ma necessitano un elevato numero di GCP per la stima dei parametri RPC;
- per la quasi totalità dei sensori descritti nel paragrafo 1.3.6.2 vengono forniti unitamente alle immagini anche i parametri RPC;
- la precisione di posizionamento planimetrico utilizzando esclusivamente gli RPC forniti non è elevata (ordine delle decine di metri) ma compatibile con alcune applicazioni a media scala. E' comunque sempre possibile migliorare tale precisione mediante collimazione di un limitato numero di punti di appoggio a terra ed utilizzando modelli digitali del terreno accurati;
- i modelli rigorosi consentono di ottenere precisioni elevate utilizzando un limitato numero di punti di appoggio, con il vantaggio di mantenere nelle fase di orientamento una completa analogia al procedimento fotogrammetrico.

4.6.7 La restituzione

4.6.7.1 Restituzione da immagini a prospettiva centrale unica

Come definito nei principi generali, la fotogrammetria permette la ricostruzione della posizione e della forma di un oggetto, a partire da due fotogrammi. Di solito, l'assetto di presa dei due fotogrammi corrisponde, approssimativamente, al caso normale (pseudo-nadirale) e la base è tale da garantire un ricoprimento di circa il 60% (Figura 90). Questa coppia stereoscopica può essere osservata con uno stereoscopio o altro strumento similare, che consente una visione tridimensionale. Si vede, cioè, un "modello stereoscopico", chiamato anche "modello ottico", dell'oggetto fotografato.

In questo paragrafo supporremo che:

- i parametri di orientamento esterno siano noti;
- I parametri di orientamento interno siano noti (camera calibrata);
- la restituzione sia ottenuta per via numerica.

Un approccio semplificato al problema prevede la misura delle coordinate immagine ξ_1, η_1 e ξ_2, η_2 di due punti immagine corrispondenti ("punti omologhi") P_1 e P_2 . Con le equazioni di collinearità si calcolano le coordinate oggetto X, Y, Z del punto P :

$$\begin{array}{ll}
 X = X_{01} + (Z - Z_{01}) k_{x1} & \text{Foto 1} \\
 Y = Y_{01} + (Z - Z_{01}) k_{y1} & \\
 X = X_{02} + (Z - Z_{02}) k_{x2} & \text{Foto 2} \\
 Y = Y_{02} + (Z - Z_{02}) k_{y2} &
 \end{array} \quad (43)$$

Le quantità k si ricavano dai parametri di orientamento interno ed esterno, e dalle quattro coordinate immagine misurate. Poiché le coordinate X_0 , Y_0 e Z_0 dei punti di presa sono note, ci sono quattro equazioni lineari nelle tre coordinate oggetto incognite X , Y e Z .

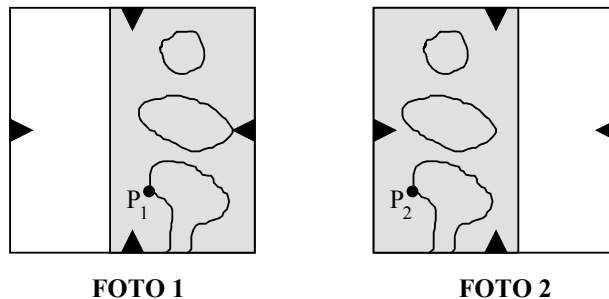


Figura 90 - Area del modello in una coppia stereoscopica

Dalla prima e terza delle quattro equazioni (43), si ha:

$$Z = \frac{X_{02} - Z_{02}k_{x2} + Z_{01}k_{x1} - X_{01}}{k_{x1} - k_{x2}} \quad (44)$$

La coordinata X si può ricavare dalla prima o dalla terza equazione, la Y dalla seconda e dalla quarta (per verifica). I due valori di Y , se leggermente diversi, vengono mediati.

Per il calcolo delle coordinate oggetto X, Y, Z con metodo di compensazione rigorosa si ricorre alla soluzione del sistema indicato di 4 equazioni in 3 incognite applicando il principio dei minimi quadrati.

4.6.7.2 Restituzione da immagini a prospettiva centrale multipla

Il procedimento è del tutto analogo a quello esposto nel paragrafo precedente con l'unica accortezza di utilizzare i modelli analitici corrispondenti alla particolare geometria di presa (prospettiva centrale multipla) delle immagini.

Il modello geometrico da adottare per la stima delle coordinate del punto a terra può essere scelto indipendentemente dal modello utilizzato per la stima dei parametri di orientamento.

4.6.8 Precisioni della Fotogrammetria

La precisione delle tecniche fotogrammetriche è il risultato di un processo che prevede l'esecuzione di fasi separate eseguite in sequenza (volo, appoggio, orientamento restituzione) in sequenza.

Sebbene sia possibile determinare analiticamente gli errori residui nelle singole fasi e valutarne una stima della loro influenza nelle fasi successive del processo fotogrammetrico, risulta chiaramente molto più complessa la valutazione analitica delle precisioni finali raggiungibili dalla fotogrammetria derivanti dal concorso di numerosi errori non tutti analizzabili in termini analitici: gli errori accidentali presenti nelle fasi di orientamento e restituzione, le correlazioni presenti tra risultati parziali delle varie fasi, gli errori strumentali residui, l'incertezza nella collimazione dei particolari del territorio, la sensibilità del restituitista e quant'altro. Nei paragrafi successivi si descrivono alcune regole pratiche, utili per stimare la precisione relativa della restituzione fotogrammetrica, basandosi su un vasto campione di test empirici eseguiti in applicazioni di fotogrammetria aerea.

4.6.8.1 Coordinate di punti singoli

Ad eccezione dei fotogrammi a scala molto grande (in cui influisce negativamente il trascinamento dell'immagine), la precisione delle coordinate XY (precisione in planimetria) è direttamente proporzionale alla scala dell'immagine, cioè si può ritenere costante se riferita all'immagine stessa. Il tipo d'obiettivo non influisce granché sulla precisione planimetrica.

L'errore in quota σ_z è proporzionale alla distanza fra camera e oggetto (quota relativa di volo) o al quadrato di tale distanza. La Figura 91 mostra i casi in cui l'errore è proporzionale al quadrato della distanza dall'oggetto: la base b e la distanza principale c rimangono entrambe costanti, mentre varia soltanto la quota relativa Z (esempio a sinistra: volo a quota assoluta e base costanti, su un terreno terrazzato; esempio a destra: volo con stessa base, ma a diverse quote).

La Figura 92 mostra invece alcuni casi in cui l'errore è linearmente proporzionale alla distanza dall'oggetto.

A sinistra, un esempio in cui il rapporto base/quota (B/Z) e distanza principale c rimangono costanti; a destra, invece, restano costanti il fattore di scala $mb = Z/c$ e la base B . Questa proporzionalità, fra errore in quota σ_z e quota relativa, rimane valida per i diversi tipi di camera da presa solo nell'ambito degli obiettivi normali e grandangolari, mentre entra in difetto nel caso dei super-grandangolari¹⁴.

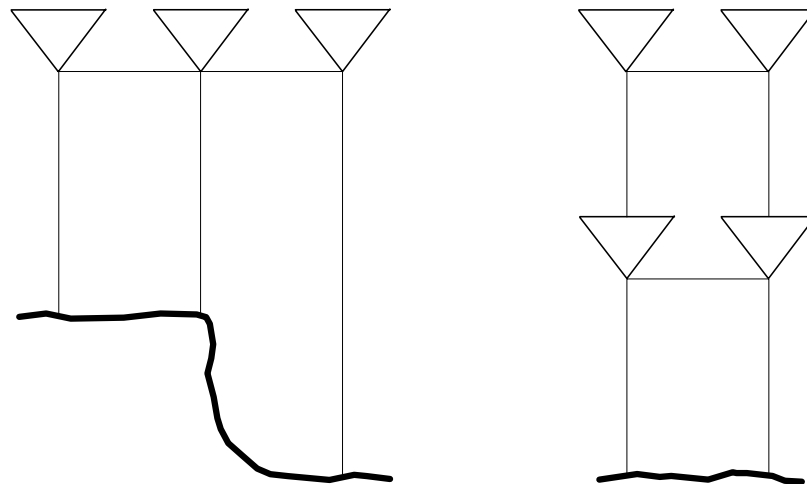


Figura 91 - Errore in quota proporzionale al quadrato della distanza dall'oggetto

Indicativamente, per punti presegnalizzati si possono assumere i valori:

Planimetria

$$\sigma_{XY} = \pm 6 \mu\text{m sul fotogramma}$$

Quota

$$\sigma_z = \pm 0.06 \% \text{ della distanza camera-oggetto (obiettivi normali. e grandagolari)}$$

$$\pm 0.08 \% \text{ della distanza camera-oggetto (obiettivi supergrand.)}$$

Tabella 16 - Precisioni su punti singoli presegnalizzati

¹⁴ Meier, H.K.: BuL 38, 50-62, 1970.
 Stark, E.: BuL 44, 5-14, 1976.
 Sievers, J., Schürer, K.: BuL 50, 101-118, 1982

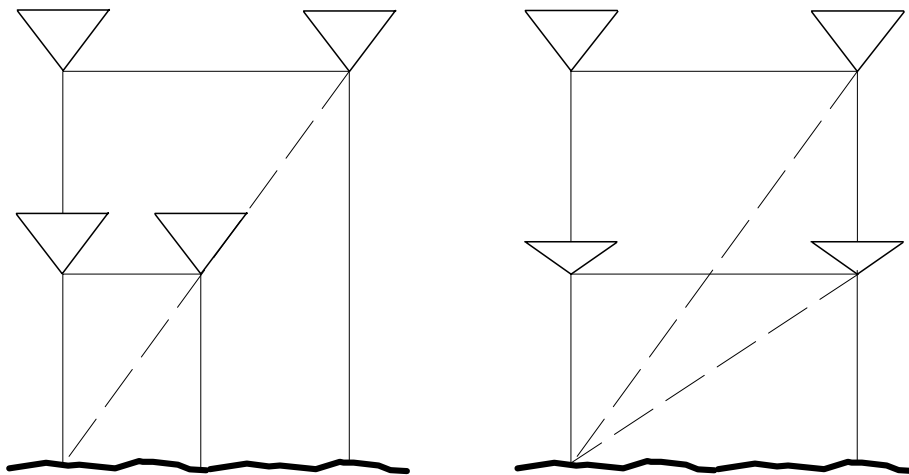


Figura 92 - Errore in quota linearmente proporzionale alla distanza dall'oggetto

Questi risultati si possono raggiungere utilizzando strumenti analitici o stereo-comparatori di precisione. Se si inseriscono anche i parametri addizionali nel calcolo delle coordinate, per compensare l'influenza di tutti i possibili errori sistematici, si può ottenere un incremento di precisione fino al 50%.

Questi valori empirici si possono anche applicare a punti naturali (spigoli di case o di colture, ecc.), ma con l'avvertenza di sommarvi l'incertezza σ_{def} di definizione del punto:

Planimetria

$$\sigma_{XY(nat)} = \sqrt{\sigma_{XY(seg)}^2 + \sigma_{XY(def)}^2}$$

Quota

$$\sigma_{Z(nat)} = \sqrt{\sigma_{Z(seg)}^2 + \sigma_{Z(def)}^2}$$

Tabella 17 - Precisioni su punti singoli naturali

L'incertezza di definizione di alcuni tipi di punti naturali è riportata in Tabella 18. Si può ridurre significativamente l'ampiezza dell'intervallo di alcuni valori, effettuando prove pratiche sui fotogrammi da utilizzare per il rilievo.

Tipo di punto	Planimetria $\sigma_{XY(def)}$ [cm]	Quota $\sigma_{Z(def)}$ [cm]
Spigoli di casa o di recinzione	7 - 12	8 - 15
Spigolo o centro di tombino	4 - 6	1 - 3
Spigolo di bordo di coltura	20 - 100	10 - 20
Cespugli, alberi	20 - 100	20 - 100

Tabella 18 - Incertezza di definizione di punti naturali

Lo scarto quadratico medio della distanza σ_S si può ricavare dall'espressione dell'errore planimetrico σ_{XY} :

$$\sigma_S = \sigma_{XY} \cdot \sqrt{2} \quad (45)$$

La precisione di una distanza, ricavata per via fotogrammetrica dai valori delle coordinate misurate dei suoi estremi, è sostanzialmente indipendente dall'entità della distanza stessa.



4.6.8.2 Linee planimetriche

Inseguire una linea con la marca stereoscopica, dà luogo ad una precisione di misura sensibilmente inferiore a quella che si ottiene collimando un punto singolo. Con una serie di test empirici, Heissler ha stabilito che la precisione, indipendentemente dalla scala immagine, è di circa $\sigma_G = \pm 45 \mu\text{m}$ sul fotogramma.

Se la marca si sposta mediante i volantini, questa precisione può aumentare considerevolmente, purché per il movimento si utilizzi un rapporto di trasmissione opportunamente basso.

In considerazione della precisione di disegno, richiesta per la carta finale e pari a $\pm 0.2 \text{ mm}$, risulta determinato il massimo rapporto di ingrandimento, che è consentito adottare, fra fotogramma e carta restituita: vale 1:5.

Questo valore è usato molto spesso per carte alle scale da 1:1.000 a 1:2.000. Per scale più piccole, non è opportuno utilizzare questo rapporto, definito solo in base alla precisione grafica. Il motivo va ricercato nei limiti dell'interpretabilità fotografica. Per esempio: l'operatore che restituisce alla scala 1:50.000 riesce a riconoscere le linee da tracciare utilizzando fotogrammi, al massimo, 1:60.000. La scelta della scala ottimale dei fotogrammi, funzione della:

- precisione, nella cartografia a grande scala, e della
- interpretabilità dei fotogrammi in quella a piccola scala,

è riportata nella formula seguente:

$$m_b = k \cdot \sqrt{m_k} \quad (46)$$

e nella Tabella 19, utile ai fini pratici (il parametro k dipende dalla qualità dei fotogrammi e dello strumento di restituzione, oltre che dalle esigenze del prodotto finale, e varia da 200 a 300):

1 : mk	mb
1:1000	6300 - 9500
1:5000	14000 - 21000
1:10000	20000 - 30000
1:25000	32000 - 47000
1:50000	45000 - 67000

Tabella 19 - Relazione fra scala carta e scala immagine

Per le carte a piccola scala, poiché l'elemento critico non è la precisione, ma l'interpretabilità dei particolari sui fotogrammi, si possono adoperare strumenti restitutori meno precisi, e quindi meno costosi.

4.6.8.3 Curve di livello

La precisione delle curve di livello, inseguite in continuo sul modello, può essere espressa dalla formula di Koppe, in funzione della pendenza del terreno:

$$\sigma_H = \sigma_Z + \sigma_G \cdot \tan \alpha \quad (47)$$

dove:



σ_Z è la precisione della misura in quota delle linee continue per fotogrammi con ricoprimento del 60%

- $= 0.2 \text{ ‰ } h$ per fotogrammi N o GA
- $= 0.25 \text{ ‰ } h$ per fotogrammi SGA

(in entrambi i casi, si tratta di errori sensibilmente maggiori di quelli ricavati in precedenza, poiché si tratta di misure dinamiche di linee, e non statiche di punti singoli)

σ_G è la precisione planimetrica delle linee continue:

- $= \pm 100 \text{ } \mu\text{m}$ sul fotogramma, per carte a grande scala (errori sensibilmente maggiori di quelli descritti in precedenza), poiché le curve di livello non sono visibili sul modello, ma devono essere "cercate" dall'operatore.
- $= \pm 0.2 \text{ mm}$ sulla carta, per le carte a piccola scala.

Con l'eccezione del caso di pendenze molto forti, l'influenza del secondo addendo della somma al secondo termine della formula di Koppe è molto piccola, e può essere più o meno trascurata. Perciò una regola grossolana per il calcolo immediato della precisione delle curve di livello è:

$$\sigma_H = \pm 0.25 \text{ ‰ } h \quad (48)$$

Si consideri una carta a grande scala, 1:1.000, con equidistanza delle curve di livello pari a 1 m, valore consueto per questa scala, e precisione, richiesta per le curve, di $\sigma_H = \pm 0.20 \text{ m}$ (1/5 dell'equidistanza).¹⁵ Si possono ricavare, di conseguenza, le scale dei fotogrammi:

1 : 8.900	per camere SGA
1 : 5.300	per camere GA
1 : 2.700	per camere N.

Tabella 20 - Scale medie dei fotogrammi in funzione del tipo di obiettivo

L'Equazione (48), valida per linee planimetriche, darebbe una scala ottimale da 1:6.300 a 1:9.500, indipendentemente dalla camera usata. Si vede come questa scala garantisca la precisione in quota solo se si utilizzano camere SGA o, al limite, GA. Se unica disponibile fosse una camera ad angolo normale, non si potrebbe adoperare il vantaggioso rapporto di ingrandimento fotogramma carta da 1:6.3 a 1:9.5, anche se esso sarebbe idoneo a soddisfare le esigenze di fotointerpretazione e di precisione planimetrica. In questo caso bisognerebbe adottare, invece, l'antieconomica scala di 1:2.700!

Se si ripete il calcolo per scale cartografiche più piccole, si trova che l'Equazione per le linee planimetriche (imposta dalle esigenze della foto-interpretazione) fornisce valori di scala fotogramma soddisfacenti anche la precisione altimetrica, sia pure con fotogrammi ad angolo normale. Ciò nonostante, nella cartografia a piccola scala è predominante l'uso di fotogrammi grandangolari. Il loro vantaggio si basa soprattutto sulla possibilità di usare:

- aerei con quota massima di volo più bassa, e
- strumenti restitutori più semplici, e pertanto meno costosi.

¹⁵ Lo s.q.m. delle curve di livello non dovrebbe superare da 1/8 a 1/4 dell'equidistanza, in funzione della precisione richiesta per la carta finale. Spesso si fissa l'equidistanza pari a (non più di) 1/1000 del denominatore della scala.



Un altro metodo per determinare la quota relativa di volo, in funzione della precisione delle curve di livello e della loro equidistanza, è il cosiddetto fattore C, usato spesso negli USA e definito come:

$$\text{fattore C} = \frac{\text{Quota relativa di volo}}{\text{Equidistanza}} \quad (49)$$

Il fattore C varia, in funzione delle specifiche della carta e del tipo di camera e di restitutore, da 750 a 2000.

Con un fattore C di 1200 e un'equidistanza di 1 m, tipica per la scala 1:1.000, la quota di volo sarebbe (1200 x 1 =) 1200 m. Per una camera grandangolare, ad essa corrisponderebbe una scala fotogramma di 1:8.000.

4.6.8.4 Profili e grigliati

Spesso i dati necessari alla produzione di ortofoto e modelli digitali del terreno sono acquisiti sul modello stereoscopico mediante inseguimento di profili. Gli errori, in questo procedimento dinamico, dipendono soprattutto dall'acclività del terreno e dalla velocità di scansione lungo i profili. I valori visibili in Figura 4.4-5 sono ricavati principalmente dalla bibliografia^{16,17}.

Nella misura statica dei punti di un grigliato, modalità di acquisizione dati in cui la coordinata Z viene registrata quando il dispositivo di inseguimento dei profili ha ridotto quasi a zero la velocità di scansione, si può raggiungere una precisione di circa

$$\sigma_a = 0.1 - 0.15 \% h \quad (50)$$

corrispondente ad una velocità costante di scansione, sul fotogramma, pari a circa 1.0 mm/s 42.

Tutte le considerazioni espresse a proposito delle precisioni della fotogrammetria nelle operazioni di restituzione sono riferite alle esperienze maturate negli anni in special modo con l'utilizzo di fotogrammi analogici e restitutori analitici. L'uso di fotogrammi analogici digitalizzati e restitutori digitali oppure l'utilizzo di fotogrammi già direttamente acquisiti in formato digitale non ha ancora offerto materiale ed esperienza sufficiente per generare parametri universalmente accettati di precisione attendibile in fase di restituzione.

In questi casi si fa affidamento su esperienze analoghe già effettuate e correttamente documentate anziché a prove dirette di affidabilità da decidere e valutare di volta in volta.

¹⁶ Rüdener, H.: Comunicazione libera, XIV Congresso ISP, Hamburg, 1980

¹⁷ Schneider, H.: BuL 37, 209-214, 1969

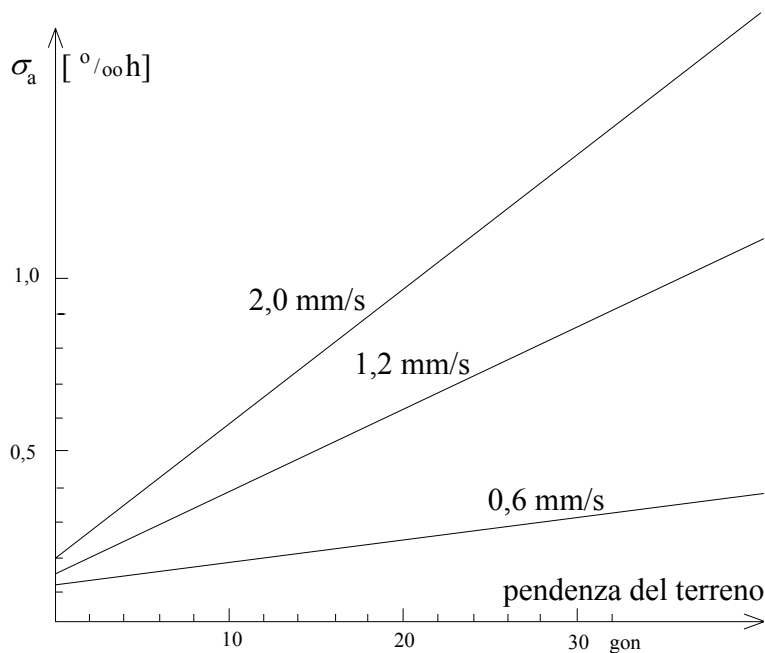


Figura 93 - Errore di scansione σ_a in funzione della pendenza del terreno e della velocità di scansione sul fotogramma

4.7 La Fotogrammetria diretta

L'espressione fotogrammetria diretta fa riferimento alla più generale georeferenziazione diretta (in inglese *direct georeferencing*) che indica una qualunque modalità di rilevamento del territorio in cui l'orientamento esterno del sensore viene misurato direttamente. Parlare di fotogrammetria diretta, però, non rappresenta di per sé un'evoluzione, anzi, già ad essa si faceva riferimento in ambito terrestre agli albori di tale disciplina quando all'atto della presa si procedeva anche al rilievo di coordinate dei centri di presa e dell'assetto angolare dell'asse ottico della camera mediante l'uso di fototeodoliti.

Tale tecnica rappresenta in effetti il modo più naturale per risolvere le equazioni di collinearità, base della tecnica fotogrammetrica, in cui tali termini (i parametri di orientamento esterno), come vedremo in seguito, compaiono esplicitamente.

La fotogrammetria aerea, a causa della maggiore complessità delle tecniche di presa, ha costretto, fino ad ora, a rinunciare alla conoscenza a priori di questi dati includendoli tra le incognite del problema e ricavandoli in maniera indiretta, costringendo a onerose operazioni sul terreno per il rilievo dei punti d'appoggio e lunghe fasi di orientamento (triangolazione fotogrammetrica) preliminari alla restituzione.

Questi procedimenti hanno da sempre costituito un punto debole della tecnica fotogrammetrica, dati gli ingenti investimenti di tempo necessari per la realizzazione dei rilievi, basati su reti geodetiche rilevate sul terreno con l'ausilio di teodoliti e attrezzature tradizionali o più recentemente mediante GPS.

Recenti sviluppi della tecnica hanno portato a grosse novità per la fotogrammetria prospettando il suo radicale ripensamento, permettendo di evitare completamente, in linea teorica, la prima fase di calcolo dei parametri di orientamento. Attualmente, sono disponibili, infatti, attrezzature in grado di fornire precisioni, nella misura di posizione e orientamento di oggetti in moto, finora insperate, dato il livello di complicazione del problema. L'accoppiamento di tecniche GPS cinematiche, a cui è demandato il rilievo del posizionamento, e tecniche di na-

vigazione inerziale basate sull'uso di giroscopi, per il rilievo degli angoli di orientamento della camera rispetto all'asse di rotazione terrestre, rappresenta una soluzione accreditata e che fornisce notevoli speranze.

La fotogrammetria viene in questo modo riportata tra le tecniche di rilievo dirette, nelle quali l'orientamento esterno del sensore misurato direttamente e non ricavato, come avvenuto finora, attraverso processi di tipo indiretto.

4.7.1 Descrizione del sistema

Il sistema di georeferenziazione diretta, utilizzato anche negli apparati di scansione laser montati su aereo o elicottero, è schematizzato in Figura 94.

Le componenti principali sono tre:

- una camera fotogrammetrica di tipo analogico (2.3.4) o digitale (2.4.6);
- un sistema GPS (2.6.2-2.6.4) composto da almeno due ricevitori, uno a terra (ad esempio una stazione permanente) e uno montato sul velivolo che permette di determinarne la posizione assoluta nel sistema UTM-WGS-84 (e per conversione negli altri sistemi riferimento geografici o cartografici);
- una piattaforma inerziale montata sul velivolo in grado di determinarne l'assetto angolare durante il volo.

Le tre componenti del sistema devono essere opportunamente integrate e sincronizzate durante il volo in modo da fornire i dati corretti alla georeferenziazione delle immagini acquisite dalla camera fotogrammetrica.

In Figura 95 è possibile osservare un esempio di questi sistemi prodotto dalla ditta Applanix: si notino la camera fotogrammetrica analitica (a sinistra dotata di cinederivometro), l'antenna GPS da montare sul velivolo (al centro in basso) e il rack contenente la piattaforma inerziale e l'elettronica di controllo del sistema (in alto a destra).

Tali elementi sono sostanzialmente separati e posizionati sull'aereo ovviamente in posizioni non coincidenti, come indicato in Figura 96:

l'antenna GPS è posizionata all'esterno sopra la cabina del velivolo per consentire la ricezione dei segnali inviati dai satelliti;

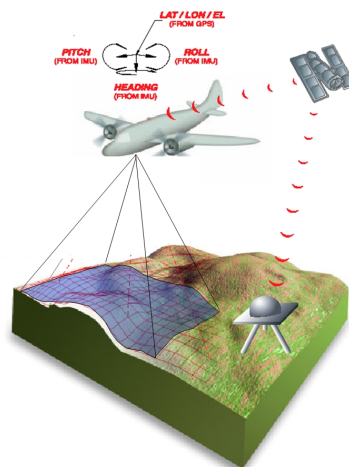


Figura 94 - Schema del sistema per la fotogrammetria aerea diretta



Figura 95 - Il sistema Applanix con camera fotogrammetrica analogica

il sensore IMU è posizionato sulla struttura esterna della camera fotogrammetrica in una posizione che non coincide con il centro di presa (interno all'obiettivo della camera).

E' necessario pertanto effettuare una opportuna calibrazione del sistema al fine di conoscere le posizioni relative dei vari apparati rispetto al centro di presa della camera fotogrammetrica e le rotazioni presenti tra il sistema inerziale e il sistema interno della camera fotogrammetrica. Tale operazione viene generalmente svolta mediante opportuni poligono di calibrazione con frequenza annuale.

Nei paragrafi seguenti verranno descritti gli aspetti salienti delle componenti del sistema, i principi di funzionamento e le precisioni raggiungibili.

4.7.2 Il posizionamento GPS

Il sistema di posizionamento "NAVSTAR GPS" ("NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System") si basa su un concetto di base molto semplice e noto alla Topografia con il nome di trilaterazione, o, più in particolare, di intersezione spaziale distanziometrica, in base al quale si può determinare la posizione di un punto in un sistema di riferimento misurando la distanza tra questo ed alcuni punti di coordinate note.

In particolare per rendere il sistema estendibile il più possibile ed applicabile in ogni posto dislocato sulla Terra vengono usati come punti a coordinate note quelli occupati da un sistema di satelliti messi in orbita appositamente.

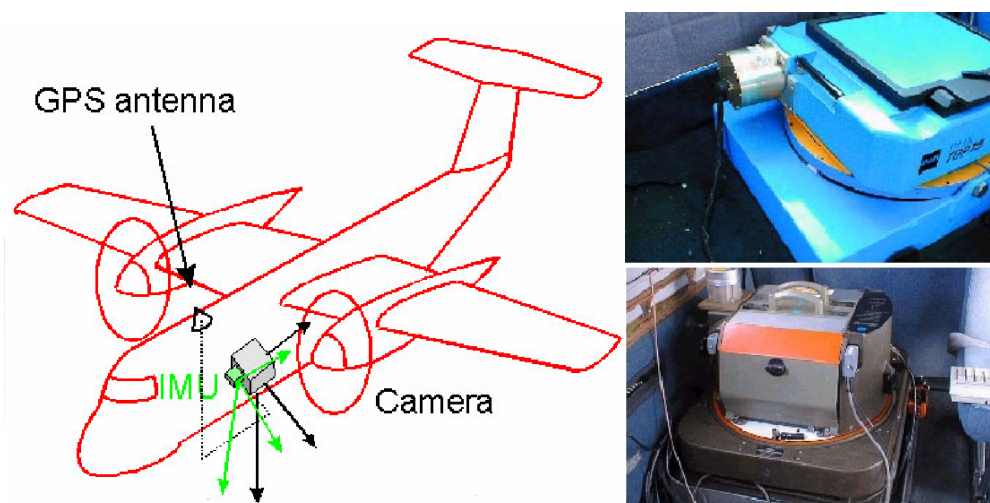


Figura 96 - Posizione dei vari sensori in relazione al velivolo e sistemi di riferimento

Il sistema nel suo complesso consta di tre parti o segmenti:

- Segmento spaziale: parte che opera nello spazio, costituita dalla costellazione dei satelliti
- Segmento di utilizzo: insieme dei ricevitori terrestri che ricevono ed elaborano il segnale proveniente dai satelliti
- Segmento di controllo: insieme delle stazioni di monitoraggio che effettuano un costante controllo dei satelliti e delle loro orbite e forniscono agli stessi satelliti le informazioni necessarie.

Il posizionamento avviene secondo una tecnica di “intersezione spaziale distanziometrica” riferita all’ellissoide geocentrico WGS84 (“World Geodetic System 1984”).

Supposte note le posizioni dei satelliti in tale sistema le coordinate incognite del vertice i sono legate alle coordinate note del satellite j tramite la misura di un numero sufficiente di distanze ρ_i^j tra satelliti e centro di fase dell’antenna del ricevitore in stazione su i espresse dalla formula:

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad (51)$$

secondo quanto illustrato nella Figura 97.

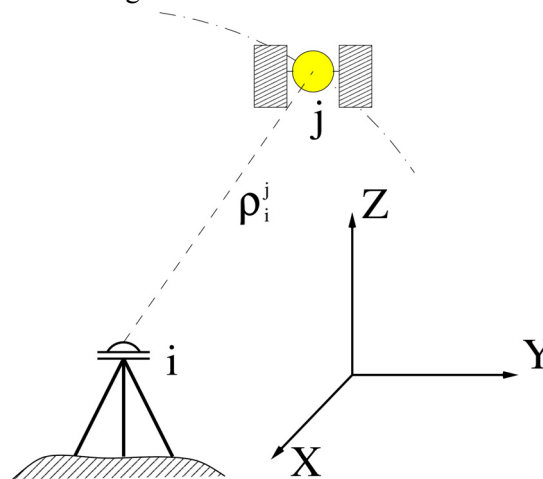


Figura 97 - Range geometrico

La valutazione della distanza avviene inoltre attraverso due diverse interpretazioni del segnale dell’onda elettromagnetica che giunge dal satellite al ricevitore.

La prima avviene attraverso misure di codice in base alle quali viene determinato il tempo di percorrenza dell’onda. Il segnale trasmesso dal satellite è opportunamente codificato e sincronizzato con i ricevitori in modo da generare lo stesso medesimo codice nello stesso tempo. In questo modo attraverso un semplice confronto tra il segnale ricevuto e quello generato è possibile determinare il ritardo tra i due e quindi il tempo di percorrenza della traiettoria satellite-ricevitore da parte dell’onda.

La precisione con cui tale distanza viene determinata dipende anche dalla tipologia di codice a cui si fa riferimento: ne esistono infatti due tipi, denominate C/A e P che, in assenza di altri errori di posizionamento, forniscono rispettivamente precisioni di posizionamento in tempo reale ± 10 m e ± 0.30 m (di uso strettamente militare).

La tipologia degli strumenti usati, e quindi la loro conseguente precisione, determinano ulteriori importanti conseguenze sulla qualità della misura effettuata.

I satelliti in orbita, infatti, sono tutti equipaggiati con costosi orologi atomici, le cui misure di tempo sono basate su oscillazioni atomiche di particolari atomi (tipicamente Cesio e Rubi-

dio), ed in grado di raggiungere precisioni di qualche ns (nanosecondo = 10^{-9} s), che comportano errori sulla determinazione delle distanze di circa 30 cm, tenendo conto di una velocità di percorrenza dell'onda pari a quella della luce (circa 300000 Km/s).

Gli orologi dei ricevitori sono invece normalmente al quarzo e possono essere considerati sincronizzati con un errore pari a qualche ms, il che induce, invece, ad un ben maggiore errore di circa 300 m sulla determinazione della distanza ρ tra satellite e ricevitore.

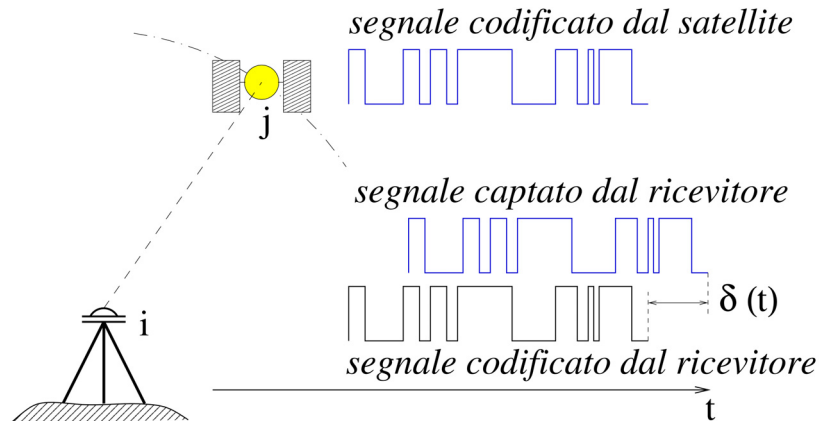


Figura 98 - Misura di codice

Anche se la stabilità degli orologi posti sui satelliti, porta ad errori tutto sommato accettabili, soprattutto se considerati in percentuale, così non è per quelli dovuti all'uso di orologi al quarzo nei ricevitori del segnale. Per questo motivo è necessario introdurre tra le incognite, e per ogni epoca di misura, un valore incognito di distanza dovuto all'asincronizzazione temporale tra satelliti e ricevitore $\delta_i(t)$ che porta a quattro le incognite (X, Y, Z, $\delta_i(t)$) e quindi alla necessità di disporre di almeno quattro misurazioni di distanza satellite-ricevitore.

In questo modo è possibile ricavare la posizione tridimensionale del ricevitore in tempo reale, ovvero senza la necessità di sostare sul punto da posizionare per lungo tempo che ovviamente nel caso di applicazioni cinematiche (con ricevitore in movimento) non sarebbe accettabile.

E possibile, in alternativa, avvalersi di misure di fase dell'onda portante del segnale. Questa procedura si basa sul confronto fra la fase della frequenza portante del segnale ricevuto e la fase della frequenza di un simile segnale generato dall'oscillatore interno del ricevitore dei quali viene misurata la differenza di fase.

Il modello matematico di tali misure, dato un ricevitore posizionato in i e agganciato un satellite j, è fornito dalla seguente equazione:

$$\Phi_i^j = \frac{1}{\lambda} \rho_i^j + N_i^j + f^i \Delta \delta_i^j(t) \quad (52)$$

dove:

- Φ_i^j è la differenza di fase espressa in cicli;
- λ è la lunghezza d'onda;
- ρ_i^j è il range geometrico tra i e j (descritto in Figura 97);
- N_i^j è l'ambiguità di fase o numero intero di lunghezze d'onda per cui è possibile dividere il range geometrico;



- f^j è la frequenza del segnale del satellite;
- $\Delta\delta_i^j = \delta^j - \delta^i$ la combinazione degli errori d'orologio (o bias) del satellite j e del ricevitore j .

Quando il ricevitore GPS riceve la prima del treno d'onde emesso dal satellite esso è in grado di misurare la porzione d'onda in arrivo ma non può dirci quante onde intere N_i^j (ambiguità di fase) sono state emesse dal momento che quel segnale ha lasciato il satellite per coprire la distanza fino al ricevitore.

Anche in questo caso per risolvere l'ambiguità e determinare tale nuova incognita si ricorre all'impostazione di un sistema mediante un numero sufficiente di osservazioni, prevedendo di effettuare osservazioni per un certo numero di epoche (ovvero ripetendo la misura ogni 5-15 secondi). Con il numero di epoche = 1 (ricevitore in movimento), è dimostrabile che non è possibile determinare in tempo reale le ambiguità di fase: tale tecnica non è pertanto applicabile direttamente al caso cinematica.

Per poter applicare la tecnica di rilievo satellitare alle esigenze di mobilità, o più che altro di impossibilità di stazionamento, della fotogrammetria sono però necessari ancora alcuni passi nel trattamento dei dati..

4.7.2.1 Il GPS differenziale

Se si concentra l'attenzione non sul posizionamento assoluto di punti ma sulla ricerca della base-line, ovvero del vettore che unisce due vertici, è possibile eliminare errori sistematici presenti nelle osservazioni e supplire con la trattazione matematica ai limiti della tecnica del posizionamento assoluto.

Se consideriamo due ricevitori sui vertici A e B, che osservano simultaneamente un satellite j tracciato da entrambi con continuità, è possibile scrivere due relazioni come le precedenti separando i contributi degli orologi satellitari e del ricevitore. Differenziando le due equazioni si ottiene l'equazione delle singole differenze in cui si ottiene l'eliminazione del contributo di errore legato all'asincronismo dell'orologio satellitare comune ad entrambe le equazioni avendo considerato per ipotesi uno stesso satellite agganciato da due ricevitori.

In analogia, se consideriamo, invece, che i due ricevitori in A e B osservino simultaneamente due satelliti, è possibile scrivere in totale quattro equazioni di fase e due equazioni alle singole differenze, queste ultime differenziate a loro volta forniscono un'equazione detta alle doppie differenze. In questo modo, come si vede, vengono eliminati anche i termini legati agli errori di asincronismo degli orologi dei ricevitori.

Per eliminare le ambiguità di fase, invece ancora incognite, si ricorre ad una tecnica leggermente diversa facendo riferimento a due epoche differenti, essendo le ambiguità di fase indipendenti dal tempo per cui è possibile ottenere due equazioni alle doppie differenze. Se i termini di ambiguità tra le due osservazioni si mantengono costanti, se, cioè, non si hanno interruzioni del segnale (anche dette *cycle slip*) è possibile scrivere l'equazione alle triple differenze eliminare così anche le ambiguità di fase, ultime incognite rimaste.

4.7.2.2 Il GPS cinematico

Il caso di rilievo GPS direttamente applicabile alla fotogrammetria è quello denominato cinematico relativo in cui un ricevitore occupa un vertice A su cui rimane fisso per tutta la durata delle misure, mentre un secondo, di cui è da determinare la posizione ad ogni epoca di misura, si muove. In particolare nel caso fotogrammetrico quest'ultimo sarà montato sull'aereo per le riprese in modo da determinare in maniera diretta i centri di presa dei singoli fotogrammi.



In tal caso con una piccola modifica all'equazione precedentemente analizzata in cui anche le coordinate del ricevitore mobile dipendono dal tempo:

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i(t))^2 + (Y^j(t) - Y_i(t))^2 + (Z^j(t) - Z_i(t))^2} \quad (53)$$

Anche in questo caso è possibile scrivere per ogni epoca di misura le equazioni alle singole e doppie differenze. Le triple differenze, invece, possono essere usate nel caso cinematico una volta note le coordinate della stazione mobile B ad un'epoca di riferimento, tipicamente quella di partenza, la cui base-line, detta in questo caso *starting vector*, è determinata in maniera statica.

Per l'applicazione fotogrammetrica occorre ancora considerare che:

- il centro di fase dell'antenna non coincide col centro di presa della camera. E' necessario perciò procedere alla calibrazione del sistema complessivo dei sensori determinando l'eccentricità spaziale del centro di fase dell'antenna del ricevitore rispetto ad un sistema solidale alla camera;
- l'istante di presa non coincide con quello in cui viene acquisita la misura GPS. E' necessario quindi realizzare un sincronismo tra camera e ricevitore GPS per la registrazione dell'istante di presa nella scala temporale del GPS. Solo le camere di più recente costruzione, però, possono essere interfacciate ai ricevitori GPS e per quelle non predisposte a tale scopo la posizione dei centri di presa al momento dello scatto la si ricava per interpolazione delle posizioni fornite dal GPS a intervalli costanti;
- la programmazione del volo deve tenere presenti sia le esigenze legate all'ottenimento di buone fotografie sia le esigenze proprie del rilevamento GPS cinematico che, come si è visto, richiede la costante disponibilità di un numero sufficiente di satelliti: è necessario, perciò, limitare le interruzioni del segnale dovuti ad ostruzioni che potrebbero essere causate anche dall'aereo stesso in occasione delle virate necessarie, per esempio, da una strisciata alla successiva, o ancora per altre indispensabili manovre.

4.7.2.3 La piattaforma inerziale

Per la completa eliminazione, almeno in linea teorica, dei punti di controllo e della triangolazione aerea per l'orientamento dei blocchi fotogrammetrici, è per lo meno necessaria, secondo quanto visto nella prima parte, anche la determinazione dell'assetto angolare della camera al momento della presa oltre al suo posizionamento assoluto di cui abbiamo appena discusso.

Gli strumenti per la misura di angoli di rotazione di un corpo nello spazio si basano su principi inerziali e sono detti giroscopi o girobussole data la loro sensibilità alla rotazione terrestre grazie alla quale sono in grado di individuare la direzione dell'asse di rotazione terrestre e quindi la direzione del Nord geografico.

I giroscopi di tipo classico composti da corpi posti in rotazione sono stati oggi abbandonati e sostituiti da più efficienti giroscopi ottici basati su un principio noto come effetto Sagnac, dal nome del fisico francese che lo scoprì nel 1913.

Tale tecnica consiste nello sdoppiare un unico raggio luminoso in due diversi raggi, i quali viaggiano su un medesimo percorso ottico ad anello chiuso, ma in direzioni opposte, ovvero uno in senso orario e uno in senso antiorario.

Lo schema presentato (Figura 99) è quello di un giroscopio laser ad anello (RLG: Ring Laser Gyro) che meglio si presta ad una trattazione teorica rispetto ai più moderni giroscopi a fibra ottica (FOG: Fiber Optic Gyro), i quali comunque non presentano sostanziali differenze rispetto ai principi applicati.

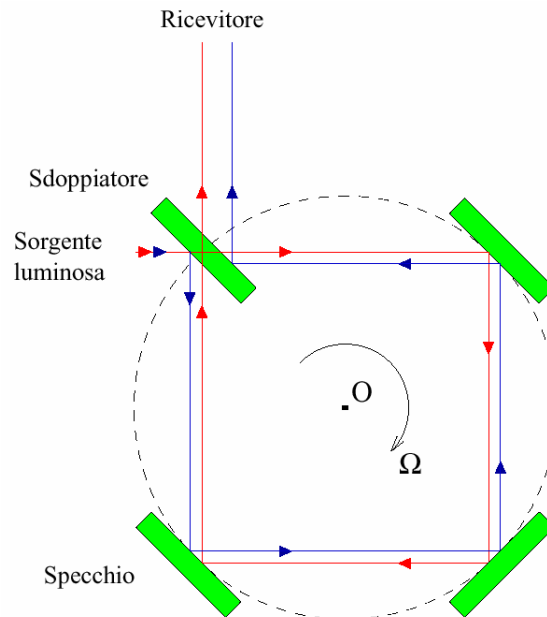


Figura 99 - Schema di giroscopio laser ad anello

Nei giroscopi laser ad anello si ha un raggio laser che viene sdoppiato mediante una lastra di vetro posta sulla traiettoria dello stesso raggio con inclinazione di 45° rispetto alla sua direzione. In questo modo la parte di raggio riflessa viene deviata di un angolo retto, mentre la parte rifratta non subisce deviazioni. A questo punto mediante un sistema di specchi si fa percorrere ai raggi un percorso identico ma in senso contrario l'uno rispetto all'altro e li si fa convergere verso un ricevitore a fotodiode in grado di misurare la differenza di fase dei due raggi.

Quando un raggio luminoso si propaga la sua fase cambia proporzionalmente alla distanza (L) percorsa ed in modo inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda (λ) secondo la legge:

$$\alpha = \frac{2\pi L}{\lambda} \quad (54)$$

con $\lambda=c/f$, dove f è la frequenza del raggio luminoso e c la velocità della luce.

Nel caso in cui il giroscopio sia fisso rispetto ad un sistema di riferimento inerziale i due raggi percorrono lo stesso cammino, anche se in direzioni opposte, arrivando perciò al ricevitore con la stessa fase. Se invece l'intero sistema è posto in rotazione attorno ad un asse passante per il centro (O) di simmetria del percorso ad anello, detto asse sensibile del giroscopio, il percorso del raggio concorde con il verso di rotazione tende ad allungarsi mentre quello del raggio che percorre l'anello in senso discorde tende ad accorciarsi, in questo modo i due raggi arriveranno al ricevitore con una differenza di fase (Φ) non più nulla ma linearmente dipendente dalla stessa velocità angolare del giroscopio, infatti, detto ω l'angolo percorso nel tempo $\Delta t=L/c$ si avrà:

$$\Delta L = R\omega = \frac{R\Omega L}{c} \quad (55)$$

da cui si ottiene:

$$\phi = \Delta\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta L = \frac{2\pi LD}{c\lambda} \Omega \quad (56)$$

dove:

- L = lunghezza del percorso ottico
- D = diametro del percorso
- Ω = velocità angolare del giroscopio attorno al suo asse sensibile

L'indice di proporzionalità tra differenza di fase Φ e velocità angolare Ω è detto anche fattore di scala e rappresenta la sensibilità dello strumento, per cui più alto è tale fattore più lo strumento è in grado di misurare velocità angolari molto basse, come nel caso della rotazione terrestre.

L'uso di fibre ottiche che costringono al loro interno la propagazione del fascio luminoso, ha permesso di incrementare, quasi a piacimento il fattore di scala allungando il percorso L, permettendo di ottenere grandi precisioni e strumentazioni dalle dimensioni contenute. Per un diametro D = 8 cm dell'elemento sensibile, infatti, si possono avere percorsi ottici anche fino a 5 km.

Se i segnali in partenza hanno pari ampiezza di entità:

$$s_1 = s_2 = S_0 \sin \omega t \quad (57)$$

al termine dei due percorsi, trascurando eventuali attenuazioni, come visto, si saranno differenziati come segue:

$$s_1 = S_0 \sin(\omega t - a_1) \quad s_2 = S_0 \sin(\omega t - a_2) \quad (58)$$

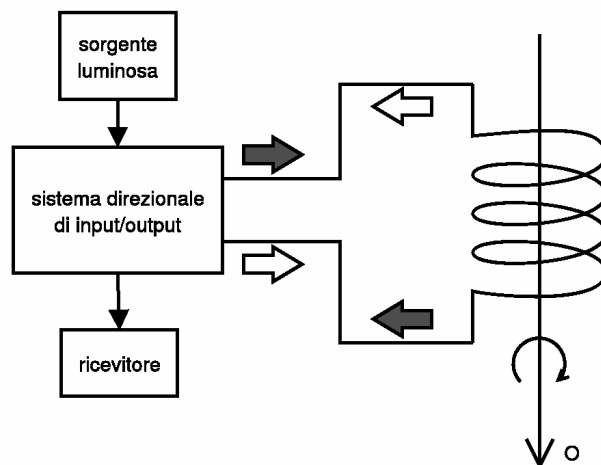


Figura 100 - Schema di giroscopio a fibre ottiche

e nel caso di onde coerenti, quindi polarizzate sullo stesso piano, l'ampiezza dell'onda risultante è data dalla semplice somma algebrica delle espressioni precedenti e riconduce alla equazione:

$$s = S_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\Phi}{2}\right) \quad (59)$$

avendo posto:

$$S_{\max} = 2S_0 \cos\left(\frac{\Phi}{2}\right)$$

l'ampiezza massima dell'onda composta e

$$\Phi = \alpha_1 - \alpha_2$$

l'effetto Sagnac.

L'intensità massima dell'onda risultante è proporzionale al quadrato delle ampiezze:

$$I = kS_{\max}^2 = k4S_0^2 \cos^2 \frac{\Phi}{2} = I_0 \cos^2 \frac{\Phi}{2} = I_0 \frac{1 + \cos \Phi}{2} \quad (60)$$

dove I_0 è il massimo dell'intensità luminosa raggiunta per $\Phi=0$ (ottenuta con segnali in fase e giroscopio fermo rispetto ad un sistema di riferimento inerziale), mentre l'intensità minima $I_0=0$ si ha per $\Phi=\pm\pi$.

L'espressione dell'intensità del segnale ora presentata, come si può notare in Figura 101, è di tipo cosinusoidale rispetto alla differenza di fase Φ , il che porta a due importanti conseguenze:

una scarsa sensibilità alle basse velocità dovuta alla pendenza nulla nell'origine;

un'impossibilità di rilevare il verso di rotazione del giroscopio, dovuta alla forma simmetrica della curva rispetto all'asse delle ordinate.

Per risolvere entrambi i problemi, ad una estremità della bobina viene inserito un modulatore di fase piezoelettrico che modula i segnali luminosi producendo in uscita una variazione di fase variabile con legge sinusoidale rispetto a Φ e di ampiezza pari a $\pi/2$. In tal modo si ottiene la massima sensibilità nell'origine e si risolve contemporaneamente il problema dell'ambiguità del verso di rotazione del giroscopio.

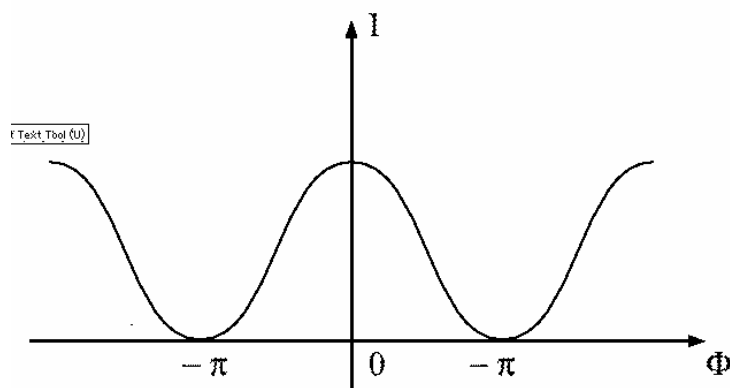


Figura 101 - Relazione tra corrente in uscita dal fotodiodo e differenza di fase tra i due segnali

Di per sé, il tipo di giroscopio descritto, non è in grado, da solo, di indicare la direzione del Nord come nei normali giroscopi di tipo meccanico con sospensione cardanica, se non unicamente la componente della velocità angolare terrestre lungo il suo asse di sensibilità.

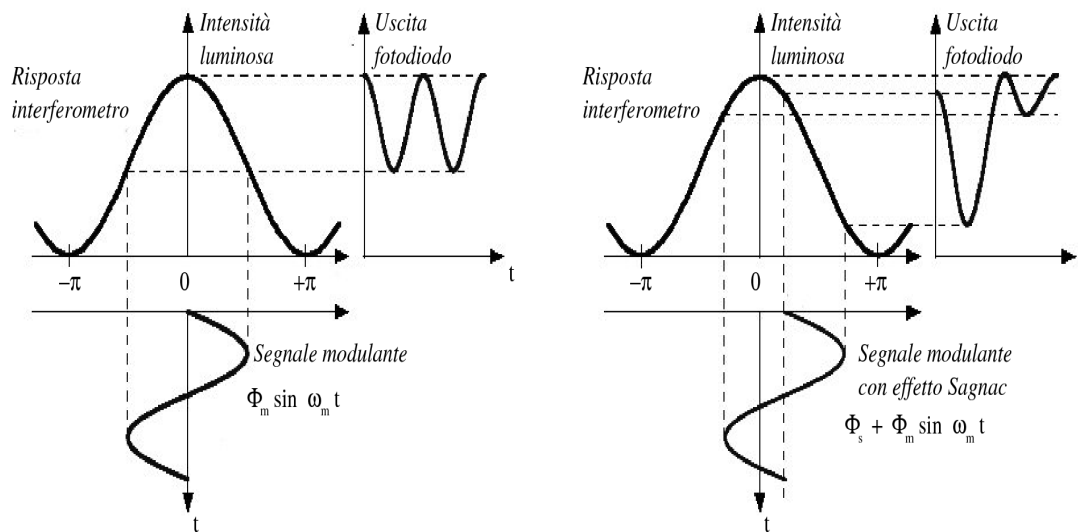


Figura 102 - Segnali in uscita dal fotodiode nel caso di giroskopio fermo (a) e in rotazione (b)

E' necessario perciò affiancare ad esso altri due giroscopi dello stesso tipo per poter impostare il seguente sistema rappresentante il caso di sistema solidale al riferimento terrestre:

$$\begin{cases} \rho_x = \rho_T \cos \Phi \cos P_v \\ \rho_y = -\rho_T \cos \Phi \sin P_v \\ \rho_z = \rho_T \sin \Phi \end{cases} \quad (61)$$

da cui è facile ricavare l'angolo di prora P_v , nel caso siano note la velocità di rotazione terrestre ($\rho_T = 2\pi / (23^h 56^m 04^s)$) e la latitudine (Φ), che può essere ricavata, per esempio, mediante ricevitore GPS.

Nel caso generale sono da aggiungere alle tre precedenti componenti altre velocità angolari continuamente variabili dovute ai moti autonomi del sistema attorno ai suoi tre assi sensibili:

$$\begin{cases} \rho_x = \rho_T \cos \Phi \cos P_v + \rho_r \\ \rho_y = -\rho_T \cos \Phi \sin P_v - \frac{V_n}{R_T} + \rho_b \\ \rho_z = \rho_T \sin \Phi + \rho_a \end{cases} \quad (62)$$

Calibrato il sistema di misura su una posizione iniziale convenzionale, in cui si fa coincidere l'asse strumentale delle ascisse con la direzione Nord, quello delle ordinate con la direzione Est e l'asse delle quote con la verticale perpendicolare al piano definito dagli assi precedenti (secondo una terna destrorsa), nella quale i segnali provenienti dai sensori di livello devono essere nulli, la continua misura dell'assetto mediante tali sensori di livello consente di definire l'esatto orientamento della terna cartesiana $T(X, Y, Z)$ del sistema rispetto alla terna di riferimento iniziale $T_0(X_0, Y_0, Z_0)$.

4.7.3 Accelerometri e loro principi di funzionamento

Un accelerometro è uno strumento che misura le variazioni di velocità basate su principi inerziali appunto, per semplificare la trattazione si illustra di seguito un esempio didattico

semplificato configurato come in Figura 103, rappresentato da una massa sospesa collegata a due molle.

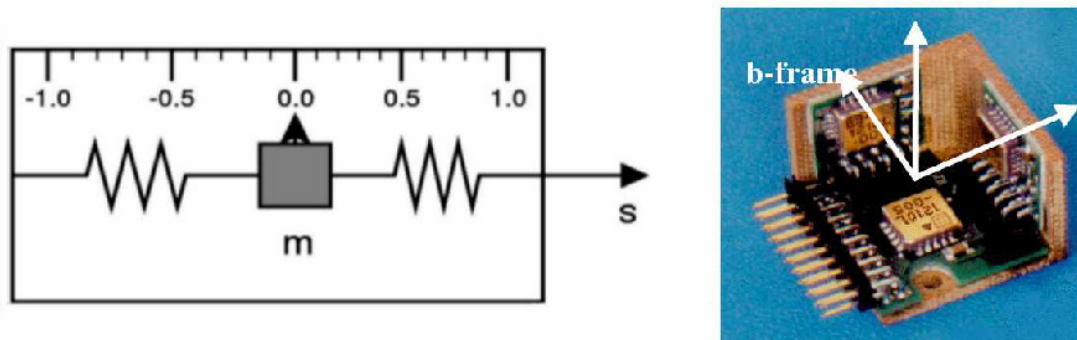


Figura 103 - Schema di un accelerometro (a) ed esempio di accelerometro triassiale (b)

La direzione dell'asse "s" indica la direzione dell'asse sensibile, lungo la quale una accelerazione provoca uno spostamento della massa, rispetto alla sua posizione di equilibrio, proporzionale alla accelerazione subita dalla massa stessa.

Anche in questo caso affiancando tre accelerometri disposti lungo i tre assi del sistema di riferimento solidale con l'oggetto in movimento è possibile effettuare rilievi delle caratteristiche di moto, quali accelerazione, velocità e direzione di moto nello spazio.

Nella Figura 103b è rappresentato un moderno accelerometro cui le misure di variazioni di velocità sono demandate ad un più moderno e affidabile circuito integrato. Vedremo in seguito quale è l'uso degli accelerometri nel caso in esame.

Strumentazioni per la misura di angoli

Le strumentazioni disponibili per le misure inerziali di angoli di orientamento si differenziano in tre categorie, caratterizzate principalmente dal diverso output di sistema, oltre che dalla diversa precisione ottenibile:

- **ISA** (*Inertial Sensor Assembly*), sistema che restituisce i dati direttamente ottenuti da sistema di misura inerziale;
- **IMU** (*Inertial Measurement Unit*), sistema che restituisce i dati ottenuti da sistema inerziale una volta sottoposti a compensazione di errori quali il fattore di scala e la deriva;
- **INS** (*Inertial Navigation System*), sistema identico all'IMU precedentemente descritto il cui output viene processato attraverso algoritmi di navigazione in modo da ottenere anche i dati relativi al posizionamento, alla velocità, all'assetto angolare e alla direzione di moto. L'unità fornisce anche i dati grezzi compensati, i quali possono essere usati con fini di controllo e stabilizzazione.

In Tabella 21 sono riassunte le caratteristiche di precisione di tali strumentazioni.

Come si può notare, a prescindere dalla tipologia di strumentazione, esiste un grosso problema comune: gli errori di misura degli angoli, da cui dipende la precisione nella determinazione della posizione spaziale, dipendono dal tempo, in particolare crescono a partire dal momento iniziale della campagna di rilievo; tale fenomeno è noto col nome di "deriva".

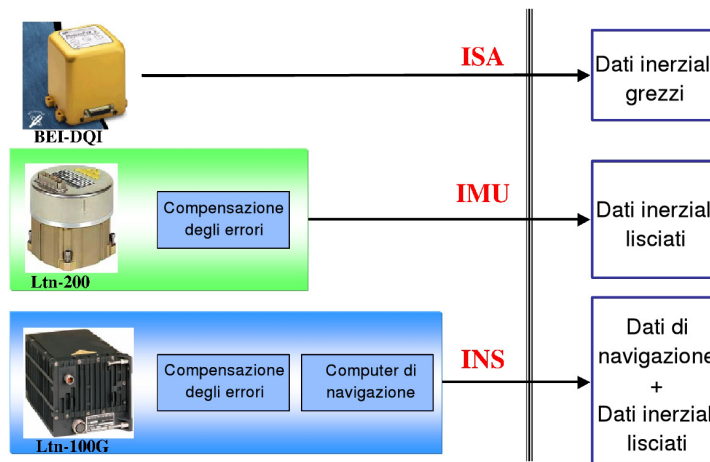


Figura 104 - Classificazione strumentazione per le misure inerziali

Applicazioni	strategiche	di navigazione	tattiche
	(INS)	(INS or IMU)	(IMU or ISA)
Errori di posizionamento	< 30 m/h	925.5÷3702 m/h	18510÷37020 m/h
Deriva del giroscopio	10-4 deg/h	1.5 * 10 ⁻² deg/h	1-10 deg/h
Errori dell'accelerometro	1 µg	50÷100 µg	100÷1000 µg

Tabella 21 - Classificazione dei sistemi inerziali in funzione della precisione

Addirittura un errore di deriva non compensato (usualmente espresso in deg/s o rad/s) nei giroscopi con asse sensibile lungo gli assi X o Y, introduce un errore nella valutazione nell'angolo di rollio o beccheggio proporzionale al tempo che causa un disallineamento del sistema INS e quindi una proiezione del vettore accelerazione nella direzione sbagliata.

Questo introduce una accelerazione addizionale lungo l'orizzontale, per cui si può concludere che una misura del giroscopio affetta da deriva introduce un errore proporzionale al quadrato del tempo nella determinazione della velocità e proporzionale al cubo del tempo nella determinazione della posizione.

La misura di angoli attraverso giroscopi risulta, perciò, affidabile unicamente per intervalli di tempo molto brevi, durante i quali si può ancora considerare l'entità dell'errore di misura trascurabile per gli scopi prefissati. È necessario perciò entro tali intervalli di tempo "azzerare" i giroscopi correggendo la misura mediante l'integrazione con altri sistemi.

	Giroscopio	Accelerometro
Errore sistematico	1 deg/h	0.3 mg
Stabilità di misura	<0.1 deg/h	35µ
Fattore di scala	100 ppm	350 ppm
Movimento casuale	0.07 deg/ \sqrt{h}	60 µg/ \sqrt{hz}
Errore di non ortogonalità	0.1 mrad	0.2 mrad

Tabella 22 - Prestazioni di sistemi IMU

Come visto il sistema di tre giroscopi può essere considerato in linea teorica un sistema di navigazione a tutti gli effetti, data la possibilità matematica di ricavare dalle misure dirette effettuate i valori di accelerazione, velocità, posizionamento e orientamento spaziale. Confrontando i dati di posizionamento con quelli ottenuti da sistema più affidabile è possibile a questo punto individuare quando gli errori di misura del sistema inerziale diventano troppo



grossolani e riportarli entro i limiti accettabili attraverso un calcolo inverso degli angoli di orientamento.

Il sistema ideale con cui effettuare il confronto tra quelli disponibili esaminati è certamente il GPS, data la stabilità e precisione delle misure; tuttavia si tiene aperta anche la strada di confronto con il sistema di navigazione inerziale degli accelerometri data la sensibilità del sistema GPS alle perdite di segnale proveniente da satellite e comunque la maggiore affidabilità di tale sistema rispetto a quello dei giroscopi.

Viste le singole tecniche di rilievo, esamineremo nel prossimo capitolo le prestazioni del sistema integrato INS/GPS e le possibilità tecniche della fotogrammetria diretta.

4.7.4 Integrazione GPS-INS

Un primo passo per l'integrazione dei sistemi di rilievo illustrati finora consiste, innanzi tutto, nella sincronizzazione dei dati raccolti.

Bisogna notare infatti che ognuna delle strumentazioni ha una propria frequenza di rilievo che non necessariamente è la stessa delle altre, né talvolta può esserlo per impossibilità tecniche. È necessario a questo punto trattare i dati in modo da far corrispondere i dati rilevati a quelli relativi al momento dello scatto fotografico, visto che per risolvere i problemi di orientamento dei fotogrammi tali dati devono riferirsi al centro di presa nel momento in cui la fotografia aerea viene scattata, secondo quanto visto nella trattazione delle equazioni di collinearità.

Per l'interpolazione dei risultati esistono diversi metodi, dai tradizionali minimi quadrati al più complesso filtro di Kalman che permettono comunque di risolvere il problema.

L'utilizzo di accelerometri e l'aggiornamento dei dati relativi a posizione e velocità da essi ricavati mediante tecniche indipendenti, quali il GPS, ne ha permesso l'eliminazione o la drastica riduzione. Nel contesto attualmente in discussione l'integrazione di un sistema di navigazione inerziale (INS: Inertial Navigation System) con uno di posizionamento globale (GPS) va vista come una tecnica di autocalibrazione per i giroscopi e di interpolazione ad alta frequenza delle posizioni assolute ricavate da GPS, a intervalli regolari ben più ampi. L'influenza degli errori sui valori iniziali tende infatti a scomparire già dopo pochi aggiornamenti dei posizionamenti e in questo modo un sistema GPS/INS, se ben integrato, trova e corregge i propri errori prima dell'elaborazione dei dati.

Data l'accuratezza delle missioni aeree dell'A.P.R.S. (Airborne Photogrammetry and Remote Sensing) e la robustezza della tecnologia inerziale gli errori sulle osservazioni dei giroscopi sono per lo più da addebitarsi a malfunzionamenti tecnici dell'unità di controllo inerziale (IMU: Inertial Measurement Unit) mentre gli errori sistematici dipendono da come è materializzata l'ortogonalità degli assi dei giroscopi nel loro assemblaggio.

4.7.5 Prestazioni della fotogrammetria diretta

Le tecniche GPS-inerziali integrate, dati i risultati comunque incoraggianti ottenuti dalla sperimentazione, sono state, in questi anni, uno dei principali argomenti nell'ambito fotogrammetrico internazionale. Fin dal 1998, presso l'Istituto per la Fotogrammetria (IFP, ovvero Institut für Photogrammetrie) di Stoccarda, sono stati effettuati test per la valutazione delle potenzialità e della precisione di tali tecniche dove l'obiettivo principale era quello di realizzare sistemi commerciali che accoppiassero l'uso di sistemi GPS inerziali integrati con camere fotogrammetriche analogiche standard.

I risultati riportati in seguito fanno riferimento al test O.E.E.P.E. (vedi bibliografia) effettuate in sito sperimentale controllato nelle vicinanze della città di Stoccarda su un'area di lati 7 km e 5km.



Il volo consiste in un insieme di cinque strisciate, due delle quali sono state volate due volte, formate da fotogrammi con scala media pari a 1:10000. Tutti gli ottantacinque fotogrammi catturati con camera fotogrammetrica digitale con obiettivo grandangolare presentano una sovrapposizione sia longitudinale che trasversale pari al 60%. Per una georeferenziazione di alta qualità è stato impiegato un sistema GPS-INS integrato in cui si è applicata la correzione degli angoli di orientamento come visto precedentemente.

Sull'area in esame sono stati inoltre individuati i punti di controllo per l'applicazione della fase di triangolazione aerea i cui risultati di orientamento sono stati confrontati con quelli ottenuti dal sistema GPS-INS integrato. Bisogna fare attenzione, comunque, a considerare tali parametri come quelli di riferimento finché non si è certi della loro correlazione con l'orientamento esterno fisico della camera; per questo motivo la qualità del sistema nel suo complesso è ottenuta da un test di precisione in cui la posizione nel sistema oggetto dei punti viene ricalcolata attraverso una intersezione in avanti basata sull'orientamento esterno noto da sistema GPS-INS e comparata con le sue coordinate ricavate da sistema indipendente. Grazie alla intersezione spaziale l'orientamento esterno misurato in modo diretto viene considerato come un insieme di parametri fissi, quindi con una deviazione standard tendente a zero.

All'interno dei test di volo IFP sono stati testati gli unici due sistemi GPS-inerziali integrati disponibili sul mercato. Nella campagna effettuata durante il Dicembre 1998 è stato testato il sistema POS/AV™ 510 DG (formalmente chiamato POS/DG 310) prodotto dalla ditta canadese Applanix, e circa quindici mesi più tardi, nel Giugno del 2000 un test simile è stato effettuato utilizzando il sistema denominato AEROcontrol IId della ditta tedesca IGI.

Si riassumono qui le principali conclusioni e di seguito di analizzeranno i dati ottenuti dal sistema canadese, gli unici forniti dal testo in bibliografia:

- i test hanno mostrato che per fotogrammi a media scala (1:13000 con ottenuti con obiettivi grandangolari) gli scarti quadratici medi nello spazio oggetto variano nell'intervallo tra i 5 e i 20 cm in senso orizzontale e tra i 10 e i 25 cm lungo la componente verticale. L'utilizzo di fotogrammi a scale maggiori (1:6000), quindi ottenuti con una minore altezza di volo fornisce una migliore qualità nel posizionamento del punto nel sistema oggetto. Entrambi i sistemi GPS-INS testati in maniera indipendente hanno fornito precisioni simili;
- la precisione delle coordinate nel sistema oggetto ricavate da georeferenziazione diretta dipende dal numero di coordinate immagine utilizzate per la determinazione del posizionamento dei punti. Una abbondante sovrapposizione dei fotogrammi, che fornisce un blocco più fortemente correlato al proprio interno da un punto di vista geometrico, influenza positivamente la precisione finale, dato che l'abbondanza di fotogrammi in cui è presente l'immagine di un punto può compensare gli errori persistenti nei parametri di orientamento. Degli intervalli di precisione di posizionamento visti al punto precedente i valori più favorevoli sono, infatti, da attribuire alle zone ad elevata sovrapposizione dei fotogrammi, mentre bisogna aspettarsi la precisione più scadente in quelle zone con meno sovrapposizione di fotogrammi;
- la precisione del sistema nel suo complesso, comprendente anche il modulo di orientamento e di acquisizione immagini, è principalmente dipendente dalla sua calibrazione. Nei casi esaminati la componente verticale è quella che sembra essere più critica, infatti, in molti dei test effettuati erano presenti sia errori sistematici che ben più gravi errori dipendenti dal fattore di scala, i quali possono essere dovuti alla piccola differenza tra la focale assunta della camera e quella realmente usata durante il volo. Per di più, anche influenze non corrette della rifrazione possono causare lo stesso effetto. Accanto alla calibrazione del sistema di orientamento angolare, di per sé necessaria, anche la precisa determinazione di tali effetti è prescritta nel caso in cui il sistema venga usato per opera-



zioni di georeferenziazione diretta, altrimenti influenzerebbero negativamente il sistema in maniera troppo significativa. Spesso tale calibrazione viene effettuata all'interno di un piccolo blocco di calibrazione e utilizzata per l'intera area test, sfortunatamente la stabilità del sistema di calibrazione attraverso tempi lunghi e la sua qualità trasferita dal sito di calibrazione all'area di missione non è stata ancora comprovata ed è ancora oggetto di studio. Cionondimeno in uno scenario ideale la calibrazione dovrebbe essere effettuata direttamente nell'area di missione, preferibilmente senza punti di controllo a terra.

Come si noterà, se le condizioni tra il sistema di calibrazione e quello della missione di volo cambiano in modo significativo è possibile la compensazione degli errori sistematici introdotti unicamente mediante l'utilizzo di almeno un singolo punto di controllo a terra nell'area in esame. Questo però vanifica, almeno in parte, gli sforzi fatti, in quanto fino a che i risultati, con la precisione prefissata, non sono ottenuti solo mediante i dati raccolti durante il volo, in realtà non è corretto parlare di georeferenziazione diretta in maniera rigorosa.

Per il test di qualità sono state confrontate le coordinate ottenute di tredici punti con quelle note ricavate con tecnica indipendente e precisione planoaltimetrica di 1 cm.

Per quanto riguarda i risultati riportati in Tabella 23 e ottenuti con triangolazione aerea tradizionale, i risultati che in linea teorica ci si aspetterebbe con una precisione $\sigma_{x,y} = 4 \mu\text{m}$ nella scala dei fotogrammi e σ_z pari a $1 \pm 0.005\%$ dell'altezza di volo misurata rispetto al terreno, corrisponderebbero ad una precisione nella determinazione del punto oggetto di 4 cm in direzione planimetrica e 8 cm in direzione altimetrica; in realtà la configurazione di base #1a, effettuata con triangolazione aerea mediante GPS, fornisce errori sistematici fino a 20 cm per quanto riguarda la componente di altezza e che vengono compensati nella configurazione #1b mediante l'introduzione di incognite aggiuntive al modello e che ne permettono una autocalibrazione. In questo modo, come si può notare, i risultati rientrano negli intervalli teorici.

In una seconda fase la determinazione dei punti oggetto è stata ripetuta utilizzando una tecnica di georeferenziazione diretta dove le caratteristiche di orientamento esterno, ottenute mediante sistema GPS inerziale integrato, sono state usate come parametri fissi, ottenendo le coordinate oggetto mediante intersezione in avanti.

La precisione ottenuta con tale metodologia è stata di 15-20 cm, così come ci si sarebbe aspettato data la scala media dei fotogrammi del blocco considerato. Da notare però la scarsa qualità della σ_0 ottenuta decisamente peggiore rispetto al caso precedente (di circa 3 volte), il che indica che i raggi omologhi non si intersecano nello spazio oggetto a causa di un errore residuo nell'orientamento esterno o nel modello matematico.

Anche in questo caso la prova è stata ripetuta introducendo incognite aggiuntive al modello matematico via via differenti, in modo da stimare l'influenza dei molti errori presenti. L'introduzione della correzione dei parametri di allineamento e le correzioni ottenute mediante auto-calibrazione hanno portato come risultato ad un notevole miglioramento del parametro in esame di un fattore superiore a 2, nonché ad una maggiore precisione planimetrica nella determinazione dei punti oggetto scesa sotto i 10 cm.

Nella terza parte (prove #3a-#3e) il test è stato ripetuto, non considerando questa volta come fissi i parametri di orientamento ottenuti dal sistema integrato GPS/INS, ma sono state introdotte, nelle procedure di correzione, appropriate deviazioni standard di tali grandezze. All'interno dei dati qui presentati l'entità delle deviazioni sono di 5 cm per quanto riguarda i dati di posizionamento e di 0.003 deg per l'assetto angolare.

Tali valori sono stati derivati dalla comparazione con l'orientamento esterno ottenuto da triangolazione aerea e quindi dovrebbero rappresentare una stima realistica dei parametri di orientamento esterno. Si può notare come in questo caso il valore della σ_0 cambia in modo



significativo e conseguentemente migliora la precisione empirica ottenuta dall'analisi di punti di controllo.

Già nella versione #3a è ben visibile la grossa differenza degli scarti quadratici medi rispetto al caso precedente, il quale ha una precisione planimetrica praticamente raddoppiata. La qualità dell'intersezione dei raggi dell'immagine di ogni singolo punto nello spazio oggetto è migliorata al punto che le differenze rimanenti possono essere interpretate come errori residui nei parametri di orientamento.

#	Configurazione	GCP/ ChP	σ_0	RMS [cm]			Max. Dev. [cm]		
				[mm]	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY
1a	GPS-AT	[gray].44/9	6.5	5.6	4.8	21.0	9.6	7.9	31.7
1b	GPS-AT + SC	[gray].44/9	4.7	4.2	5.3	9.0	8.3	10.3	18.4
[grey].9 2a	DG	0/13	23.0	16.6	18.6	23.2	29.0	37.7	44.9
[grey].9 2b	DG + BA	0/13	10.8	9.0	7.8	23.0	16.4	16.8	39.5
[grey].9 2c	DG + SC (senza c)	0/13	9.7	8.9	7.3	19.9	13.6	12.9	39.6
[grey].9 2d	DG + (c, x_p , y_p)	[gray].41/12	9.8	8.8	7.1	13.7	12.9	13.3	30.8
[grey].9 2e	DG + SC	[gray].41/12	9.7	8.6	7.2	13.2	13.5	12.8	29.9
3a	GPS/INS-AT	0/13	6.4	8.2	7.8	18.2	13.3	20.5	30.1
3b	GPS/INS-AT + BA	0/13	6.4	7.6	7.4	18.5	13.3	19.4	29.0
3c	GPS/INS-AT + SC (senza c)	0/13	5.4	5.2	6.5	16.5	10.5	15.6	23.9
3d	GPS/INS-AT + (c, x_p , y_p)	[gray].41/12	5.9	6.1	6.1	7.4	13.5	12.6	16.1
3e	GPS/INS-AT + SC	[gray].41/12	5.4	5.5	7.3	6.0	10.7	16.4	9.9

Tabella 23 - Precisione nella determinazione di punti oggetto mediante sistema GPS/INS

Rimane, nonostante tutto, ancora un errore nella componente di altezza ed uno spostamento sistematico in direzione nord-ovest. Anche in questo caso l'introduzione di correzioni aggiuntive (casi #3b e #3c) degli angoli di orientamento e di una autocalibrazione (senza una correzione della focale "c") migliora la precisione e compensa parte degli errori, ma come nei risultati precedenti l'errore verticale persiste e pur essere eliminato unicamente mediante l'uso di un punto di controllo a terra (versioni #3d e #3e).

In ogni caso l'uso di punti di controllo a terra non ha portato a miglioramenti veramente significativi, il che indica la reale possibilità di utilizzo, per molte scale di precisione, della fotogrammetria diretta, prescindendo completamente dall'appoggio a terra.

Occorre comunque tenere presente che, oltre ai chiari vantaggi di tale tecnica, che hanno fino ad oggi spinto la sperimentazione, non è comunque possibile effettuare nessuna indagine statistica e di verifica sui parametri ricavati, in quanto non è possibile con una sola strumentazione in movimento effettuare più di una misurazione della stessa grandezza, ed inoltre non è possibile incrementare a piacimento la ridondanza delle equazioni del sistema e quindi la precisione della soluzione, seppure con notevole dispendio di tempo, come era possibile nella tecnica tradizionale di risoluzione del problema inverso per la determinazione dei parame-

tri di orientamento. Ancora maggiore importanza viene perciò data in tal caso al collaudo del volo, unica via rimasta per testare sistematici altrimenti non determinabili.

4.8 La Fotogrammetria digitale

La parte più tradizionale della fotogrammetria, che prevede l'uso sia di fotografie che di strumenti ottico-meccanici, è detta fotogrammetria analogica. Quella che, invece, pur utilizzando ancora i fotogrammi, si serve di strumenti computerizzati, è detta fotogrammetria analitica.

Una terza branca è detta fotogrammetria digitale. In questa recente evoluzione della tecnica, l'energia luminosa che colpisce il piano-immagine della camera non viene registrata fotograficamente, ma mediante dispositivi elettronici: ne consegue che le tecniche di trattamento simulano i processi di visione e di riconoscimento degli oggetti, propri dell'occhio umano.

In tal caso si parla di "visione artificiale" o anche di "riconoscimento delle forme" (*pattern recognition*) o di "interpretazione automatica" delle immagini.

4.8.1 Il sistema fotogrammetrico digitale

Rappresenta ormai un concetto acquisito il fatto che, in fotogrammetria digitale, il sistema fotogrammetrico (insieme di hardware e software per la gestione delle fasi di presa e restituzione) è costituito da due unità logicamente separate: l'unità di acquisizione e l'unità di restituzione.

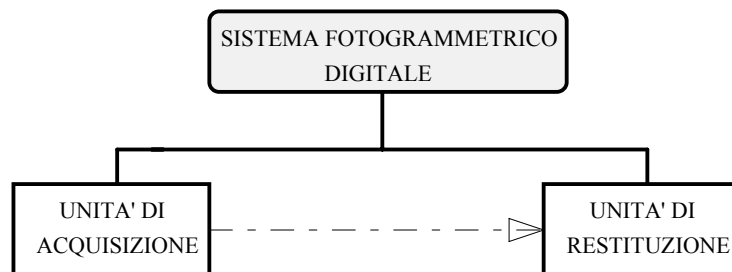


Figura 105 - Sistema fotogrammetrico digitale: componenti di base

L'unità di acquisizione deve consentire di realizzare le prese secondo lo schema progettato e di fornire tali prese in formato digitale in modo che, a ogni pixel dell'immagine risultante, l'unità di restituzione possa direttamente associare le coordinate di prospettiva centrale dei punti ripresi.

Le unità di acquisizione possono essere classificate in base alla natura dell'immagine originale (dato di prima generazione. Figura 106). Si parla di unità di acquisizione diretta (vedi 2.3.6) quando l'immagine originale è generata da camere fotografiche a dorso digitale, mentre si parlerà di unità di acquisizione indiretta (vedi 2.3.5) quando l'immagine originale è costituita da una fotografia tradizionale.

L'immagine digitale che viene trasmessa dall'unità di acquisizione all'unità di restituzione può presentarsi secondo due modalità:

immagine originale collegata a un file di calibrazione nel quale sono riportati i valori dei parametri che consentono di passare automaticamente dai numeri di riga e colonna del pixel considerato dell'immagine originale ai numeri di riga e colonna che il medesimo pixel avrebbe avuto se generato da un processo ideale di prospettiva centrale;

immagine ricampionata a partire dall'immagine originale tenendo conto dei sistematismi noti o determinati in precedenza.

La prima modalità presenta l'indubbio vantaggio della rapidità con la quale il sistema di acquisizione può trasmettere l'immagine al sistema di restituzione; per contro le modalità di trasmissione dei parametri di calibrazione devono rispettare le specifiche di tutte le unità di restituzione utilizzabili.

La seconda modalità presenta il vantaggio di poter essere gestita immediatamente da un qualsiasi tipo di unità di restituzione; per contro il ricampionamento che l'immagine originale subisce comporta generalmente una perdita di contrasto e l'impiego di tempi macchina non trascurabili.

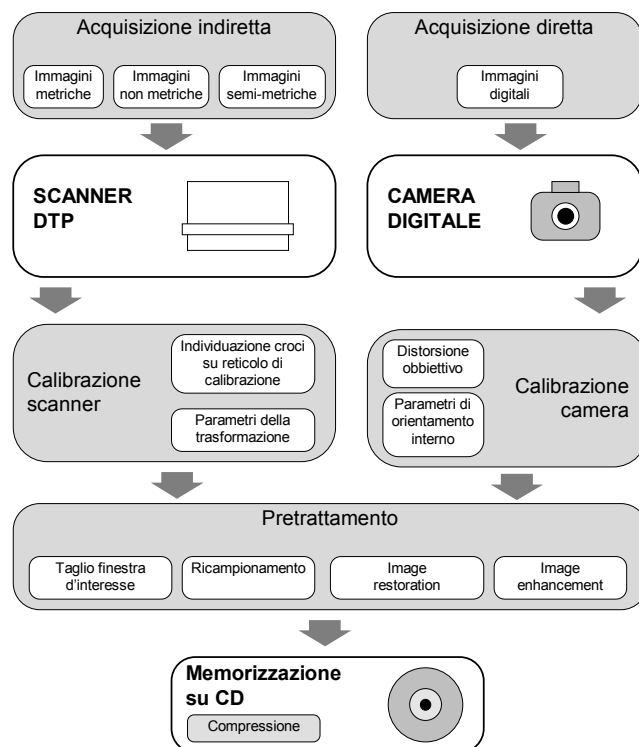


Figura 106 - Unità di acquisizione: schema logico-funzionale

Per quanto riguarda i formati di memorizzazione delle immagini si ritiene indispensabile l'uso di formati noti non compressi (TIFF, BMP, TGA) o compressi (TIFF, JPEG) purché i rapporti di compressione siano contenuti in valori non inferiori a 1/10; oltre tale limite di compressione infatti la perdita di informazione radiometrica inizia a influenzare in modo consistente il contenuto metrico dell'immagine.

Tale necessità di standardizzazione consente all'utente di garantire la necessaria indipendenza dall'unità di restituzione e la possibilità di sottoporre l'immagine a operazioni di filtraggio con programmi commerciali (PHOTOSHOP, PHOTOSTYLER, ecc.) che consentono la riduzione di zone con illuminazione non adatta alle successive fasi di restituzione (zone di ombra o di parziale sovraesposizione) e l'esaltazione dei contorni.

4.8.1.1 L'unità di acquisizione come strumento di misura

Un'immagine digitale (sarebbe più corretto dire "immagine numerizzata") è costituita da una matrice bidimensionale G , i cui elementi sono g_{ij} . Ciascun elemento è detto "pixel" (parola composta da *picture element* = elemento di immagine). L'indice di riga i varia da 1 a I con passo 1, cioè $i = 1(1)I$. Analogamente, l'indice di colonna è: $j = 1(1)J$. Poiché ogni elemento

della matrice rappresenta un'area, si parla di elementi d'immagine o pixel, piuttosto che di punti dell'immagine. Le dimensioni di quest'area (pixel) sono $\Delta\xi$ e $\Delta\eta$.

I pixel g_{ij} sono i contenitori dell'informazione. Il valore numerico di ciascun pixel dipende dal tipo di strumento registratore e dal calcolatore utilizzato. Attualmente l'intervallo di valori più frequentemente usato è quello compreso fra 0 e 255, un intervallo che supera ampiamente le possibilità di discriminazione dell'occhio umano. L'informazione contenuta nei 256 differenti valori può essere memorizzata in otto bit ($2^8 = 256$ combinazioni di bit) e, nella maggior parte dei moderni calcolatori, ciascun gruppo di otto bit è trattato come un'unica entità, detta byte.

Oltre alla rappresentazione binaria, l'informatica utilizza le rappresentazioni ottale e esadecimale. Nella Tabella 24 sono riportati i valori dei pixel nelle varie rappresentazioni.

Nelle immagini in bianco/nero i valori dei pixel rappresentano i livelli di grigio (o densità: di solito 0 sta per nero e 255 per bianco). Per le immagini a colori si hanno tre matrici immagine di uguale dimensioni, una per ciascuno dei tre colori fondamentali (rosso, verde, blu), cioè si parla di matrice immagine a tre piani. Le immagini a colori, soprattutto le immagini multispettrali con più di tre bande spettrali, hanno un ruolo importante nel telerilevamento. In questo capitolo, tuttavia, ci limiteremo a trattare solo le immagini in bianco/nero.

Decimale	Ottale	Esadecimale	Binario (sequenza di bit)
0	000	00	00000000
1	001	01	00000001
2	002	02	00000010
.	.	.	.
127	177	7F	01111111
128	200	80	10000000
.	.	.	.
254	376	FE	11111110
255	377	FF	11111111

Tabella 24 - Varie rappresentazioni del valore numerico dei pixel

Se si vuole utilizzare un'immagine digitale per scopi fotogrammetrici, è necessario stabilire una relazione fra la posizione del pixel e il sistema di coordinate ξ, η . La Figura 108 mostra tale sistema di coordinate immagine, con l'origine spostata di mezzo pixel all'esterno della matrice immagine e ruotato di 100 gon rispetto al sistema di coordinate immagine adottato in precedenza. Se si moltiplica l'indice i per $\Delta\xi$, si ottiene la coordinata immagine ξ del centro del pixel g_{ij} . Analogamente, moltiplicando l'indice j per $\Delta\eta$ si ottiene la coordinata immagine η . E' anche possibile, date le coordinate metriche ξ, η calcolare la posizione (i, j) del pixel a cui corrispondono.

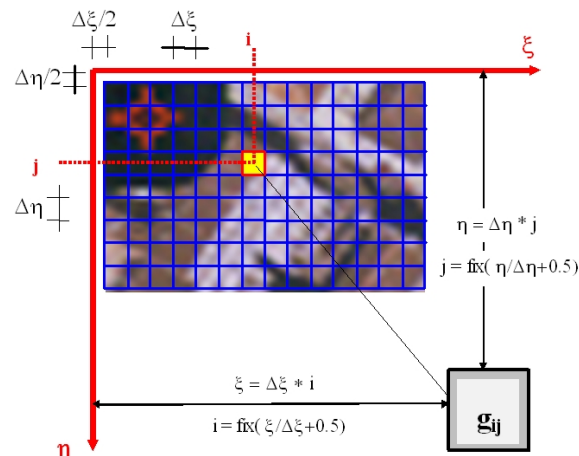


Figura 107 - Il sistema di riferimento immagine digitale

Quindi in fotogrammetria digitale la misura tradizionale delle coordinate immagine è sostituita dall'identificazione del pixel, identificazione che, per quanto possibile, è automatica. Pertanto:

la posizione del pixel all'interno della matrice immagine ne definisce le coordinate metriche ξ, η che costituiscono le osservazioni utilizzate dalle tecniche fotogrammetriche per ottenere informazioni metriche sull'oggetto;

la vera operazione di misura è quindi quella che permette di posizionare correttamente i pixel all'interno della matrice immagine, associando ad essi il corretto contenuto cromatico.

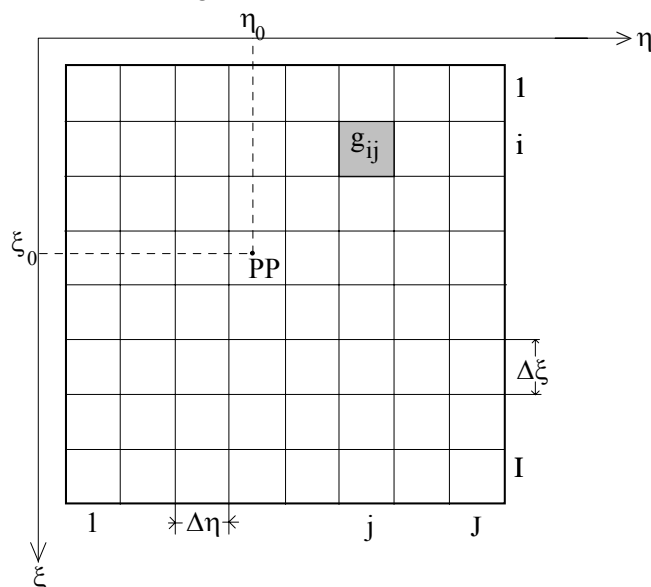


Figura 108 - Definizione di un'immagine fotogrammetrica digitale

Quindi, l'unità che genera l'immagine digitale, ovvero l'unità di acquisizione, costituisce il vero strumento di misura che, proprio durante la fase di acquisizione, "misura e memorizza" la posizione di milioni di punti all'interno dell'immagine digitale. L'unità di acquisizione deve pertanto essere particolarmente studiata, definita e calibrata in quanto tutti gli errori che si commettono in questa fase si ripercuoteranno all'interno dell'unità di restituzione. Infatti, l'unità di restituzione non deve più effettuare nessuna misura ma solamente essere in grado di individuare un pixel all'interno delle immagini digitali.

Anche la restituzione fotogrammetrica digitale richiede, ovviamente, la conoscenza dell'orientamento interno. La Figura 108 mostra la posizione del punto principale PP nel sistema ξ



, η . Se i pixel sono convenientemente piccoli, è sufficiente conoscere in quale pixel cade il punto principale. Questa considerazione ci spinge inevitabilmente ad assumere gli indici i e j come se fossero le coordinate immagine ξ, η . In tal caso, nell'ipotesi che i pixel siano quadrati, la distanza principale c può essere espressa anch'essa in unità di $\Delta\xi$ ($= \Delta\eta$). Le equazioni di restituzione restano valide, nonostante questa strana scala adottata per l'immagine e per lo spazio-immagine.

4.8.1.2 *L'unità di restituzione*

L'unità di restituzione è un sistema informatico dotato di:

- un sistema di visione tridimensionale;
- un insieme di periferiche che permettono la collimazione tridimensionale;
- una o più unità di calcolo che gestiscono la movimentazione dell'immagine e permettono di svolgere le procedure fotogrammetriche di orientamento e restituzione.

Storicamente, uno dei primi sistemi di visualizzazione stereoscopica è sicuramente il sistema anaglifico: esso permette di ottenere una visione tridimensionale di modelli in toni di grigio. Un'immagine è visualizzata secondo una sola componente cromatica (ad. es. rosso) e l'altra secondo la componente cromatica complementare (ad. es. verde). Il modello si osserva mediante un paio di occhiali avente lenti che permettono ciascuna il passaggio della componente cromatica relativa ad una sola immagine (ad. es. una lente rossa ed una verde). In questo modo, ogni occhio percepisce un solo fotogramma e permette di ottenere l'effetto stereoscopico. Con un monitor ed una scheda video che supporti la modalità RGB a 24 bit, questa soluzione è facilmente realizzabile.

Per superare i limiti delle immagini a toni di grigio, occorre ricorrere alle moderne tecniche che utilizzano occhiali polarizzati.

Il sistema di visione stereoscopica mediante occhiali a polarizzazione attiva è basato sul principio dell'otturatore a cristalli liquidi (LCS). Il monitor raster permette di visualizzare alternativamente due immagini alla frequenza di 2×60 Hz. La separazione dell'immagine necessaria per la visione stereoscopica è garantita da due otturatori attivi a cristalli liquidi; questi otturatori sono sincronizzati con il monitor per mezzo di un generatore di impulsi all'infrarosso, posto sopra lo schermo. Il segnale di sincronizzazione può essere ricevuto per un'ampiezza di 1700, permettendo la visione a più utenti. L'ampiezza dell'angolo di ricezione può essere ridotta per permettere di osservare in modo monodimensionale un eventuale monitor grafico aggiuntivo.

Il monitor che visualizza il modello deve essere di alta qualità, specialmente per supportare elevate frequenze di rinfresco dell'immagine (circa 120 Hz). Inoltre, la singola immagine è visualizzata con una frequenza di 60 Hz inferiore alla frequenza di permanenza dell'immagine sulla retina (circa 70 Hz): questo comporta il tipico fenomeno di instabilità dell'immagine (sfarfallio) che affatica la vista dell'operatore. E' probabile che, in futuro, l'evoluzione tecnica permetterà di superare questi limiti attuali.

Il sistema di visualizzazione stereoscopica mediante occhiali a polarizzazione passiva supera questo problema. Infatti, esso utilizza due monitor, uno per ogni immagine, posti secondo un angolo retto (vedi Figura 109).

Le immagini di questi monitor sono osservate dall'operatore attraverso una lamina semiriflettente posta secondo la bisettrice dell'angolo formato tra i monitor. L'immagine proveniente dal monitor posteriore è trasmessa attraverso la lamina senza subire variazioni, mentre l'immagine proveniente dal monitor laterale subisce una riflessione e pertanto il segnale elettromagnetico associato risulta sfasato di $\pi/2$. Osservando le immagini mediante occhiali aventi lenti polarizzate secondo direzioni ortogonali, si può ottenere la visione tridimensionale del modello.

All'interno del modello visualizzato con le tecniche appena descritte, occorre poter effettuare una collimazione tridimensionale di punti. In analogia con i restitutori analitici, una soluzione economica può essere ottenuta mediante un mouse, che simula il pantografo per i movimenti planimetrici, ed un trackball che permette di effettuare la collimazione in quota in fase di restituzione e l'eliminazione dalla parallasse d'altezza in fase di orientamento relativo.

Il software dell'unità di restituzione è, in larga misura, del tutto simile a quello di un restitutore analitico. Le uniche differenze sostanziali sono relative alle operazioni di input e output non esistono *encoder* di lettura delle coordinate immagine, nè motori per lo spostamento meccanico dei carrelli porta-fotogrammi.

Le collimazioni stereoscopiche possono essere fatte automaticamente o almeno perfezionate dal calcolatore e le coordinate immagine dei punti omologhi vengono determinate in modo indiretto mediante un procedimento di compensazione ai minimi quadrati.

I movimenti delle immagini per consentire l'eliminazione automatica della parallasse d'altezza e per la collimazione di punti di coordinate note sono realizzati mediante la visualizzazione di una porzione delle due immagini sui monitor dell'unità di restituzione.

Molto importante in tutte le fasi di orientamento e restituzione risultano gli algoritmi di collimazione automatica (autocorrelazione).

L'autocorrelazione è quella operazione statistica con la quale si simula il processo fisico della collimazione stereoscopica, ossia l'individuazione delle coppie di punti omologhi. Un restituitista che lavori su immagini digitali, realizza tale operazione con precisione pari, al massimo, alla metà della dimensione del pixel. L'autocorrelazione consente di superare tale limite fisico e di individuare la posizione dei punti omologhi con incertezza di circa un ordine di grandezza inferiore, garantendo il raggiungimento delle precisioni tipiche di un restitutore analitico di medie prestazioni.



Figura 109 - Apparato di visione stereoscopica a occhiali passivi

Si possono prevedere due procedimenti di autocorrelazione: il primo in grado di effettuare la ricerca dei punti omologhi con sensibilità pari alla dimensione del pixel (autocorrelazione a pixel intero) e il secondo in grado di affinare tale collimazione analitica con sensibilità inferiore alla dimensione del pixel stesso (autocorrelazione subpixel).

4.8.2 Tecniche di ricampionamento delle immagini

Nel presente paragrafo vengono descritte sinteticamente alcune tecniche di ricampionamento delle immagini digitali, che possono venire impiegate dalle unità di acquisizione dei sistemi fotogrammetrici digitali per la correzione di distorsioni sistematiche delle immagini originali o delle immagini acquisite per scansione di fotografie tradizionali.

Si consideri un'immagine digitale (immagine di input), nota nello spazio vettoriale (c',r') e una seconda immagine digitale (immagine di output), di cui si conoscono solamente le dimensioni geometriche della maglia che definisce i pixel, definita nello spazio vettoriale (c,r) .

Si supponga ancora di conoscere una trasformazione:

$$\begin{aligned} c &= f_1(c', r') \\ r &= f_2(c', r') \end{aligned} \quad (63)$$

che trasforma lo spazio (c',r') nello spazio (c,r) e di voler trasformare l'immagine in (c',r') nell'immagine in (c,r) .

Le sole incognite per risolvere il problema risultano i valori radiometrici dei pixel dell'immagine di output.

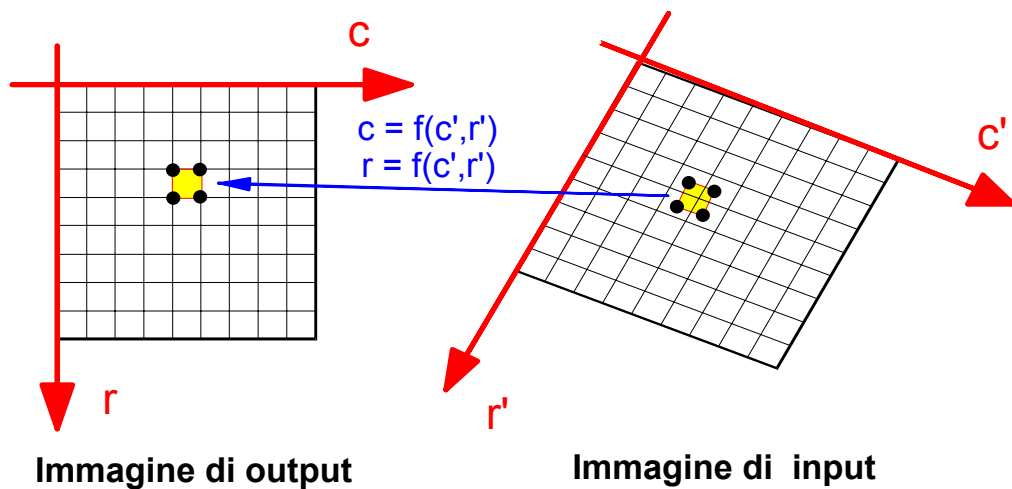


Figura 110 - Il principio del ricampionamento

Le coordinate (c,r) che corrispondono ai vertici di un pixel dell'immagine di output sono associate ad aree dell'immagine di input che non coincidono con un singolo pixel (vedi Figura 110).

Il ricampionamento è quel processo che consente di assegnare al pixel considerato dell'immagine di output un valore radiometrico interpolato seguendo un determinato criterio, dall'immagine di input.

In generale il problema si può enunciare nel seguente modo: determinare il livello radiometrico di ciascun pixel dell'immagine di output attingendone il valore dall'immagine di input.

Per estendere il discorso ad una intera immagine occorre applicare la trasformazione a tutti i pixel dell'immagine di input. Si ottiene una immagine in (c,r) che si sovrappone all'immagine di output senza coincidere con essa.

Per ogni pixel dell'immagine di output occorre interpolare un valore radiometrico tra i valori radiometrici dell'immagine di input trasformata.

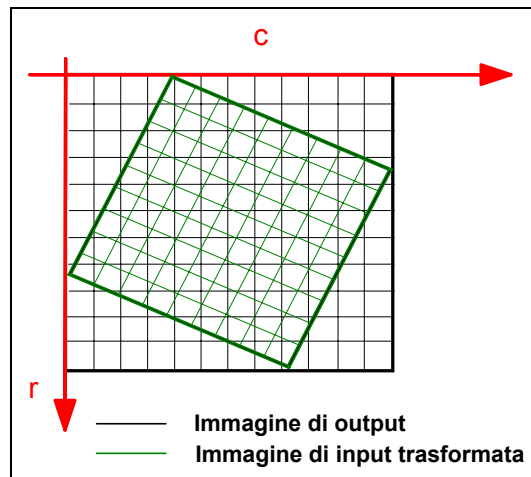


Figura 111 - Immagine originale e immagine ricampionata

In genere nelle procedure pratiche di ricampionamento il processo descritto in precedenza viene invertito. L'ipotesi fondamentale è che la funzione $f(c',r')$ sia biunivoca cioè invertibile.

I dati di ingresso per svolgere queste routine sono:

le relazioni che determinano la trasformazione inversa che muta (c,r) in (c',r') ;
l'immagine digitale di input contenente i valori radiometrici di ogni pixel.

Si procede partendo dall'immagine di output nota geometricamente e si trasformano i suoi pixel nello spazio (c',r') attraverso le funzioni inverse:

$$\begin{aligned} c' &= f_1^{-1}(c, r) \\ r' &= f_2^{-1}(c, r) \end{aligned} \quad (64)$$

Per ogni pixel trasformato si interpola nello spazio (c',r') il valore radiometrico tra i valori radiometrici dell'immagine di input. Il valore radiometrico così determinato viene attribuito nell'immagine di output, al pixel corrispondente.

Gli approcci possibili per svolgere il ricampionamento in tale modo sono essenzialmente due:

- il trasporto del baricentro del pixel dell'immagine di output sull'immagine di input da cui traggono ragione metodi interpolativi classici bidimensionali (interpolazione bilineare e bicubica) e non (troncamento e medie);
- il trasporto dei vertici del pixel dell'immagine di output sull'immagine di input da cui sono generati metodi più complessi di media semplice o ponderata.

4.8.2.1 Metodi basati sul trasporto del baricentro

Il ricampionamento mediante il trasporto del baricentro è sicuramente il metodo più semplice e più veloce tra le varie tecniche conosciute: esso permette di convertire le coordinate non intere di riga e colonna (r,c) ottenute attraverso le successive trasformazioni in valori interi attraverso troncamento o arrotondamento.

In altre parole, si prende il valore radiometrico del pixel dell'immagine di input che contiene il punto trasformato $P(c',r')$.

Questo metodo è veloce ed il suo uso assicura che i valori del pixel nell'immagine di output siano reali, perché essi sono direttamente copiati dall'immagine di input e non costruiti da algoritmi di interpolazione come nei casi seguenti.

Per contro questo metodo tende a produrre l'effetto blocking, cioè i valori radiometrici di pixel contigui dell'immagine di output tendono ad essere ripetuti. E' in effetti possibile che più pixel dell'immagine di output trasformati si trovino all'interno del medesimo pixel dell'immagine di input.

E' comunque un metodo consigliato se si utilizzano basse risoluzioni e basse sensibilità cromatiche in quanto si evitano effetti secondari indesiderati quali ad esempio il filtraggio passa-basso ed in certe situazioni un'offuscamento generale dell'immagine. Inoltre tali metodi possono essere applicati se la risoluzione dell'immagine di output è maggiore o uguale a quella dell'immagine di input.

L'effetto blocking è senz'altro il difetto più pericoloso delle tecnica di ricampionamento appena descritta. Nel seguito vengono proposte alcune varianti che tendono ad eliminare questo effetto secondario del ricampionamento per trasporto del baricentro.

4.8.2.1.1 Zone di influenza

Si scompone idealmente il pixel in cui cade il punto da interpolare in nove zone in funzione di un certo valore percentuale detto soglia di media : esso esprime l'ampiezza delle zone di confine tra il pixel considerato ed i pixel adiacenti in coordinate adimensionali come porzione di riga e porzione di colonna (come indicato in figura).

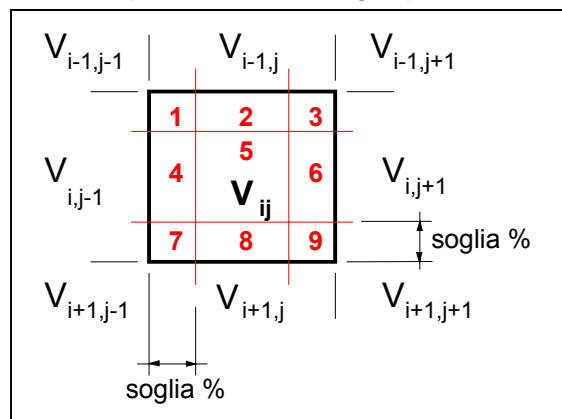


Figura 112 - Ricampionamento per zone di influenza: suddivisione in 9 zone

Il valore radiometrico dipende dall'area in cui cade il punto trasformato secondo la seguente casistica:

giace nell'area interna (5): il valore radiometrico ricampionato VR è dato dal valore radiometrico del pixel in cui cade il punto $V_{i,j}$

giace nelle aree lungo i lati del pixel (2,4,6,8): VR è dato dalla media dei valori radiometrici dei due pixel adiacenti. Ad esempio:

$$V_{R2} = \frac{V_{i-1,j} + V_{i,j}}{2}$$

$$V_{R4} = \frac{V_{i,j-1} + V_{i,j}}{2}$$

...
 giace nelle aree attorno ai vertici del pixel (1,3,7,9): il valore radiometrico ricampionato VR è dato dalla media dei valori radiometrici dei quattro pixel adiacenti il vertice considerato. Ad esempio:

$$V_{R1} = \frac{V_{i-1,j} + V_{i,j} + V_{i,j-1} + V_{i-1,j-1}}{4}$$

$$V_{R3} = \frac{V_{i-1,j} + V_{i,j} + V_{i,j+1} + V_{i-1,j+1}}{4}$$

...
 Si risolve quindi parzialmente il problema degli assegnamenti multipli attraverso le medie tra i valori radiometrici delle area vicine.

In certi casi limite (basse risoluzioni e immagini con forti contrasti) tra un pixel e gli adiacenti si può ottenere un effetto sfumato dei contorni: occorre operare sul valore di soglia percentuale riducendolo opportunamente al fine di diminuire la dimensione delle zone di media a valori ottimali, anche procedendo per tentativi.

4.8.2.1.2 Distanze pesate

Si costruisce una griglia corrispondente ai baricentri dei vari pixel dell'immagine di input e ad ogni nodo si associa il valore radiometrico del pixel corrispondente.

Il punto trasformato P(r,c) si troverà generalmente in un'area compresa tra quattro nodi della griglia.

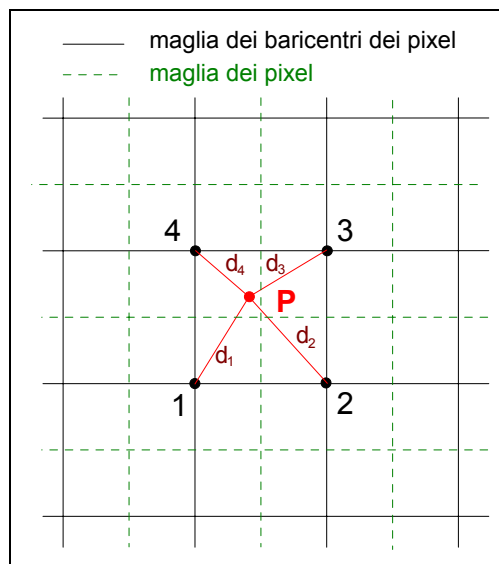


Figura 113 - Ricampionamento con media ponderata sulle distanze

Ognuno dei quattro nodi considerati fornisce una frazione di valore radiometrico in base all'inverso della sua distanza dal punto. Quindi, più il nodo è distante dal punto, meno lo influenza, cioè meno conta il valore radiometrico a cui è associato il nodo in questione nella valutazione del valore radiometrico da attribuire al punto intermedio. Si tratta quindi essen-

zialmente di effettuare la media ponderata sull'inverso delle distanze del punto dei valori radiometrici associati ai quattro nodi più vicini.

Il procedimento può essere schematizzato nel seguente modo:

calcolo delle distanze tra il punto trasformato e i nodi adiacenti:

$$d_i = \sqrt{(c_p - c_i)^2 + (r_p - r_i)^2}$$

dove:

c, r coordinate di riga e colonna del punto (P) trasformato e del nodo i-esimo
 d distanza tra il punto (P) e il nodo i-esimo

$i = 1, 2, 3, 4$

calcolo del valore di grigio da attribuire a P:

$$V_P = \frac{\frac{V_1}{d_1} + \frac{V_2}{d_2} + \frac{V_3}{d_3} + \frac{V_4}{d_4}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

dove V rappresenta i valori radiometrici del punto (P) e dei nodi (1,2,3,4).

Chiaramente questo metodo di calcolo è più lento dei precedenti perché richiede un maggior numero di operazioni, ma non comporta problemi di effetto blocco in quanto pixel vicini assumono valori generalmente differenti.

4.8.2.1.3 Interpolazione bilineare

Derivato dalle tecniche di calcolo agli elementi finiti, il metodo di ricampionamento per interpolazione bilineare sfrutta la stessa organizzazione a griglia del metodo precedente.

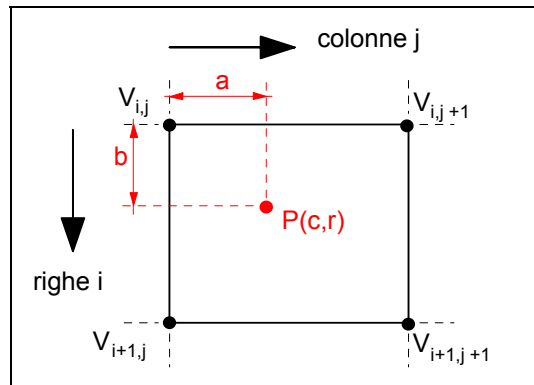


Figura 114 - Ricampionamento per interpolazione bilineare

L'ipotesi fondamentale su cui è basato il metodo è che la superficie adattata ai valori radiometrici dei pixel nelle vicinanze del punto trasformato possa essere piana.

I quattro nodi (baricentri di pixel) appartengono al piano.

Il valore interpolato V , si ottiene con la seguente relazione:

$$V = (1 - a)(1 - b)V_{i,j} + a(1 - b)V_{i,j+1} + b(1 - a)V_{i+1,j} + abV_{i+1,j+1}$$

dove:

$i = \text{INT}(r)$

$j = \text{INT}(c)$
 $a = c - j$
 $b = r - i.$

Il metodo non fornisce risultati se il punto $P(c,r)$ è coincidente con uno dei quattro nodi. In questi casi si attribuisce al punto (P) il valore radiometrico del nodo.

L'interpolazione bilineare restituisce un'immagine "appiattita" perché è essenzialmente un processo di media. In tal modo confini nitidi nell'immagine di input possono risultare sfumati nell'immagine di output.

Il tempo di calcolo richiesto, paragonabile a quelli del metodo precedente, è più lungo rispetto ai primi due metodi.

4.8.2.1.4 Interpolazione bicubica

Un'altra tecnica di interpolazione spaziale comunemente usata è chiamata interpolazione bicubica, perché è basata sull'adattamento di una superficie polinomiale bidimensionale di terzo grado alla regione circostante il punto $P(c,r)$.

Sono usati i sedici valori di pixel vicini nell'immagine di input per stimare il valore radiometrico da attribuire a $P(c,r)$ sull'immagine di output.

Questa tecnica è più complessa delle precedenti, ma tende a dare una immagine più naturale allo sguardo, senza l'effetto "blocking" del primo metodo e l'appiattimento dei metodi basati sull'operatore media, anche se qualche danno è causato alle informazioni di frequenza maggiore (come in tutti i casi di interpolazione in quanto queste tecniche sono generalmente filtri passa-basso).

La Figura 115 mostra una parte di una griglia di campionamento in cui il punto che deve essere interpolato occupa la maglia centrale.

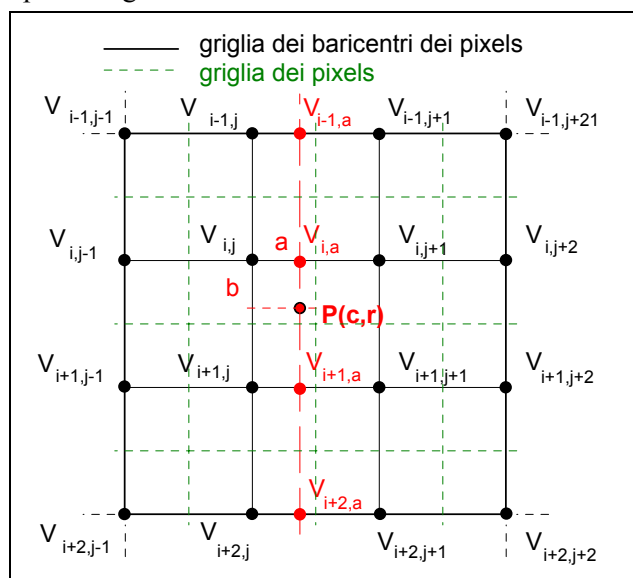


Figura 115 - Ricampionamento per interpolazione bicubica

La procedura si divide in due parti:

passo 1: si interpola monodimensionalmente lungo le quattro righe tra le colonne ottenendo i quattro valori intermedi allineati su una colonna passante per il punto P da interpolare. L'equazione risultante è solamente in funzione di a :

$$V_{r,a} = a(1 - a^2)V_{r,j-1} + (1 - 2a^2 + a^3)V_{r,j} + a(1 + a - a^2)V_{r,j+1} + a^2(a - 1)V_{r,j+2}$$



dove:

$$r = i - 1, i, i + 1, i + 2$$

$$a = c - j$$

V sono i valori radiometrici dei nodi e dei punti necessari;

passo 2: si interpola monodimensionalmente lungo la colonna passante per il punto P i cui nodi sono stati determinati nel passo precedente. L'equazione risultante è solamente in funzione di b:

$$V_p = b(1 - b^2)V_{i-1,a} + (1 - 2b^2 + b^3)V_{i,a} + b(1 + b - b^2)V_{i+1,a} + b^2(b - 1)V_{i+2,a}$$

Sebbene le espressioni precedenti sembrino piuttosto complesse, esse sono facilmente programmabili su sistema computerizzato, pur comportando un notevole incremento nei tempi di calcolo rispetto ai metodi precedenti (anche più di tre volte tanto).

4.8.2.1.5 Considerazioni operative

Nella scelta del metodo di ricampionamento da utilizzare per una certa applicazione, ha grande importanza il tempo di elaborazione. Si deve, in tal senso, tener presente un insieme di fattori che condizionano la velocità di ricampionamento:

la capacità di calcolo del processore su numeri in virgola mobile; infatti a parità di clock, una CPU 486 fornisce prestazioni di ricampionamento limitate rispetto ad un Pentium;

la dimensione dell'immagine da ricampionare;

l'esistenza di un adeguato buffering, in particolare con immagini raster ad elevata risoluzione, per utilizzare in modo ottimale la RAM disponibile evitando continui accessi al disco fisso;

la funzione di trasformazione tra spazi bidimensionali, più risulta complessa maggiore sarà il tempo di elaborazione.

Per compiere una realistica valutazione dei tempi di calcolo, occorre pertanto porre alcune ipotesi su questi fattori. In particolare, nelle prove eseguite è stato utilizzato un Pentium con un buffering di circa 8 Mb, l'immagine da ricampionare è di circa 27 Mb e la trasformazione usata è l'omografia. I tempi di elaborazione determinati in queste condizioni sono stati riferiti all'algoritmo più veloce ovvero il trasporto del baricentro.

Tipo di ricampionamento	Tempo di elaborazione
trasporto del baricentro	1.00
trasporto del baricentro e medie	1.05
media ponderata sulle aree	2.25
interpolazione bilineare	1.25
interpolazione bicubica	2.05

Tabella 25 - Tempi di elaborazione

Sulla base delle considerazioni espresse nei paragrafi precedenti e confrontando questi risultati, si può individuare nell'algoritmo di interpolazione bicubica il migliore metodo di ricampionamento.

Infatti, con un incremento dei tempi di calcolo di poco più del 10 % rispetto al trasporto del baricentro, garantisce il miglior risultato in termini radiometrici in quanto minimizza l'effetto passa basso di cui sono affetti tutti gli altri metodi.

L'algoritmo di media ponderata sulle aree, invece, comporta tempi di calcolo ancora superiori pur determinando un maggior degrado dell'immagine ed in particolare una diminuzione del contrasto.

4.9 Prodotti della Fotogrammetria

4.9.1 Grigliati irregolari di punti

La generazione di grigliati irregolari (TIN) sfrutta sostanzialmente gli operatori d'interesse per individuare i punti significativi sui due fotogrammi che costituiscono il modello. In seguito il modello generato viene regolarizzato mediante gli algoritmi già descritti.

La procedura può essere esemplificata mediante i seguenti passi:

individuazione dell'area, nel sistema oggetto, in cui generare il TIN mediante semplice restituzione e individuazione delle corrispondenti aree all'interno dei fotogrammi (spazio immagine);

individuazione dei punti significativi mediante operatore d'interesse all'interno dei due fotogrammi considerati: si compongono così due insiemi di punti candidati (uno per ogni fotogramma) per la generazione del TIN;

ricerca per ogni punto candidato individuato all'interno dell'immagine di sinistra del punto candidato omologo sul fotogramma di destra mediante la determinazione del coefficiente di correlazione massimo tra tutte le possibili associazioni. Qualora il coefficiente di correlazione massimo risulti minore di una soglia minima prefissata (per es. 0.85) quest'associazione viene eliminata e si passa al punto candidato successivo;

si raffina la collimazione dell'operatore d'interesse mediante autocorrelazione (a pixel intero e sub-pixel) ottenendo le coordinate immagine finali dei due punti omologhi;

si calcolano mediante le equazioni di collinearità (nella forma di restituzione) le coordinate oggetto del punto collimato;

si ripetono i punti 3,4 e 5 per tutti i punti candidati dell'immagine di sinistra.

L'applicazione di questo algoritmo prevede l'utilizzo di una serie di accorgimenti che ne permettono di migliorare la velocità e l'efficacia: la sua applicazione senza accorgimenti alle immagini digitali così come si usano per la restituzione (con pixel di 10-20 μm) comporterebbe tempi di calcolo eccessivi, anche su PC particolarmente potenti, e improponibili in una logica produttiva.

Allo scopo si utilizza una tecnica basata sulle immagini piramidali (o piramidi d'immagine). Una piramide d'immagini è basata su una immagine digitale alla massima risoluzione e si compone di un'insieme di immagini digitali generate dall'applicazione gerarchica di liscivia (filtraggio passa-basso) e successivo sotto-campionamento (campionamento con riduzione della risoluzione). In funzione del fattore di sottocampionamento (generalmente 1/2, 1/3 o 1/4) si ottengono un insieme di immagini derivate dall'immagine originale aventi però la dimensione del pixel via via crescente (2, 3 o 4). Se si utilizza un fattore 1/3 di sottocampionamento per esempio si ottiene una piramide d'immagini di un fotogramma aereo come indicato in Figura 116.

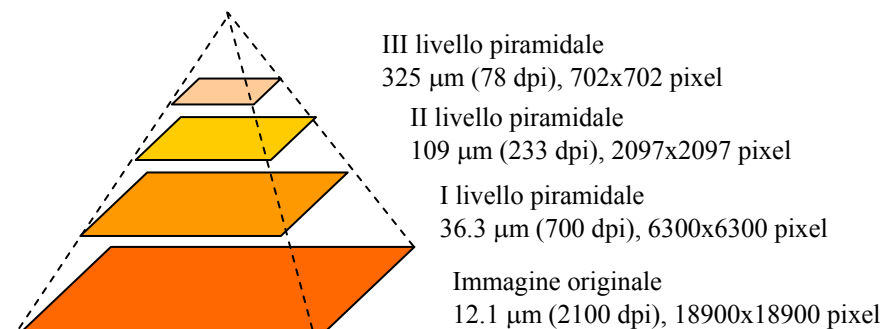


Figura 116 - Un'esempio di immagine piramidale di un fotogramma aereo

L'algoritmo presentato si applica a partire dal livello piramidale superiore ottenendo valori approssimati che vengono infittiti e raffinati nel livello successivo fino ad arrivare alla piena risoluzione.

In Figura 117 è mostrato un esempio di DTM generato secondo questo approccio: nella parte sinistra sono mostrate le immagini relative ai 3 livelli più bassi delle piramidi d'immagini utilizzate, nella parte destra invece si noti che anche il passo del DTM generato risulta via via più fitto (90 m, 30 m e 10 m finale).

4.9.2 Grigliati regolari

E' possibile ottenere direttamente un grigliato regolare (senza procedure di interpolazione) mediante la tecnica Vertical Line Locus (VLL). Questo algoritmo fissa le coordinate planimetriche e per tentativi logicamente ordinati, determina la quota corrispondente (come indicato in Figura 118).

Si definiscono alcuni parametri iniziali:

- la quota iniziale da cui partire: in questo caso è possibile partire da una collimazione dell'operatore, utilizzare un DTM approssimato già noto o definire una superficie in base ai punti che sono già disponibili (punti d'appoggio, punti di legame, punti restituiti ecc.);
- il numero di piani di tentativo da utilizzare per ogni iterazione;
- la differenza in quota tra i piani tentativo alla prima iterazione (ΔZ).

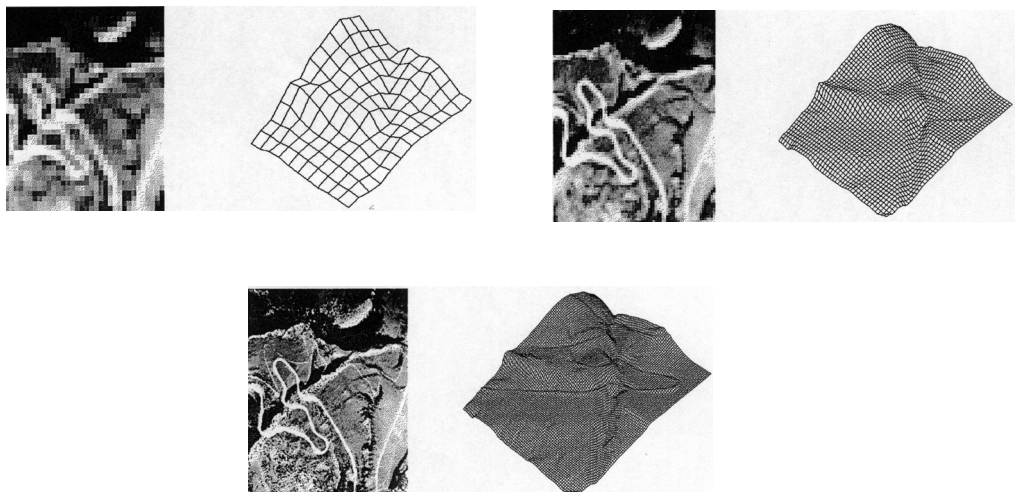


Figura 117 - Un esempio di DTM (ricampionato come grigliato regolare) generato con tecniche gerarchiche piramidali

Quindi, per ogni nodo della griglia (x,y note) da generale si procede nel modo seguente (Figura 119):

- si parte da una quota approssimata e si determina la quota dei piani tentativo distanziati tra loro ΔZ ;
- per ogni piano tentativo si individua la posizione nel nodo del grigliato sui fotogrammi utilizzati (equazioni di col linearità in forma di prospettivizzazione);
- si estraggono nell'intorno di questi due punti sulle due immagini digitali dei fotogrammi due aree aventi la stessa dimensione e centrate rispetto al punto calcolato;

si determina il coefficiente di correlazione tra queste due area;
 tra tutti i coefficienti di correlazione calcolati per i vari piani di tentativo si individua il massimo e la quota a cui corrisponde;
 questa quota è utilizzata come quota approssimata alla prossima iterazione in cui si considera una differenza di quota tra i piani tentativo dimezzata;
 le iterazioni si interrompono quando la distanza tra i piani tentativo è inferiore alla precisione richiesta dal DTM.

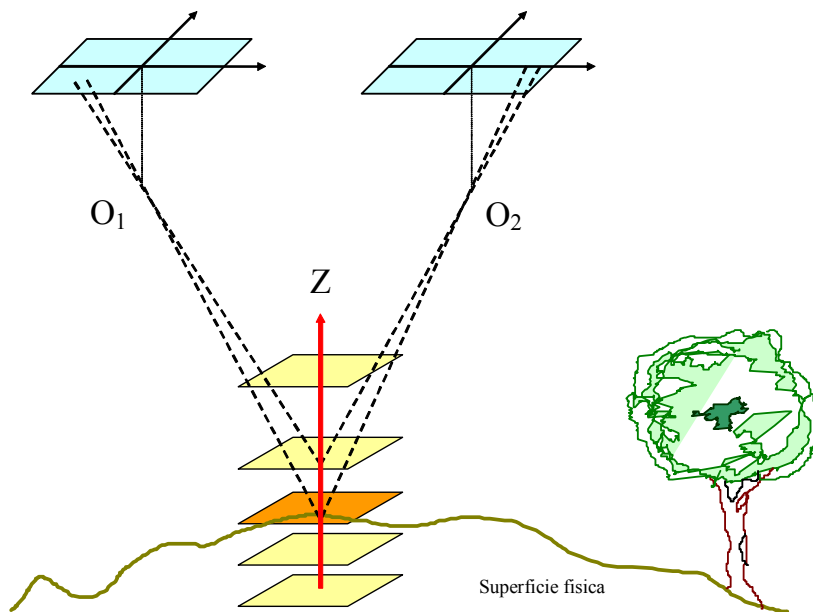


Figura 118 - La tecnica VLL

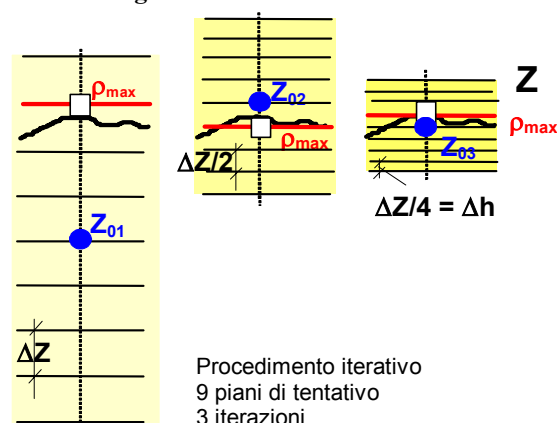


Figura 119 - L'algorithmo VLL

4.9.3 Efficacia e precisioni ottenibili

Vista la varietà di algoritmi utilizzabili e la differente implementazione nelle varie stazioni fotogrammetriche digitali, i numerosi parametri da cui dipendono questi algoritmi e i parametri iniziali di cui spesso necessitano è complesso stabilirne, in modo oggettivo e generale, l'efficacia e le precisioni ottenibili.

Inoltre, in particolare l'efficacia di questi algoritmi dipende sostanzialmente dal tipo di territorio (pianura, collina, montagna), dalla presenza di infrastrutture, aree urbane, alberatura ecc. e dalla scala a cui deve essere prodotto il modello altimetrico.

In Tabella 26 si indicano alcuni valori puramente indicativi inerenti la generazione automatica di modelli altimetrici mediante tecniche automatiche. In funzione delle osservazioni precedenti tali valori possono variare anche sostanzialmente. Con il termine di efficacia si intende il numero di punti estratti rispetto al numero di punti che si voleva determinare, con il termine di qualità si intende la percentuale di punti estratti che soddisfa le tolleranze stabilite.

Tipo di territorio	Efficacia	Qualità Piccola scala	Qualità Grande scala
Pianeggiante	85-90 %	90-95 %	80-90 %
mediamente accidentato	75-85 %	80-90 %	70-80 %
accidentato	70-80 %	70-80 %	50-70 %
Boschi, colture arboree (alto fusto) ecc.	20-40 %	50 %	20 %
Centri urbani mediamente urbanizzato	20-30 %	80 %	50 %
Centro storico	10-15 %	30 %	20 %

Tabella 26 - Efficacia e precisione della generazione automatica di modelli altimetrici

4.9.4 Ortofoto digitali

Chiunque, sia per attività tecnico-professionali sia per scopi più propriamente ricreativi e turistici, ha avuto a che fare con qualche rappresentazione cartografica tradizionale. Si ricorderà quindi che tale rappresentazione grafica del territorio appare come un disegno, un insieme di segni grafici corredato opportunamente da testi esplicativi. Sulla carte consultate, tutti avranno chiaramente individuato i punti (punti quotati, termini catastali ...), i segmenti (confini di particelle, spigoli di case...), le linee (curve di livello, tracciati stradali, alvei fluviali ...), le aree descritte da varie campiture (coperture di edifici, giardini...), le simbologie (ponti, scarpate. . .) e gli altri elementi grafici rappresentativi.

Questa sono le caratteristiche fondamentali di una carta al tratto, cioè un insieme finito di punti ed informazioni logicamente correlate.

Operando con tecniche fotogrammetriche, i dati di partenza provengono da prese fotografiche, cioè da immagini del territorio contenenti una quantità di dati di gran lunga superiore alle informazioni effettivamente rappresentate sulla carta al tratto. Si effettuano quindi operazioni di selezione delle informazioni contenute sui fotogrammi giungendo ad una sintesi composta da quei dettagli che, in dipendenza della scala della carta, delle precisioni necessarie e delle motivazioni che hanno guidato la realizzazione della carta, vengono considerati significativi. Il risultato ottenuto è quindi l'universalmente conosciuto insieme di poche righe, qualche simbolo, qualche testo. Si noti come, in tal caso, la gran parte del contenuto informativo dei fotogrammi risulti perduta.

Una soluzione per eliminare questo inconveniente potrebbe essere la conservazione dei fotogrammi usati per estrarre la carta al tratto, per consentire un loro utilizzo futuro, qualora risultasse necessaria una integrazione delle informazioni della carta per nuovi non previsti utilizzi. Il loro uso comunque risulterebbe non semplice, né immediato, essendo i fotogrammi per loro natura rappresentazione deformate del terreno, a causa della prospettiva, dell' incli-



nazione dell'asse della camera rispetto alla normale all'oggetto ripreso, delle differenze tra quota media e quota dei singoli punti dell'oggetto.

Tali deformazioni devono essere, quindi, eliminate per consentire immediati utilizzi delle fotografie come rappresentazioni metriche alla stregua delle carte al tratto, senza alcuna perdita di contenuto informativo.

4.9.4.1 Le deformazioni di un fotogramma

Le deformazioni di un'immagine, fotografica, si descrivono, in geometria differenziale, con l'indicatore di Tissot. Tuttavia questa teoria si può applicare solo se la superficie dell'oggetto può essere descritta da funzioni analitiche continue. Di solito la superficie del terreno non può essere descritta in questo modo. Molto più spesso, essa è rappresentata, con metodi fotogrammetrici, mediante l'acquisizione (in forma numerica) di una grande quantità di punti singoli, appartenenti alla superficie stessa. Pertanto, allo scopo di descrivere le deformazioni in un fotogramma, è necessario utilizzare un metodo diverso, basato sulle coordinate X,Y, Z dei punti discreti che costituiscono un grigliato più o meno fitto.

La Figura 120 mostra una superficie oggetto, definita dalle coordinate Z dei nodi di un grigliato regolare a maglia quadrata. Nella rappresentazione cartografica (proiezione ortogonale), un grigliato XY a maglia quadrata costituisce l'immagine non distorta della superficie del terreno. Le deformazioni sul fotogramma si ricavano calcolando la posizione delle immagini corrispondenti dei nodi del grigliato terreno, secondo le Equazioni di collinearità. Il risultato è riportato schematicamente in Figura 120.

La deformazione del grigliato dà un'idea immediata e molto chiara delle deformazioni del fotogramma aereo (v. Figura 121).

I valori numerici delle deformazioni in corrispondenza dei singoli punti (per es. nel punto 1 della maglia quadrata 1,2,3,4 della Figura 121) possono essere ricavate dalle coordinate immagine ξ, η e dalle coordinate terreno X,Y del punto, come segue:

deformazione delle lunghezze in direzioni X e Y:

$$\lambda_x = \frac{\delta_{12}}{\Delta X} \quad \lambda_y = \frac{\delta_{13}}{\Delta Y} \quad \text{dove:} \quad \delta_{ik} = \sqrt{(\xi_i - \xi_k)^2 + (\eta_i - \eta_k)^2}$$

deformazione ω_{100} dell'angolo retto nel punto 1:

$$\omega_{100} = 100 \text{ gon} - 2'13''$$

deformazioni di lunghezza massime λ_1 e λ_2 , nelle direzioni di massima deformazione, date dalle espressioni (vedi teoria della proiettività fra due superfici, in qualsiasi testo di geometria proiettiva):

$$\lambda_1^2 + \lambda_2^2 = \lambda_x^2 + \lambda_y^2 \quad \text{e} \quad \lambda_1 \lambda_2 = \lambda_x \lambda_y \cos \omega_{100}$$

massima deformazione angolare: 2ω , dove

$$\text{sen } \omega = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

deformazione areale:

$$\lambda_1 \lambda_2 = \lambda_x \lambda_y \cos \omega_{100} = \frac{\Delta 1', 2', 3'}{\Delta 1, 2, 3}$$

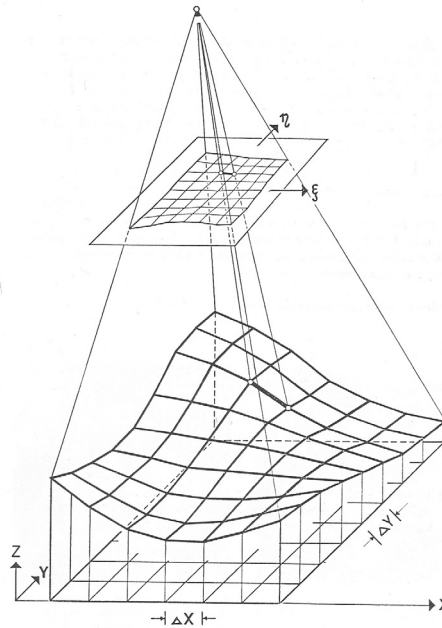


Figura 120 - Relazione fra il grigliato a maglia quadrata $\Delta X = \Delta Y$ nel piano XY e il corrispondente grigliato deformato sul piano immagine

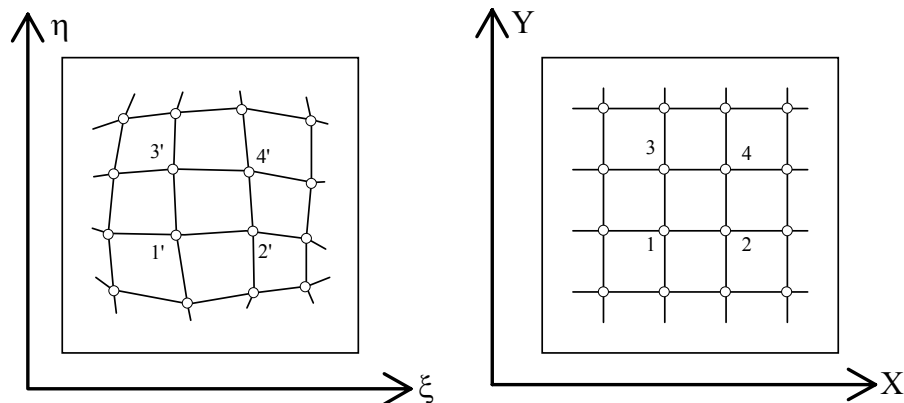


Figura 121 - Il grigliato della Figura precedente, come compare sul fotogramma (prospettiva centrale) e sulla carta (proiezione ortogonale)

Se la superficie dell'oggetto è un piano orizzontale, la deformazione del grigliato nel fotogramma risulta in chiaro rapporto con il grigliato XY sull'oggetto (v. Figura 122). In questo schema, il fotogramma è ruotato intorno ad un asse che va dallo spigolo in basso a sinistra, a quello in alto a destra. La linea di massima pendenza del fotogramma, pertanto, è ortogonale a questa direzione (dall'alto a sinistra verso il basso a destra).

Il fotogramma è identico all'ortofoto nel caso in cui il piano immagine e quello oggetto sono paralleli. Un grigliato regolare a maglia quadrata, sul piano oggetto, viene riprodotto, perciò, simile a se stesso sull'immagine del fotogramma. Questo semplice procedimento, per creare fotogrammi privi di deformazioni, viene utilizzato soprattutto in fotogrammetria architettonica. L'utente deve avere ben presente, però, che le immagini dei punti che non giacciono esattamente sul piano oggetto risulteranno spostate in direzione del punto principale PP.

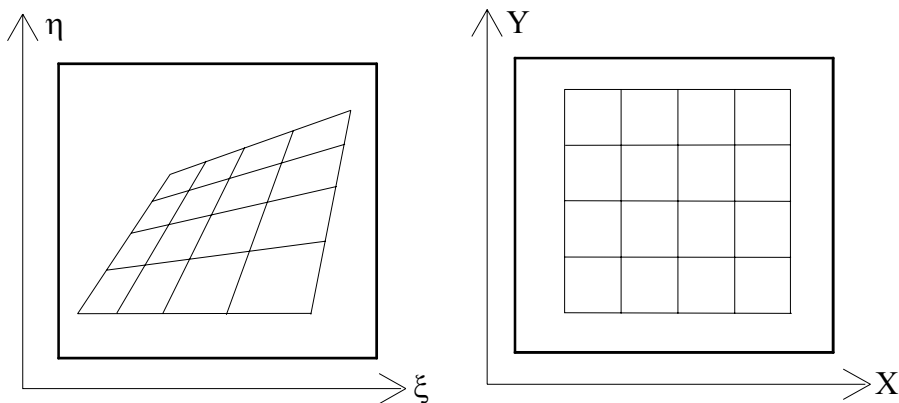


Figura 122 - Grigliato sul fotogramma e sul piano oggetto (carta)

L'entità dello spostamento radiale $\Delta\rho$ di questi oggetti dalla loro base (per es.: gli edifici nelle foto aeree) si può ricavare dalla Figura 123 mediante l'equazione seguente:

$$\Delta\rho = \Delta R \frac{c}{Z_0} = \Delta Z \frac{\rho}{Z_0} = \Delta Z \frac{\rho}{c \cdot m_b} \quad (65)$$

Questa equazione è rigorosamente valida solo per fotogrammi perfettamente nadirali, ma può essere utilizzata con buona approssimazione, per determinare spostamenti radiali causati da dislivelli ΔZ , anche nel caso di fotogrammi pseudo-nadirali.

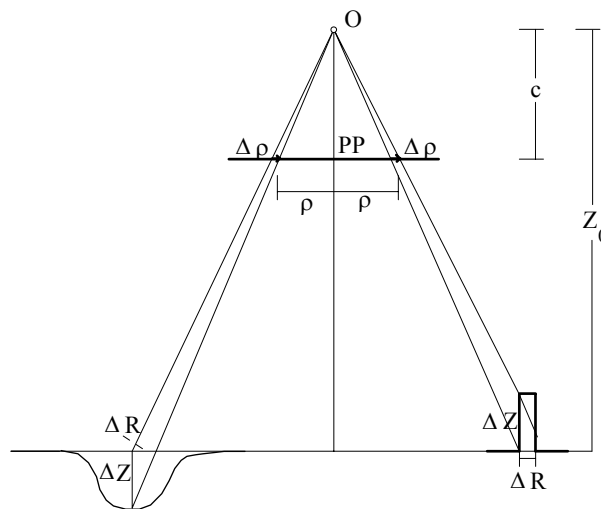


Figura 123 - Spostamento radiale $\Delta\rho$ dell'immagine di punti al di fuori del piano assunto come piano oggetto (fotogrammi perfettamente nadirali)

La

Tabella 27 mostra gli spostamenti massimi dell'immagine per alcune scale tipiche in fotogrammetria terrestre, per la camera Wild P 31, mentre la seconda mostra quelli per scale e camere tipiche delle riprese aeree.

Per eliminare la deformazione delle immagini, si possono usare due procedimenti diversi, in funzione della strumentazione oggi disponibile.

Il primo, che non verrà trattato in quanto poco applicabile a casi territoriali ambientali, è il metodo di raddrizzamento, in cui il fotogramma originale digitalizzato viene ricampionato in una proiezione centrale con piano di proiezione parallelo al piano ipotizzato per l'oggetto. La



nuova immagine così ottenuta è una proiezione centrale dell'originale, ma con le caratteristiche geometriche di una proiezione ortogonale per tutti i punti del terreno appartenenti al piano ipotizzato. Questo procedimento può essere adottato solo nel caso di prese oblique di oggetti piani.

Il secondo è utilizzabile in tutti i casi. Piccole porzioni del fotogramma originale vengono estratte e raddrizzate separatamente una per una. Questo processo è noto come raddrizzamento differenziale. Tale tecnica viene utilizzata nella produzione di ortofoto digitali dove la porzione ortoproiettata del raddrizzamento differenziale coincide con il pixel stesso dell'immagine generata.

4.9.4.2 Preparazione dei dati iniziali

La prima fase della preparazione dei dati iniziali consiste nell'acquisizione delle immagini, che possono derivare da acquisizione diretta o indiretta. Per fare l'ortofoto è sufficiente un'immagine qualora si disponga già di un **DTM** generato in precedenza. Qualora si debba generare anche il **DTM** è bene procurarsi almeno una coppia stereoscopica e restituirlo mediante restitutore digitale. Le prese aeree hanno un orientamento approssimativamente nadirale, per cui le deformazioni prospettiche delle foto non sono eccessive, così che possono essere utilizzati gli stessi fotogrammi sia per la creazione del modello, sia per l'esecuzione dell'ortofoto.

Queste immagini sono analizzate definendone:

- i parametri di orientamento interno (da certificato di calibrazione o mediante autocalibrazione nel caso di camere non metriche) comprese le distorsioni dell'obiettivo;
- i parametri di orientamento esterno;
- se le immagini sono analogiche occorre trasformarle in formato digitale mediante scanner fotogrammetrico o scanner DTP calibrato;
- i parametri di una trasformazione piana che permetta di creare il collegamento tra le coordinate metriche immagine e la posizione dei pixel dell'immagine all'interno dell'immagine digitale.

Occorre quindi disporre di un **DTM** della zona da ortoproiettare avente le caratteristiche di precisione e densità legate alla scala di produzione dell'ortofoto.

Quindi si realizza la vera e propria ortoproiezione nella quale un punto dell'immagine digitale dell'ortofoto viene trasformato con successivi passaggi nello spazio immagine digitale del fotogramma: in tale posizione attraverso procedure di ricampionamento si determina il valore radiometrico da associare al pixel sull'ortofoto.

4.9.4.3 La procedura di generazione

L'aspetto essenziale della produzione di ortofoto digitali consiste nella trasformazione della matrice-immagine, nel sistema di coordinate interno alla camera, in una matrice-immagine nel piano EN del sistema di coordinate terreno. (Si parla qui di sistema di coordinate terreno, e non di coordinate oggetto, poiché l'ortofoto si applica più frequentemente alla fotogrammetria aerea che alla fotogrammetria degli oggetti vicini). La produzione di un'ortofoto inizia con la definizione della matrice-immagine richiesta nel piano EN del sistema di coordinate terreno, seguita dalla trasformazione del centro di ciascun pixel di questa immagine (ancora inesistente) nel sistema di coordinate della camera.

Allo scopo si utilizza la procedura indicata in Figura 124:

- selezione di un pixel dell'ortofoto digitale e in base alla sua posizione all'interno della matrice immagine, alla dimensione del pixel dell'ortofoto e alla sua posizione georeferenziata si determinano le coordinate del centro del pixel;
- interpolazione della quota dal **DTM** definito nello stesso sistema di riferimento oggetto mediante tecniche di interpolazione;



mediante le equazioni di collinearità (prospettivizzazione) essendo noti i parametri di orientamento interno ed esterno dell'immagine utilizzata si determinano le coordinate immagine corrispondenti al centro del pixel dell'ortofoto considerato;
 mediante una trasformazione piana e tenendo conto delle distorsioni dell'obbiettivo si determinano le coordinate immagine digitale sul fotogramma da ortoproiettare;
 determinazione del colore da associare a questa posizione mediante ricampionamento;
 scrittura dell'informazione cromatica (colore) all'interno della matrice dell'ortofoto digitale nella posizione del pixel considerato.

In sequenza si svolge la procedura indicata per tutti i pixel dell'immagine digitale dell'ortofoto.

	ΔZ				
mb	1 cm	5 cm	10 cm	25 cm	100 cm
Angolo normale ($\rho = 83 \text{ mm}, c = 202 \text{ mm}$)					
25	0.16	0.8	1.6	4.1	16.5 mm
100	0.04	0.2	0.4	1.0	4.1 mm
250	0.02	0.1	0.2	0.4	1.6 mm
500	0.01	0.04	0.1	0.2	0.8 mm
Grandangolo ($\rho = 82 \text{ mm}, c = 100 \text{ mm}$)					
25	0.3	1.6	3.3	8.2	32.8 mm
100	0.1	0.4	0.8	2.1	8.2 mm
250	0.03	0.2	0.3	0.8	3.3 mm
500	0.02	0.1	0.2	0.4	1.6 mm
Super-grandangolo ($\rho = 75 \text{ mm}, c = 45 \text{ mm}$)					
25	0.7	3.3	6.7	16.6	66.5 mm
100	0.2	0.9	1.7	4.1	16.6 mm
250	0.1	0.4	0.7	1.6	6.6 mm
500	0.03	0.2	0.3	0.8	3.3 mm

	$\Delta Z =$					
mb	1 m	5 m	10 m	25 m	100 m	250 m
Angolo normale ($23 \times 23 \text{ cm}^2, c = 300 \text{ mm}$)						
5000	0.1	0.5	1.1	2.7	10.8	27.1 mm
10000	0.05	0.3	0.5	1.4	5.4	13.6 mm
25000	0.02	0.1	0.2	0.5	2.2	5.4 mm
50000	0.01	0.1	0.1	0.3	1.1	2.7 mm
Grandangolo ($23 \times 23 \text{ cm}^2, c = 150 \text{ mm}$)						
5000	0.2	1.1	2.2	5.4	21.7	54.2 mm
10000	0.1	0.5	1.1	2.7	10.8	27.1 mm
25000	0.04	0.2	0.4	1.1	4.4	10.8 mm
50000	0.02	0.1	0.2	0.5	2.2	5.4 mm
Super-grandangolo ($23 \times 23 \text{ cm}^2, c = 90 \text{ mm}$)						
5000	0.4	1.8	3.6	9.0	36.1	90.4 mm
10000	0.2	0.9	1.8	4.5	18.1	45.2 mm
25000	0.1	0.4	0.7	1.8	7.2	18.1 mm
50000	0.03	0.2	0.3	0.9	3.6	9.0 mm

Tabella 27- Spostamenti radiali in funzione della scala media del fotogramma, del dislivello dei punti rispetto al piano oggetto e di tipo di camera (Wild P31 - camera terrestre sopra e camera fotogrammetrica aerea sotto)

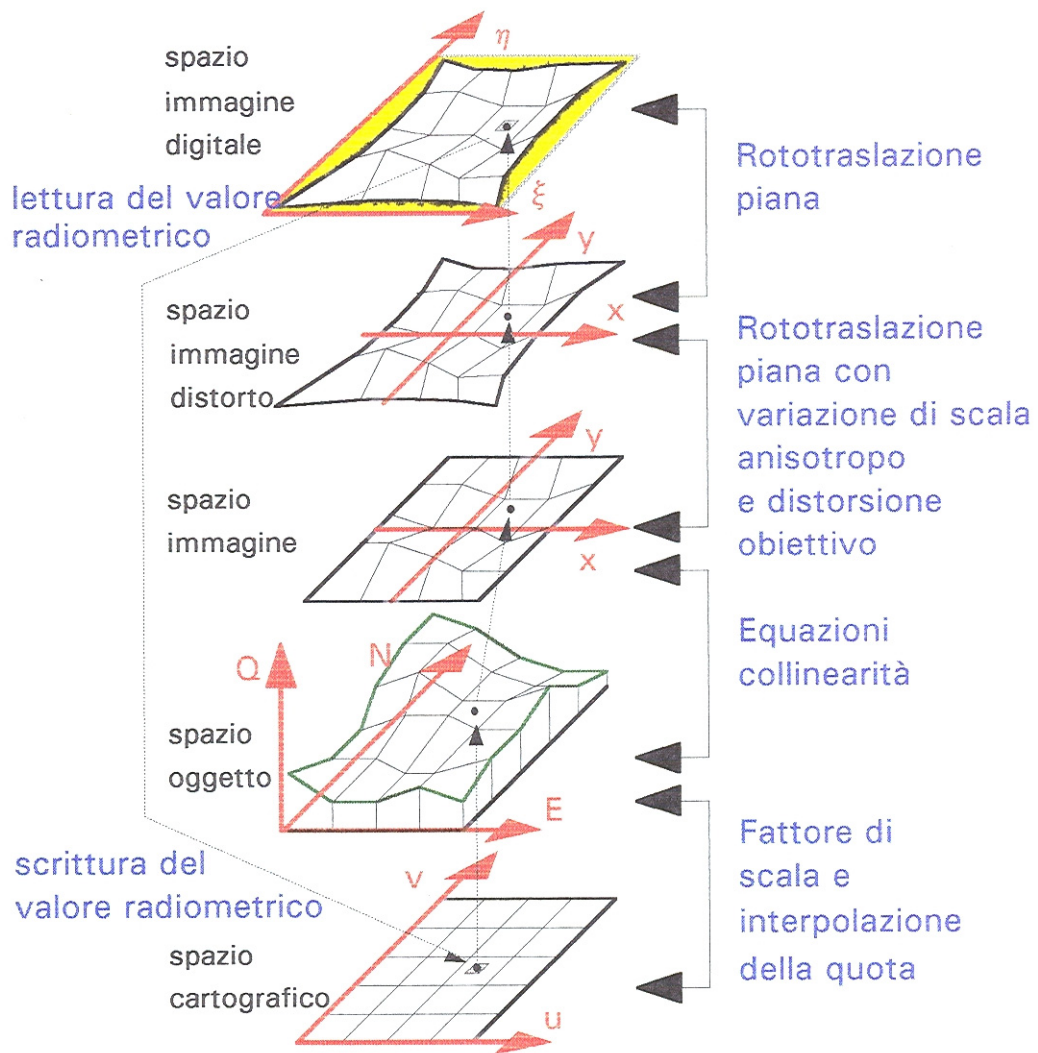


Figura 124 - La procedura di ortoproiezione digitale

4.9.4.4 Influenza della precisione del DEM

Come si può intuire dalla procedura di produzione descritta la qualità metrica dell'ortofoto digitale, dipende dalla qualità del modello altimetrico utilizzato (**DTM**), ovvero dallo scostamento tra l'effettiva superficie fisica dell'oggetto e la sua descrizione all'interno del **DTM**.

Per semplicità si consideri (Figura 125) un oggetto sostanzialmente piano in cui sono presenti una depressione e un'elevazione che non sono descritte mediante il **DTM** fornito. Si consideri ancora che il fotogramma utilizzato sia pseudo-nadirale.

Gli scostamenti Δr risultano radiali anche rispetto al punto nadirale N, che è il punto di fuga di tutte le verticali. Perciò, se supponiamo che il terreno sia piano ed orizzontale, la posizione degli edifici, degli alberi, ecc. sull'ortofoto sarà corretta solo a livello del terreno. I tetti, le chiome degli alberi, ecc., sono scostati rispetto alla loro vera posizione. Analogamente, nei fotopiani di facciate di edifici, i particolari sporgenti o rientranti rispetto al piano della facciata risulteranno scostati radialmente in direzione del punto nadirale.

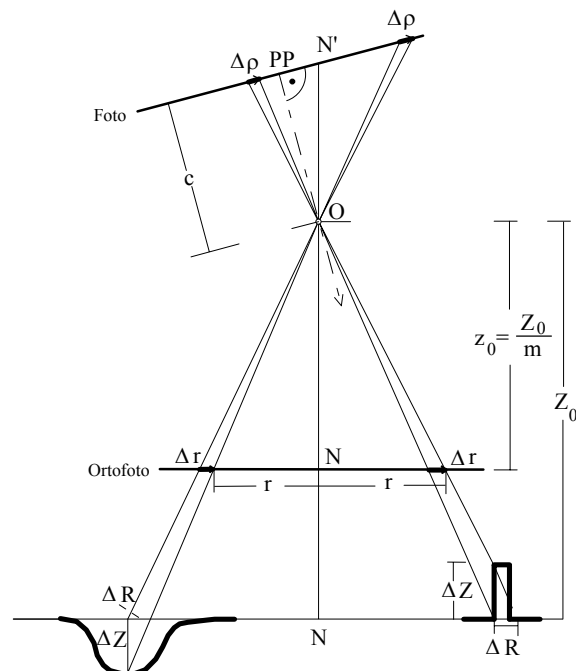


Figura 125 - Scostamenti radiali Δr dell'immagine, nell'ortofoto, di parti dell'oggetto non correttamente descritti dal DTM

L'entità dello scostamento risulta:

$$\Delta r = \Delta Z \frac{r}{Z_0}$$

dove r è la distanza del punto considerato dal punto nadirale nell'ortofoto.

Se il fotogramma è quasi nadirale possiamo introdurre la distanza principale c e il fattore di scala del fotogramma m_b :

$$\Delta r = \Delta Z \frac{r}{c \cdot m_b}$$

Con quest'equazione è stata compilata la

Tabella 28, relativa ad alcune scale consuete per i fotogrammi e le corrispondenti ortofoto, in cui sono riportati i valori di ΔZ_{\max} per uno scostamento massimo, supposto accettabile, di 1 mm sull'ortofoto. Si suppone che il formato dell'ortofoto sia 50 cm x 50 cm e si sono calcolati i valori per le diverse camere, da super-grandangolari a normali. Nel caso di ortofoto di precisione questi valori devono essere ridotti in quanto si ammette uno scostamento massimo sull'ortofoto di 0.4-0.5 mm.

4.9.4.5 Ortofoto di precisione

La realizzazione dell'ortoproiezione è molto semplice se la superficie dell'oggetto è continua (liscia), e permette di ottenere precisioni accettabili per tutti i campi applicativi. Sfortunatamente, questo non è il caso che si presenta in molte applicazioni.

Ad esempio, in un centro urbano, lungo pareti di roccia o in corrispondenza di corsi d'acqua e intersezioni con le infrastrutture, la superficie che modella gli oggetti costruiti dall'uomo (edifici, infrastrutture, ponti ecc.) non è certamente liscia e non viene, quindi, descritta propriamente con un grigliato regolare (**DTM**). L'ortoproiezione di questi tipi di oggetti richiede procedure più sofisticate. Le soluzioni attualmente più diffuse sfruttano un grigliato regolare integrato con *breakline* o un modello digitale di superficie (**DSM**= *Digital Surface Model*) che fornisce una descrizione matematica completa della forma di ogni oggetto mediante un insieme di primitive geometriche (piani e quadriche). In entrambi i casi, la produzione di ortofoto comporta algoritmi molto complessi e tempi di calcolo onerosi.

Scala ortofoto	Scala fotogramma	c = 45	c = 100	c = 200 mm
1:50	1:200	3	6	12 cm
	1:400	5	11	24 cm
1:100	1:400	5	11	24 cm
	1:800	10	23	48 cm
1:250	1:1000	13	28	59 cm
	1:2000	25	57	119 cm

Scala ortofoto	Scala fotogramma	c = 90	c = 150	c = 210	c = 300 mm
1:1000	1:3000	1	1	2	3 m
	1:6000	2	3	4	5 m
1:2500	1:7500	2	3	4	6 m
	1:15000	4	6	9	13 m
1:5000	1:15000	4	6	9	13 m
	1:30000	8	13	18	26 m
1:10000	1:30000	8	13	18	26 m
	1:60000	15	26	36	51 m

Tabella 28 - Distanza consentita tra superficie dell'oggetto e DTM per limitare a 1 mm l'errore massimo ai bordi del fotogramma (in alto caso terrestre, in basso fotogrammetria aerea)

Una soluzione discreta al problema indicato consiste nell'utilizzare comunque un modello altimetrico regolare (**DEM** denso o *DenseDEM*) che contenga le informazioni della superficie dell'oggetto da rappresentare (e non solamente del terreno ma anche delle infrastrutture presenti) e abbia un passo della maglia sufficiente a descriverne correttamente la geometria (generalmente il passo è dello stesso ordine di grandezza della dimensione sull'oggetto del pixel dell'ortofoto). In questo modo è possibile:

- integrare il dato fotogrammetrico con il dato **DDEM** generato mediante le moderne strumentazioni LIDAR ;
- conservare i benefici applicativi dell'ortofoto digitale rigorosa (la precisione metrica del prodotto);
- utilizzare un approccio multi-immagine che consenta una completa descrizione cromatica dell'oggetto;
- rendere completamente automatico il processo di produzione.

4.9.4.5.1 Ortoproiezione rigorosa di una superficie discontinua

Si consideri l'edificio rappresentato nella Figura 126. Se il DTM descrive solamente la superficie liscia del terreno, la proiezione del punto **Q** dà origine alla posizione errata **Q₀**, anziché restituire la corretta posizione **Q₀** che, inoltre, coincide con l'ortoproiezione **P₀** del punto

P. La Figura 126 (sinistra) mostra praticamente questo effetto: il piede dell'edificio è rappresentato in posizione corretta, mentre il tetto dell'edificio è spostato in posizione errata.

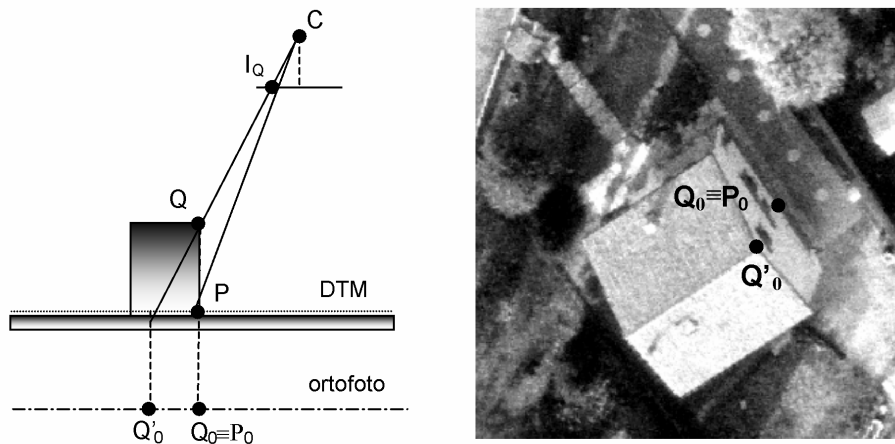


Figura 126 - Ortoproiezione con descrizione errata della forma e un esempio pratico

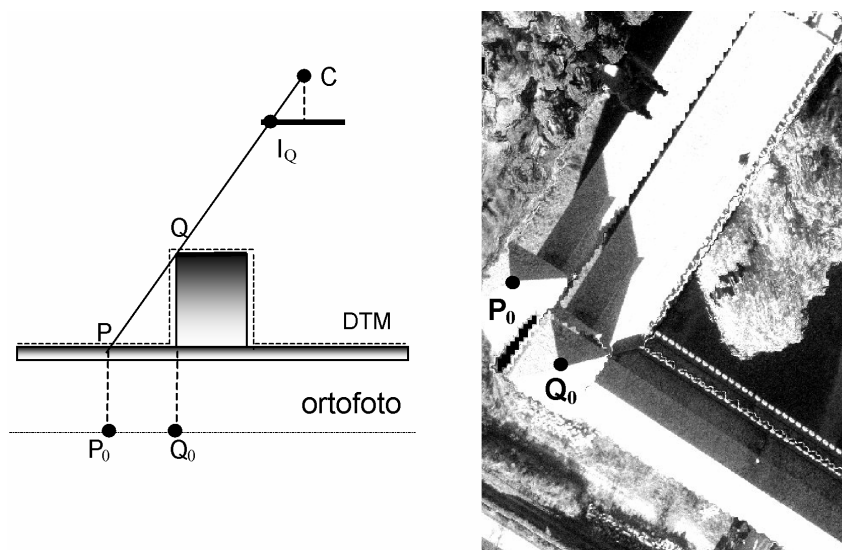


Figura 127 - Ortoproiezione con aree nascoste e un esempio pratico

Adesso si consideri il caso in cui anche la casa sia descritta dal DTM (Figura 127). Il punto Q è rappresentato correttamente in Q₀ ma, se si usa una ortoproiezione tradizionale, si perde il punto P (nascosto dal punto Q a causa della geometria di proiezione) sostituito dal punto visibile Q raddoppiato (in P₀) sull'ortofoto risultante. Questo effetto è mostrato in Figura 127 (sinistra).

In ogni caso, l'immagine dell'area defilata non è disponibile sul fotogramma considerato e dovrebbe essere estratta dagli altri fotogrammi (se disponibili). Il raddoppio dell'immagine genera comunque confusione e non è sicuramente desiderato.

Considerando questi due effetti, si può stabilire che, per generare un'ortofoto precisa e completa di una superficie discontinua, sono richieste:

- la corretta descrizione della superficie;
- la disponibilità delle immagini di più immagini in cui siano rappresentati tutti i dettagli dell'oggetto.

Se sono disponibili differenti immagini prospettiche (come mostrato in Figura 128), occorre utilizzare specifiche precauzioni nell'uso dei raggi di proiezione per ogni punto, al fine di evitare l'effetto di raddoppio dell'immagine. Per esempio, il punto Q_0 deve essere ottenuto dall'immagine I_Q e il punto P_0 da I_P .

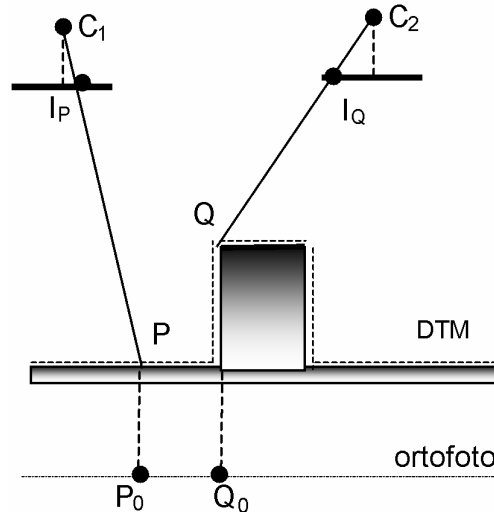


Figura 128 - Generazione ortofoto di precisione da immagini multiple

4.9.4.5.2 Generazione del modello tridimensionale

La descrizione dettagliata di una superficie tridimensionale discontinua può essere ottenuta seguendo differenti approcci.

Una prima possibile soluzione tende a minimizzare il numero di punti richiesti. Ciò può essere ottenuto mediante un grigliato regolare di punti, integrato con *breaklines*, presenti in numero sufficiente per descrivere correttamente le discontinuità della superficie.

Se si considera un'area urbana o un oggetto architettonico complesso, è chiaro che la descrizione di tutte le linee di discontinuità equivale alla restituzione dell'intera area: la indicata misura delle *breaklines* (vedi Figura 129) non può essere automatizzata e risulta, pertanto, onerosa in termini di tempo e denaro.

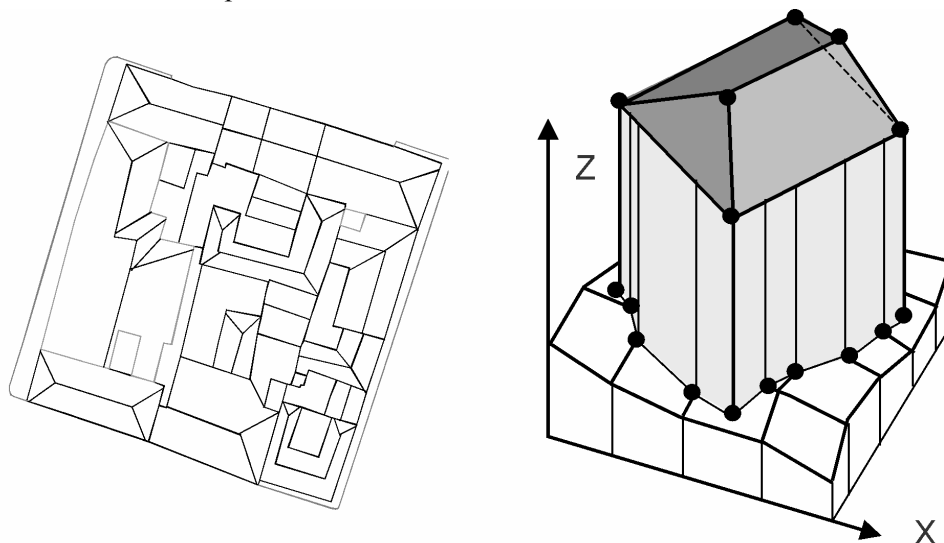


Figura 129 - Breaklines in un centro urbano e modello digitale di superficie

Una seconda soluzione consiste nella definizione di un modello digitale di superficie (**DSM**) per modellizzare l'oggetto complesso (vedi Figura 129 destra). Si definiscono il triangolo piano e il quadrilatero piano come le primitive geometriche necessarie per descrivere l'oggetto e si usa un database relazionale per gestire questo sofisticato strumento di interpolazione. La creazione di un **DSM** non può essere automatizzata e, inoltre, la gestione di una strumentazione similare richiede complessi programmi ed elevati tempi di calcolo.

In alternativa all'uso delle *breaklines*, si può predisporre un grigliato di punti molto denso, in cui la dimensione della singola maglia può variare da 1 m a 1 cm, in funzione dell'applicazione aerea o architettonica e della scala di rappresentazione dell'ortofoto. L'elevata densità di punti presenti rende corretta l'interpolazione all'interno della singola maglia anche senza ricorrere alle *breaklines*.

E' possibile individuare tre differenti procedure per la misurazione di un **DTM** denso.

La prima consiste in una restituzione fotogrammetrica manuale, soluzione inaccettabile in quanto troppo lunga e costosa. Può però essere presa in considerazione solo per piccole aree, o per integrazione degli altri metodi.

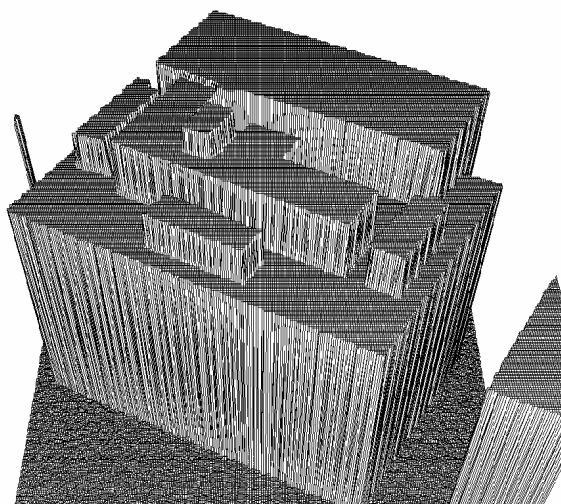


Figura 130 - Un esempio di DEM denso

La seconda possibilità si basa sull'uso di una procedura automatica per la generazione di **DTM** mediante algoritmi di autocorrelazione. Come noto in letteratura, questi metodi hanno, generalmente, una percentuale media di successo dell' 80%: la parte restante deve essere misurata manualmente dall'operatore. Questo valore medio, però, diminuisce drammaticamente nel caso di superfici discontinue in cui sono presenti parecchie zone defilate: in questi casi, sul modello non sono individuabili i punti omologhi e l'algoritmo entra in crisi.

Una terza possibilità deriva dalle recenti tecniche di generazione di un **DTM** denso mediante l'uso di laser scanner (vedi Capitolo 5). Questo nuovo strumento di rilievo è in grado di rilevare migliaia di punti in pochi secondi con elevata precisione. Questa tecnologia, basata su strumentazione elettro-ottica, utilizza una serie di impulsi ad alta intensità diretti contro l'oggetto per misurarne la distanza dallo strumento stesso. Nello stesso tempo si misurano le due direzioni angolari in modo da determinare le coordinate tridimensionali del punto. Da questi punti può essere derivata un'immagine digitale. Sono già disponibili sul mercato strumenti laser scanner sia per applicazioni aeree che per applicazioni terrestri.

La griglia generata dal laser scanner è irregolare in quanto la spaziatura in direzione X e Y dipende dalla direzione e dalla distanza tra lo strumento e il punto misurato: è possibile va-

riare la densità dei punti misurati semplicemente cambiando la distanza di acquisizione. Il processo è completamente automatico e la generazione del **DTM** (acquisizione ed elaborazione dei dati) è facile e veloce. Quindi, il laser scanner può essere considerato una soluzione ottimale per la produzione di un DTM denso, sia dal punto di vista tecnico che economico.

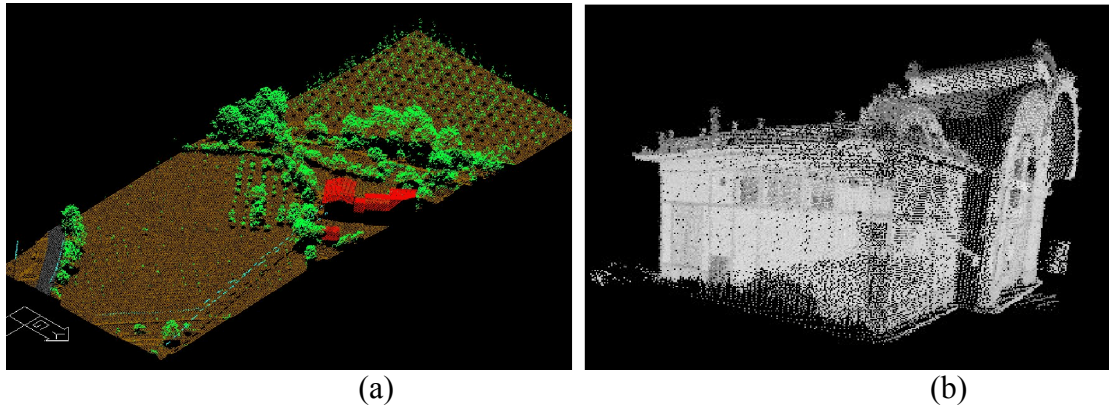


Figura 131 - Esempi di DTM generato con laser scanner (a - aereo, b - terrestre)

Prima di poter utilizzare il **DTM** generato da laser scanner, esso deve essere pre-processato in modo da individuare *outlier* e *gross errors*, presenti specialmente nelle acquisizioni aeree, e regolarizzato per semplificarne la gestione dei dati. Questa procedura è stata realizzata da alcuni componenti del nostro gruppo di ricerca [Manzino, Roggero, 2000], mediante lo sviluppo di un software originale che permette la scelta della dimensione finale della griglia del DTM. Se la dimensione prescelta della griglia è simile alla distanza media tra i punti acquisiti, alcuni nodi del DTM regolarizzato possono risultare indefiniti. Questi “punti vuoti” non sono accettabili per la generazione automatica dell’ortofoto: per risolvere questo problema si ricorre all’applicazione di un filtro “mediana” che riempie generalmente gran parte dei vuoti. Le quote indefinite residue (in genere inferiori al 5%) sono completate per mezzo di misure fotogrammetriche effettuate manualmente.

4.9.4.5.3 Come produrre una ortofoto di precisione

I dati in ingresso sono: un **DTM** denso, generato mediante strumentazione laser a scansione, e un serie di immagini digitali orientate, contenenti l’area che deve essere ortoproiettata. Si consideri, a titolo esemplificativo, l’edificio mostrato in Figura 132. Nell’immagine prospettica, lungo un raggio di proiezione, il punto più alto copre il punto sottostante. Quindi, la procedura funziona operando dal punto più alto a quello più basso.

La procedura inizia dal punto **R**. Si suppone, per semplicità, che l’immagine sia in toni di grigio. L’estensione alle immagini a colori è immediata. Si individua innanzitutto il pixel che contiene la miglior registrazione del valore di grigio del punto, scegliendo l’immagine che ha il punto principale più vicino al punto considerato (immagine **I₁**). Per evitare di avere una duplicazione dell’immagine questo pixel deve essere inibito: si crea, pertanto, una *immagine flag*, dove ogni pixel contiene la quota utilizzata per l’ortoproiezione del pixel sull’ortofoto da realizzare. Un’immagine del punto **R** è anche presente sull’immagine **I₂** e, per lo stesso motivo, questo pixel deve essere inibito, anche se non è stato utilizzato (**I₁** è stata scelta per **R**). Si proietta, poi, con le stesse modalità il punto **S** che risulta presente solo in **I₁**.

Quando la procedura giunge al punto **P**, si accorge che il pixel sull’immagine **I₁** è già stato usato (per il punto **R**). L’*immagine flag* inibisce un ulteriore utilizzo di questo pixel, in quanto la quota memorizzata è maggiore della quota del punto **P**. La procedura, allora, tenta l’estrazione del tono di grigio dall’immagine **I₂**: questo pixel non è inibito e rende possibile la proiezione del punto **P**.

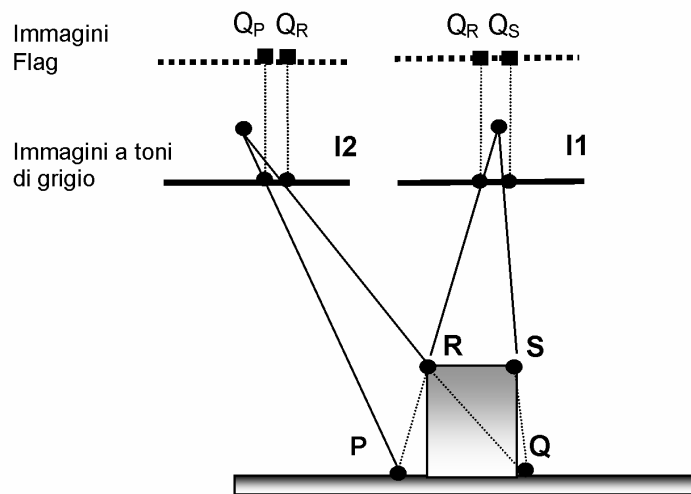


Figura 132 - Schema della procedura di ortoproiezione

Quando si passa a proiettare il punto **Q**, il primo tentativo comporta l'utilizzo del pixel corrispondente in **I₁**, che è già stato usato per il punto **S**: il flag inibisce la lettura del valore radiometrico. Il secondo tentativo comporta l'utilizzo del pixel corrispondente in **I₂**, che è già stato usato per il punto **R**. In questo caso, non essendo disponibili altre immagini, l'ortoproiezione del punto **Q** non può essere definita: esso viene rappresentato mediante un valore convenzionale (ad es. bianco = 255).

Questo semplice esempio descrive tutti i casi che possono presentarsi durante la procedura di ortoproiezione.

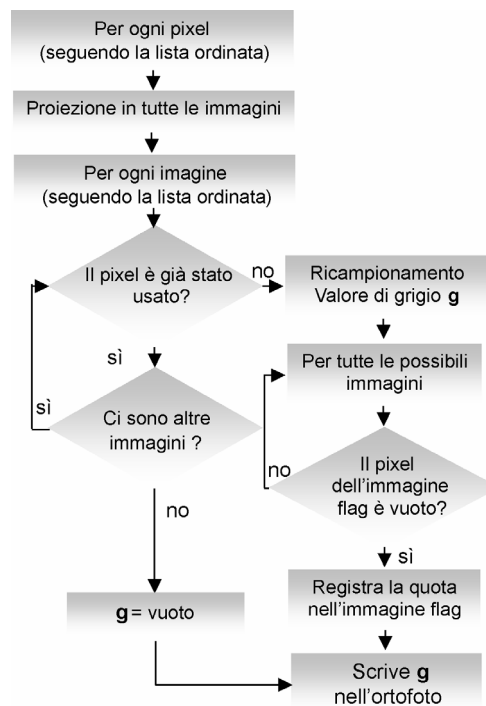


Figura 133 - Diagramma di flusso di ACCORTHO

La procedura descritta nel precedente paragrafo è stata implementata in uno specifico software denominato **ACCORTHO** (**ACC**urate **ORTHO**projection).

I dati di input sono un grigliato denso regolare generato a partire da un **DTM** irregolare, acquisito mediante un laser scanner, e un insieme di immagini digitali orientate. Il software opera in due passi separati. Nel primo, si occupa di preparare i dati per l'elaborazione. In particolare:

calcola le quote di ogni pixel dell'immagine di output (l'ortofoto di precisione) e ordina i pixel secondo quote decrescenti;

estrae le porzioni delle immagini digitali coinvolte nell'ortoproiezione;

prepara un indice delle immagini, per trovare, quando è possibile, il valore radiometrico. Le immagini sono ordinate sulla base della distanza tra il centro di proiezione e il pixel considerato;

genera una *immagine flag* vuota per ogni immagine di input.

Il secondo passo della procedura realizza il processo descritto nel paragrafo precedente. La Figura 133 mostra il diagramma di flusso delle funzioni di base.

4.9.4.5.4 Un esempio di ortofoto di precisione in area urbana

Le funzionalità del software **ACCORTHO** sono state verificate in pratica, mediante un'applicazione di fotogrammetria aerea inerente l'ortofoto di precisione di un centro urbano. Il test è inserito nell'ambito di un programma di ricerca nazionale cofinanziato dal MURST e comprende un insieme di dati, riferiti alla città di Pavia, che sono stati utilizzati per la sperimentazione: tra essi, un volo fotogrammetrico a bassa quota e un insieme di acquisizioni effettuate con laser scanner aviotrasportato di produzione TOPOSYS e QUATER. Per la realizzazione dell'ortofoto di precisione è stata scelta una zona del centro storico, con tessuto urbano fitto e in presenza di torri.

In questa area test, l'acquisizione del laser scanner ha prodotto un **DTM** irregolare con circa 15 punti/m². È stato generato il **DTM** regolare con dimensione della griglia di 0.5 m. Questo **DTM** presentava il 26 % circa di punti indefiniti. L'uso del filtro mediana ha permesso di ridurre questa percentuale al 4 %. I nodi della griglia aventi quota ancora incognita sono stati completati per mezzo di restituzione fotogrammetrica manuale.

L'area test è contenuta in sei immagini che sono state orientate mediante triangolazione aerea, utilizzando punti d'appoggio a terra rilevati con tecniche GPS. La Figura 134 mostra l'ortofoto prodotta mediante un software tradizionale disponibile sul mercato (ENVI) utilizzando, una sola immagine e un DTM che descrive il solo terreno. Si notano i vari problemi evidenziati in precedenza: sono visibili le facciate degli edifici, i tetti sono rappresentati in posizioni non corrette.

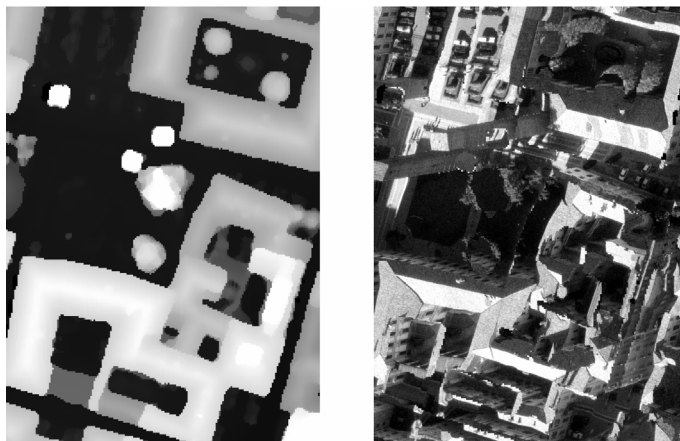


Figura 134 - Il DTM regolare utilizzato e l'ortofoto tradizionale

La stessa ortofoto è stata realizzata utilizzando **ACCORTHO**. In Figura 135 sono evidenziate le porzioni delle 6 immagini utilizzate, le immagini flag associate e un indice grafico delle immagini utilizzate per la generazione dell'ortoproiezione dei vari pixel.

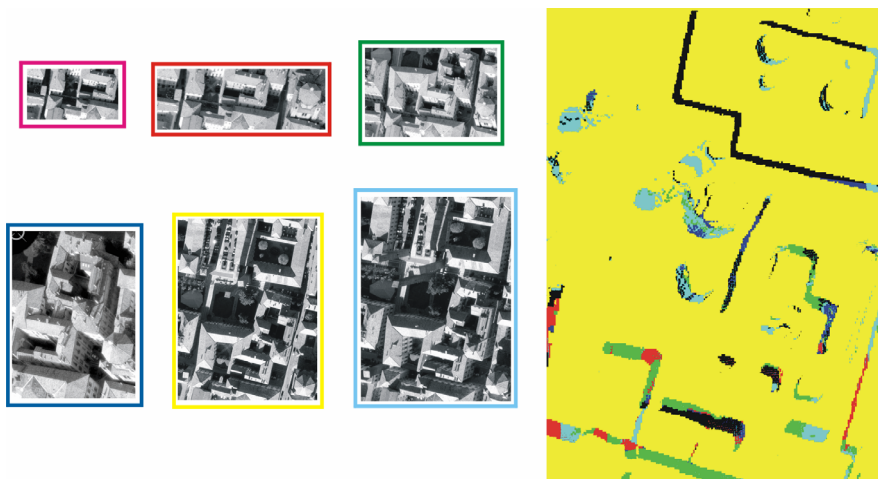


Figura 135 - Immagini utilizzate e indice grafico

La Figura 136 mostra l'ortofoto dell'area test realizzata con **ACCORTHO** e la sovrapposizione con una restituzione fotogrammetrica al tratto che permette di valutarne la precisione. Mediante la misurazione degli scarti presenti tra la cartografia numerica e l'ortofoto si può stabilire che il prodotto di **ACCORTHO** è in grado di soddisfare gli standard richiesti per un'ortofoto alla scala 1:1000.

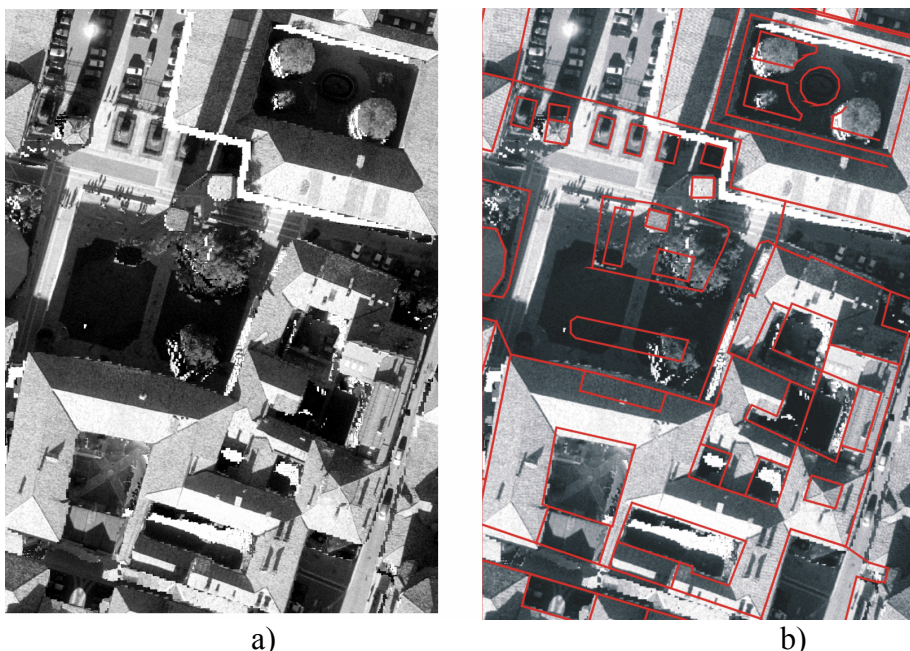


Figura 136 - Ortofoto di precisione (a) e sovrapposizione con restituzione fotogrammetrica (b)

4.9.4.6 Ortofoto solida di precisione

L'ortofoto solida di precisione sintetizza i pregi dei due prodotti appena descritti. Essa si configura come la fusione del contenuto metrico bidimensionale e cromatico dell'ortofoto di precisione con il contenuto tridimensionale di un **DDEM** dell'oggetto rappresentato generato

in genere utilizzando apparati di scansione laser. La necessità di possedere un **DDEM** non costituisce un vero problema, in quanto esso è richiesto per la produzione dell'ortofoto di precisione, e quindi già disponibile come sotto prodotto.

Una immagine digitale (e di conseguenza anche un'ortofoto di precisione) è formata in genere da tre matrici all'interno delle quali sono contenute le componenti cromatiche fondamentali **R**, **G** e **B** (Rosso, Verde e Blu) dell'oggetto ripreso. L'ortofoto solida di precisione (**OSP**) è definita come una ortofoto di precisione alla quale viene aggiunta una matrice contenente l'informazione ottenuta dal **DDEM**, utilizzato per produrla.

Sia data un'ortofoto di precisione che per sua natura è correttamente georeferenziata in un sistema di riferimento noto. Si conoscono per esempio:

le coordinate (x_0, y_0) nel sistema di riferimento utilizzato del centro del pixel in altro a sinistra dell'immagine, ovvero in posizione (1,1) all'interno della matrice immagine ;
la dimensione del pixel dell'ortofoto in unità metriche (d).

Ne consegue che l'individuazione di un pixel in posizione (c, r) all'interno della matrice dell'ortofoto permette di determinarne le coordinate planimetriche, secondo la ben nota relazione:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + d * (c - 1) \\y &= y_0 - d * (r - 1)\end{aligned}\quad (66)$$

Sia dato un **DDEM** memorizzato in forma di matrice bidimensionale $q(i, j)$ e avente passo della griglia pari alla dimensione del pixel dell'ortofoto in unità metriche (d), dimensioni uguali al numero di righe e di colonne dell'ortofoto e posizione dei nodi coincidente con i centri dei pixel dell'ortofoto associata. Ne consegue che individuare un pixel in posizione (c, r) all'interno dell'ortofoto permette di estrarre una quota $q(c, r)$ nella stessa posizione. E' pertanto, è possibile determinare anche la terza dimensione aggiungendo alle relazioni precedenti un'equazione molto semplice, ottenendo le relazioni fondamentali dell'ortofoto solida:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + d * (c - 1) \\y &= y_0 - d * (r - 1) \\z &= q(c, r)\end{aligned}\quad (67)$$

La Figura 137 espone in forma grafica il principio dell'OSP.

La tradizionale struttura a matrici **RGB** delle immagini digitali è facilmente integrabile attraverso l'aggiunta di una nuova matrice nella quale sono inserite le informazioni delle quote. In particolare, per ogni pixel di una **OSP**, è possibile registrare:

i 3 valori di intensità delle componenti cromatiche fondamentali (**RGB**, Red, Green, Blue) quantizzati in scale da 0-255 (1 byte ciascuna secondo gli standard sulle immagini digitali in colori veri) per un totale di 3 byte;

un valore di quota derivato dal **DDEM** espresso in forma numerica.

Se la quota viene espressa in mm, 2 bytes possono rappresentare un valore compreso tra -327.67 m e +327.68 m (tra 0 e 65.535 se non si utilizza il bit di segno). La memoria richiesta per immagazzinare una ortofoto solida di precisione è solamente il 66% maggiore rispetto a una semplice ortofoto. Se le quote considerate sono maggiori di questo limite, è possibile utilizzare un numero in virgola mobile di 4 bytes in grado di contenere ogni possibile valore (fino a -99.999 m, se la quota viene espressa in mm).

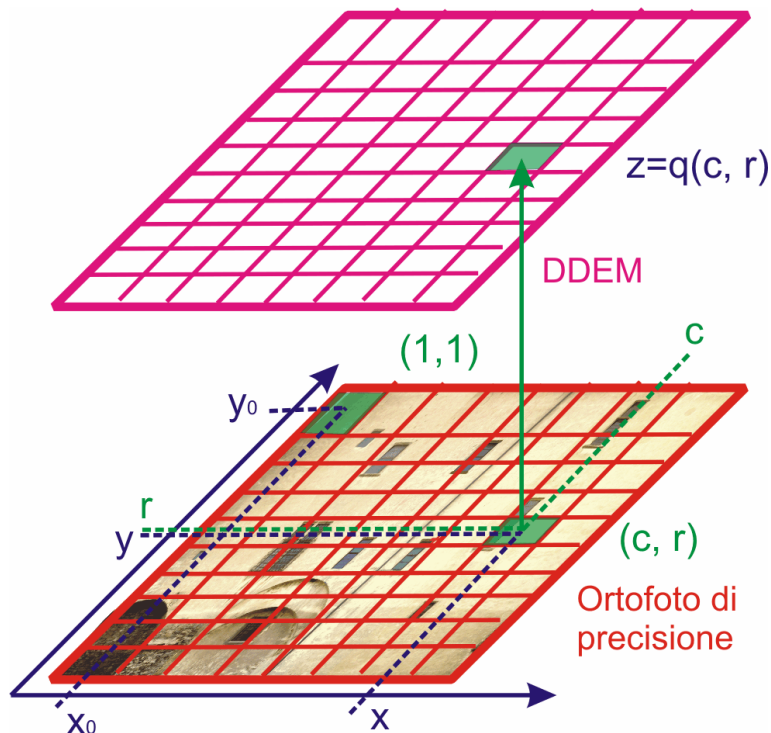


Figura 137 - Il principio dell'ortofoto solida di precisione

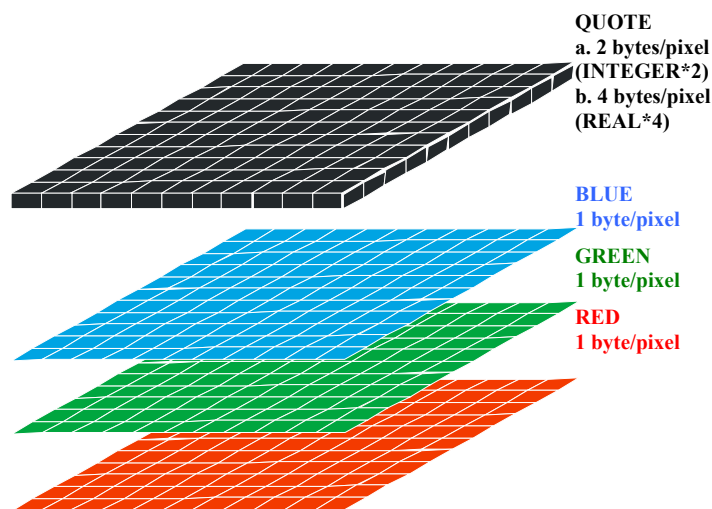


Figura 138 - La struttura dell'OSP

Vista la semplicità della sua struttura, una **OSP** può essere prodotta in modo molto semplice mediante ricampionamento del **DDEM** alla dimensione del pixel dell'ortofoto di precisione e taglio in modo da avere matrici aventi le stesse dimensioni in termini di riga e colonna posizionate nella stessa locazione.

Utilizzando le specifiche precedentemente descritte, l'ortofoto solida di precisione permette di estrarre informazioni tridimensionali di un oggetto in modo semplice, economico e rapido. Allo scopo, gli autori hanno sviluppato un nuovo software (denominato "**OSP**") implementato in Visual Fortran con l'ausilio di librerie grafiche specifiche (le GINO Routines). Questo strumento mette a disposizione dell'utente semplici funzioni per l'uso e l'interrogazione di una ortofoto solida di precisione:

pan e zoom, per muoversi all'interno della **OSP** utilizzando il voluto livello di ingrandimento;
visualizzazione in tempo reale delle coordinate tridimensionali dell'oggetto in corrispondenza della marca di collimazione;
alcune funzioni di misura di grandezze estratte dalle informazioni tridimensionali memorizzate (distanze, angoli, aree, volumi);
la possibilità di effettuare semplici restituzioni in linea (gestione di punti, linee, aree) con esportazione in formato dxf; questa funzione non ancora pienamente attiva ma in corso di implementazione.

Tutte queste funzioni sono semplicissime e non richiedono operatori addestrati rendendo disponibile la tecnologia ad esperti di altri campi per analisi di settore. L'interfaccia-utente, visibile in Figura 139, è suddivisa in:

- una finestra principale con la visualizzazione dell'ortofoto di precisione al cui interno si muove la marca di collimazione;
- un'area in alto a destra che contiene il nome del file visualizzato;
- subito sotto, una finestra che mostra, in tempo reale, le coordinate 3D del punto individuato dalla marca di collimazione;
- una zona in cui sono concentrati gli strumenti di misura;
- in basso a destra, una fascia con l'indicazione della scala di visualizzazione.



Figura 139 - Un esempio di ortofoto solida di precisione in ambito urbano (Comune di Torino, Piazza Vittorio)

In Figura 140 è possibile osservare il **DDEM** "nascosto" dalla visualizzazione dell'ortofoto di precisione: è proprio questa informazione che ci permette di ottenere informazioni tridimensionali. La Figura 141 e la Figura 142 illustrano invece le funzionalità di interrogazione e misura dell'**OSP**.

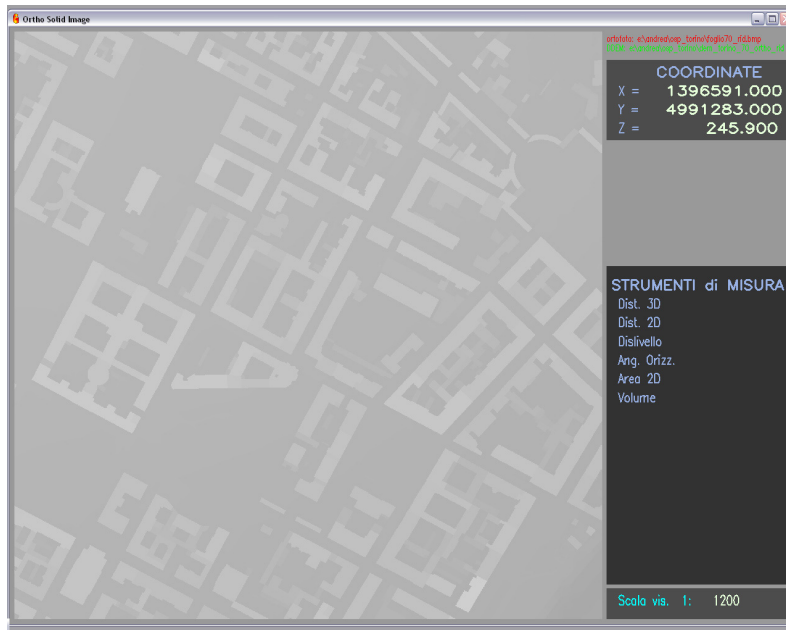


Figura 140 - Il DDEM "nascosto"

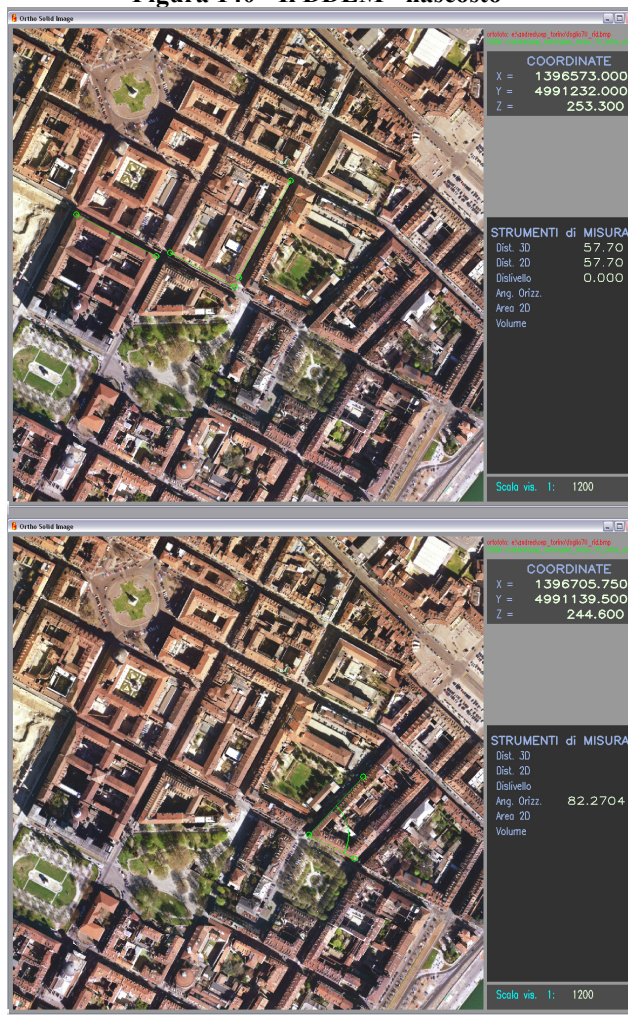


Figura 141 - La misura di distanze e angoli

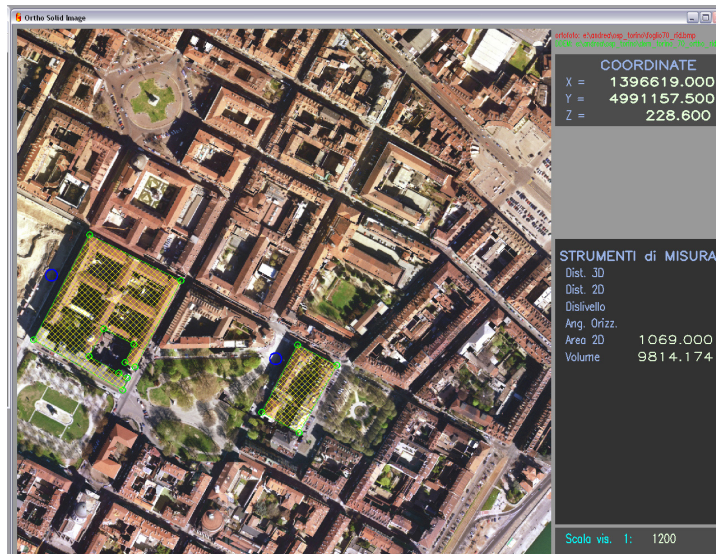


Figura 142 - La misura di aree e volumi

In conclusione, l'ortofoto solida di precisione è una forma di rappresentazione che coniuga in modo efficace, semplice ed economico le informazioni metriche e cromatiche contenute nell'ortofoto rigorosa con il dato tridimensionale derivato da un modello di forma dell'oggetto in forma di **DDEM**. La sua produzione infatti è interamente automatica e non richiede costi aggiuntivi in quanto utilizza il **DDEM** che è già stato generato per la definizione dell'ortofoto di precisione (è necessaria solamente un po' di elaborazione batch per organizzare i dati in una forma autoconsistente).

L'ortofoto solida di precisione può essere visualizzata mediante il software OSP che fornisce alcuni semplici strumenti per la sua gestione e interrogazione, mettendo a disposizione di utenti esperti in campi differenti dalla geomatica (architetti, restauratori ecc.) un potente strumento di analisi. Lo sviluppo di questo software, per ora ancora allo stato prototipale, permetterà in futuro di realizzare semplici restituzioni dell'oggetto con una connessione diretta con un sistema informativo territoriale acquisendo un ulteriore valore aggiunto.

4.9.5 La Stereofotocarta

L'evoluzione delle tecniche di rilievo ha evidenziato con sempre maggior forza la particolare vocazione delle tecniche fotogrammetriche a rappresentare il metodo più idoneo per giungere ad una rappresentazione completa, non solo geometrica, del territorio.

La possibilità di unire alla classica rappresentazione vettoriale anche una documentazione fotografica rappresenta a volte l'unico modo per consentire agli utenti di soddisfare alle proprie specifiche esigenze di conoscenza, quando la possibilità di georeferenziare informazioni descrittive, quali ad esempio la composizione materica degli oggetti, costituisce un requisito fondamentale.

Particolarmente apprezzata è stata negli anni scorsi la possibilità di produrre strumenti di descrizione cartografica che unitamente alla geometria consentivano una fotointerpretazione diretta da parte dell'utente finale, e quindi non viziata da classificazioni eseguite da persone non esperte nel particolare settore di impiego della cartografia. Geologi, urbanisti, pianificatori sono alcuni esempi di utenti che richiedono alla cartografia tutta una serie di informazioni che esulano dai contenuti classici.

I fotopiani e le ortofotocarte rappresentano senza dubbio un buon strumento di progettazione e di analisi per quella particolare categoria di utenti per i quali le informazioni geometriche e descrittive intervengono con pari importanza nel processo progettuale.



Le rappresentazioni piane unite a informazioni altimetriche, rappresentate sotto forma di punti quotati, curve di livello e modelli digitali delle altezze (DEM), sono sufficienti allo sviluppo delle analisi progettuali, nel caso delle analisi geologiche e idrologiche diventa fondamentale poter gestire in modo completo la tridimensionalità di ambiti territoriali estesi in modo da poter comprendere in modo oggettivo i fenomeni di interesse.

Un altro limite alle analisi territoriali estese su ampie superfici è rappresentato dal frazionamento delle informazioni geometriche e fotografiche in elementi di limitata estensione: gli elementi della cartografia e i fotogrammi.

Grazie allo sviluppo delle tecniche di fotogrammetria digitale è possibile pensare alla definizione di un nuovo strumento nel quale le informazioni geometriche tridimensionali costituiscono la struttura portante per la georeferenziazione tridimensionale diretta (e non interpolata) di tutte le informazioni descrittive contenute nelle immagini fotografiche a prescindere dai limiti imposti dalle convenzioni dei tagli cartografici e del formato dei fotogrammi aerei.

Questo nuovo strumento di descrizione cartografica viene nel seguito indicato con il termine di **stereofotocarta**: “**stereo**” in quanto deve consentire di ottenere tutte le informazioni geometriche in forma tridimensionale, “**foto**” in quanto il dato rappresentato è l’immagine fotografica dell’oggetto in esame, “**carta**” perché tutti i punti immagine osservabili nello spazio rappresentato sono associati al riferimento cartografico nazionale.

La stereofotocarta è costituita, dunque, dall’insieme dei modelli stereoscopici che costituiscono il blocco fotogrammetrico descrivente l’ambito territoriale di interesse. Con un semplice strumento di visione stereoscopica, l’utente può muoversi all’interno di tale realtà tridimensionale in modo del tutto analogo a quanto avviene in un restitutore fotogrammetrico durante le fasi della restituzione. L’utente è dotato di una marca stereoscopica di collimazione che consente di individuare con precisione i punti di interesse.

4.9.5.1 Proprietà della stereofotocarta

Così come la cartografia numerica può essere consultata indipendentemente dal classico taglio dei fogli che caratterizza la cartografia al tratto, la stereofotocarta, per poter assolvere alla funzione di strumento completo di documentazione cartografica, deve consentire all’utente un’esplorazione in continuo su tutto l’ambito tridimensionale rappresentato.

L’utente inoltre deve poter interrogare la stereofotocarta e leggere in modo diretto le coordinate cartografiche di un qualsiasi punto scelto a partire dalle quali è possibile ottenere informazioni geometriche aggiuntive rispetto a quelle tradizionalmente leggibili e/o ricavabili con metodi interpolativi dalla cartografia tecnica vettoriale, quali distanze tra punti, aree e volumi definiti da una poligonale, oppure produrre elaborati grafici elementari quali profili lungo poligonali definite dall’utente, sezioni, ecc.

Tutte queste possibilità, a primo avviso, rendono la stereofotocarta del tutto paragonabile ad un qualsiasi supporto di cartografia numerica tradizionale. In realtà, già in queste semplici interrogazioni geometriche, la stereofotocarta si dimostra uno strumento notevolmente più affidabile di una qualsiasi rappresentazione vettoriale tridimensionale di un ambito territoriale.

Infatti, in una cartografia vettoriale la descrizione geometrica, per quanto densa possa essere, è pur sempre una descrizione fatta mediante un numero discreto di punti. L’utente che desideri conoscere la quota di un punto non descritto completamente dalla cartografia deve obbligatoriamente interpolarla tenendo conto delle quote dei punti ad esso più vicini. Nella stereofotocarta, invece, uno qualsiasi degli infiniti punti collimabili da parte dell’utente è determinato direttamente nella sua tridimensionalità (vedi Figura 143). Questo è possibile perché la collimazione di un punto nella stereofotocarta comporta la lettura diretta delle coordinate fotogramma delle immagini omologhe a partire dalle quali, con gli algoritmi propri del-

la fotogrammetria, si ha la determinazione, indipendente da qualsiasi altra condizione al contorno, delle coordinate cartografiche (vedi Figura 144).

Infine, la stereofotocarta mantiene, al pari delle ortofotocarte, la proprietà di rendere disponibili tutte le informazioni metriche e descrittive dei fotogrammi e quindi di consentire, all'utente finale della cartografia, la selezione ragionata e mirata degli elementi di interesse.

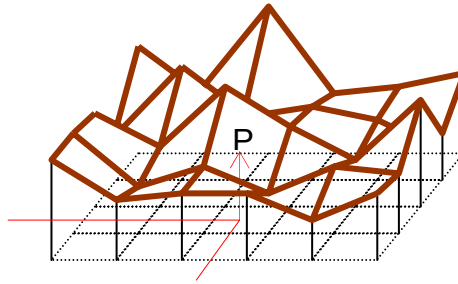


Figura 143 - Determinazione delle coordinate di un punto nella cartografia numerica

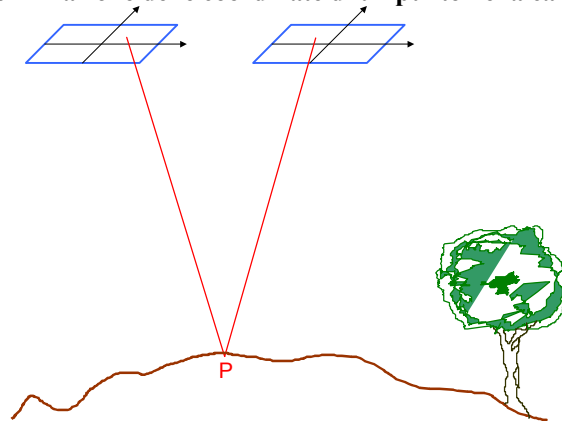


Figura 144 - Determinazione delle coordinate di un punto nella stereofotocarta

4.9.5.2 *Formazione della stereofotocarta*

Considerando che la stereofotocarta è formata dall'insieme dei fotogrammi orientati che costituiscono un blocco fotogrammetrico, è chiaro che il processo che porta alla formazione di questo nuovo strumento di descrizione cartografica, coincide con il normale processo produttivo di una carta fotogrammetrica numerica limitatamente alle fasi di presa, appoggio e orientamento.

Nel seguito vengono sommariamente descritte le fasi operative che consentono di giungere alla produzione della stereofotocarta

4.9.5.2.1 Digitalizzazione dei fotogrammi

A partire dalle diapositive dei fotogrammi, solitamente ancora acquisiti con camere fotografiche tradizionali, si procede alla loro digitalizzazione mediante un procedimento di hard-copy scanning. Si possono utilizzare scanner fotogrammetrici oppure scanner DTP con risoluzioni ottiche pari o superiori a 800 dpi (risoluzione geometrica minima necessaria per garantire precisioni di restituzione in linea con quelle richieste dai più diffusi Capitolati Speciali d'Appalto per la formazione di cartografia fotogrammetrica e per consentire una agevole osservazione mediante video) e aree di scansione utili all'acquisizione dei fotogrammi aerei (9" x 9") dotati di dispositivo di acquisizione per trasparenza.

Lo scanner deve essere calibrato per poter eliminare le deformazioni geometriche residue che tali strumenti introducono durante il processo di scansione.

Mentre tale calibrazione può essere ritenuta stabile in un intervallo temporale paragonabile alla stabilità metrica dei tradizionali restitutori analitici per gli scanner fotogrammetrici, l'uso degli scanner DTP richiede una calibrazione che deve essere ripetuta almeno giornalmente.

In quest'ultimo caso, le deformazioni geometriche indotte dallo scanner DTP devono essere eliminate per consentire la corretta individuazione dei punti omologhi mediante la visione stereoscopica. L'esperienza ha dimostrato che è preferibile operare sempre sul file originario dell'immagine, operando di volta in volta la calibrazione nei punti di interesse (calibrazione in linea), piuttosto che operare su immagini ricampionate, prive sì delle deformazioni causate dallo scanner DTP (calibrazione fuori linea), ma di qualità più scadente per effetto del ricampionamento.

Il file dell'immagine è quindi associato a un secondo file contenente i parametri del modello matematico che descrive la deformazione geometrica indotta dallo scanner e che tiene conto anche:

- della trasformazione piana che converte le coordinate immagine, X_i , Y_i , in coordinate riferite al sistema fiduciale, X_f , Y_f , (vedi figura 2);
- delle eventuali distorsioni radiali (distorsione, rifrazione);
- della traslazione dovuta alla posizione del punto principale.

Questo accorgimento consente di disporre immediatamente, per ogni pixel dell'immagine acquisita, delle coordinate da utilizzare per la soluzione dei successivi problemi di orientamento.

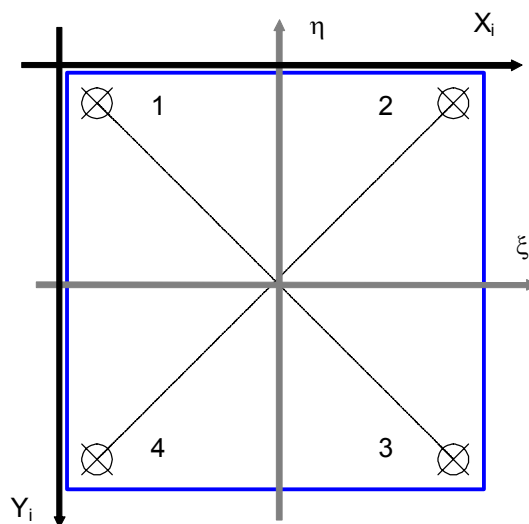


Figura 145 - Sistema delle coordinate immagine e sistema di riferimento fiduciale

4.9.5.2.2 Determinazione dei parametri di orientamento esterno dei fotogrammi

La determinazione dei parametri di orientamento esterno dei fotogrammi può essere eseguita, come è noto, secondo due diverse modalità. La prima prevede l'esecuzione di una triangolazione fotogrammetrica a modelli indipendenti e il successivo orientamento esterno di coppie di fotogrammi, mentre la seconda prevede l'esecuzione di una triangolazione fotogrammetrica a stelle proiettive, che fornisce direttamente i parametri dell'orientamento esterno di ogni fotogramma del blocco.

Il primo metodo è sicuramente il più noto nel mondo delle Ditte private che operano nell'ambito del rilevamento fotogrammetrico ed è ancora oggi il più utilizzato.

Il secondo metodo, pur non essendo ancora largamente diffuso, presenta il vantaggio di risolvere il problema dell'orientamento esterno secondo una logica che meglio si adatta alla natura digitale dei dati primari.

4.9.5.2.3 Organizzazione dei dati

Tutti i dati (immagini e relativi file di calibrazione e orientamento) relativi a una stereofotocarta costituiscono un'insieme definito PROGETTO.

All'interno di ogni progetto possono essere definiti diversi sottoprogetti denominati STEREOPARTIZIONI ognuno dei quali contiene la stereofotocarta di una porzione (al limite coincidente con l'intera area di lavoro) dell'area gestita dal progetto. Si tratta di una semplice suddivisione di comodo che consente all'utente una migliore organizzazione del lavoro per comparti del territorio da gestire.

Ogni sottoprogetto contiene due partizioni MODELLO riservate rispettivamente alle prese aeree e alle prese terrestri eventualmente presenti per consentire la visualizzazione degli elementi non consultabili mediante vista aerea.

Ogni partizione MODELLO contiene una o più sottopartizioni EPOCA contenenti le informazioni suddivise in base al criterio della data di ripresa; in questo modo si consente all'utente l'accesso a serie di riprese, eseguite in periodi diversi, del medesimo ambito territoriale.

Infine ogni EPOCA contiene una o più partizioni SCALA ognuna delle quali contiene le immagini aventi un medesimo fattore medio di scala. Questo consente all'utente di eseguire, all'interno di un medesimo progetto, indagini a livelli diversi di approfondimento.

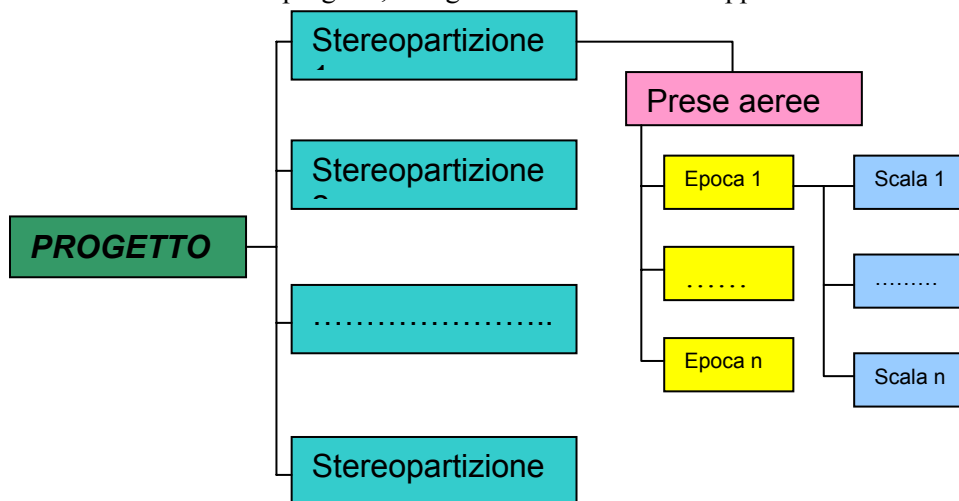


Figura 146 - Struttura gerarchica per la memorizzazione dei dati di una stereofotocarta

4.9.5.3 *Utilizzo della Stereofotocarta: il Navigatore 3D*

Ogni descrizione cartografica, per poter essere consultata, necessita di un opportuno strumento in grado di evidenziare chiaramente tutto il contenuto metrico e descrittivo del documento.

La consultazione di una carta al tratto può essere eseguita grazie alla presenza della legenda che esplicita il significato descrittivo attribuito alle linee, ai simboli e alle campiture oltre ad un reticolato chilometrico e/o geografico che rende possibile la misura delle coordinate planimetriche per ogni punto di interesse. La lettura delle quote può essere fatta direttamente per i punti quotati e per quelli appartenenti alle curve di livello, mentre per tutti gli altri punti



essa avviene mediante metodi interpolativi. La misura di aree può essere effettuata in modo diretto mediante l'uso di planimetri, così come la misura di distanze cartografiche può avvenire mediante l'uso di scalimetri. Tutte le altre informazioni ricavabili da una carta devono essere determinate manualmente da parte dell'utente.

Parimenti, la consultazione di una cartografia numerica viene condotta correttamente mediante un software di disegno automatico (ad esempio AUTOCAD, MICROSTATION, ecc.) che consente di evidenziare i valori delle coordinate planoaltimetriche di tutti i punti selezionati durante la formazione della carta. Nel caso in cui si desiderino conoscere le coordinate planoaltimetriche di un punto non descritto esplicitamente dalla cartografia, l'utente sceglie liberamente una coppia di coordinate planimetriche e ricava, mediante metodi interpolativi il valore della quota. A partire da queste coordinate i sistemi di disegno automatico consentono il calcolo di grandezze derivate quali, ad esempio, lunghezze di spezzate, aree racchiuse da poligoni, generazione degli elementi essenziali per il tracciamento di profili longitudinali e di sezioni. Il contenuto descrittivo di una cartografia numerica è trasmesso all'utente mediante l'utilizzo di codici che caratterizzano le entità e gli elementi rappresentati, per cui l'utente con semplici interrogazioni può evidenziare il codice attribuito al particolare in esame e, mediante il repertorio degli elementi e delle entità che ha dato origine alla produzione della carta, risalire al significato attribuito al particolare esaminato.

Nessuno degli strumenti prima brevemente descritti può essere utilizzato per la consultazione della stereofotocarta. La particolare natura di questa cartografia richiede l'implementazione di uno strumento in grado di mettere a disposizione dell'utente tutto il contenuto metrico e descrittivo che la stereofotocarta, seppur in modo non esplicito, contiene.

La stereofotocarta si presenta, da un punto di vista informatico, come un insieme logicamente connesso di immagini raster e di file alfanumerici. Il particolare tipo di consultazione che si vuole realizzare con questi dati non è riscontrabile in nessuno degli strumenti software presenti oggi sul mercato. Per questo motivo l'Unità di Ricerca del Politecnico di Torino ha realizzato lo studio di fattibilità di uno strumento di consultazione per la stereofotocarta, promuovendo e coordinando la realizzazione di un prototipo aderente alle linee guide del progetto. Questo strumento viene nel seguito indicato **NAVIGATORE 3D**, anche se, la natura dei dati costituenti la stereofotocarta consente di attribuire ad esso tutta una serie di funzionalità e automatismi che conferiscono al NAVIGATORE 3D potenzialità paragonabili a quelle di un vero e proprio restitutore fotogrammetrico.

Il concetto del NAVIGATORE 3D ha trovato nel software STEREOSPACE (prodotto e distribuito dalla Menci Software) la sua migliore realizzazione pratica.

4.9.5.3.1 Funzionalità di Stereospace

Considerata la natura della stereofotocarta, lo strumento di consultazione deve garantire le seguenti funzionalità:

- libertà di movimento all'interno dell'intero blocco fotogrammetrico senza soluzione di continuità;
- determinazione delle coordinate di tutti gli infiniti punti in essa contenuti a partire dalle immagini digitali dei fotogrammi e dai parametri di orientamento esterno di ognuno di essi;
- esecuzione di calcoli di distanze, aree e volumi;
- produzione di elaborati vettoriali derivati quali restituzioni vettoriali generiche, profili e sezioni, modelli digitali delle altezze (DEM).

Stereospace deve essere supportato da un sistema di visione stereoscopica che consenta all'utente l'individuazione approssimata dei punti di interesse in base alla quale leggere le coordinate dei punti omologhi e determinare le coordinate tridimensionali del punto scelto.



4.9.5.3.2 Dotazione hardware di Stereospace

La dotazione hardware necessaria per un agevole funzionamento di Stereospace è costituita da un calcolatore e dalle periferiche necessarie per consentire la visione stereoscopica da parte dell'utente.

Per poter configurare in modo corretto le potenzialità del calcolatore in grado di gestire lo strumento di consultazione della stereofotocarta occorre analizzare con attenzione i dati che devono essere gestiti in condizioni di normale impiego di Stereospace.

Poiché Stereospace deve garantire una buona visione delle immagini raster per consentire anche a operatori non esperti la corretta interpretazione della stereofotocarta si decide di adottare come standard una risoluzione geometrica variabile tra 800 dpi e 1000 dpi in modo da garantire una buona definizione dei particolari delle immagini e, nello stesso tempo, non appesantire eccessivamente la mole di dati da gestire.

Nel caso di fotogrammi in bianco e nero la radiometria viene memorizzata a 256 livelli, mentre nel caso di fotogrammi a colori la radiometria viene memorizzata mediante le tre bande fondamentali Rosso, Verde e Blu ognuna discretizzata in 256 livelli.

Considerando un fotogramma aereo 9" x 9" la dimensione del file (nell'ipotesi di una risoluzione pari a 1000 dpi) risulta essere di circa 80 Mb in bianco e nero e pari a circa 240 Mb nella versione a colori; tali dimensioni possono essere facilmente gestite con i moderni PC dotati di RAM di dimensione maggiore o uguale a 512 Mb.

L'archiviazione dei fotogrammi digitalizzati può avvenire mediante l'uso dei formati compressi quali JPEG e ECW.

Questi formati appartengono alla categoria dei compressori lossy, ossia formati in grado di memorizzare in forma compressa immagini digitali a prezzo di una perdita di contenuto radiometrico.

Gli studi sperimentali eseguiti presso il Politecnico di Torino e confermati da analoghe esperienze svolte presso altre sedi universitarie hanno confermato la possibilità di utilizzare per l'archiviazione dei fotogrammi formati compressi quali il JPEG e l'ECW sotto opportune condizioni.

Il formato ECW non è ancora sufficientemente diffuso per poter essere assunto quale formato standard di archiviazione, mentre il formato JPEG è supportato da tutti gli applicativi e quindi da considerarsi preferibile. In questo caso è però necessario limitare il livello di compressione a valori superiori a 1/10 in modo da non causare decadimenti di precisione significativi durante l'osservazione stereoscopica.

La configurazione consigliata per l'hardware di Stereospace risulta così definita:

- CPU PENTIUM III (almeno 800 Mhz) o PENTIUM IV
- RAM 512 Mb
- 2 HD EIDE ULTRA ATA 100 da 10 Gb di cui uno per programmi e sistema operativo e l'altro per la memorizzazione temporanea di dati;
- 2 HD EIDE ULTRA ATA 100 da 60 Gb montati su cassetto estraibile ed intercambiabile;
- video (19" o 21") con frequenza pari a 120 Hz o superiore
- scheda video STEREO READY di tipo OXYGENE GWX1 PRO di produzione 3dLabs;
- lettore DVD (compatibile CD Rom);
- Mouse con rotella scroll (consigliato in versione optical mouse);



- Trackball seriale Logitech;
- Eventuale scheda di rete per lo scambio di dati interno all'ente;
- Tastiera;
- Sistema operativo WINDOWS NT 4.0;
- Sistema per la visualizzazione stereoscopica mediante occhiali LCD o Zscreen e occhiali a polarizzazione passiva.

Tale configurazione è da ritenersi ottimale considerando hardware non particolarmente aggiornato agli standard attuali. Ogni elemento elencato può essere sostituito e/o intergrato da prodotti di analoghe o superiori prestazioni.

La dimensione della RAM prevista consente di gestire comodamente le porzioni delle due immagini formanti il modello stereoscopico osservato dall'utente lasciando libero un grande spazio di memoria per la gestione degli applicativi.

La presenza di due HD da 10 Gb l'uno è stata prevista in modo da poter riservare un disco rigido al deposito delle immagini costituenti l'intero blocco in esame e l'altro alla memorizzazione del sistema operativo e di tutti gli applicativi di interesse per l'utente.

Il disco rigido di capacità pari a 10 Gb destinato al deposito delle immagini, consente, nelle ipotesi di risoluzione geometrica e di registrazione della radiometria indicate e nell'ipotesi di fotogrammi idonei alla produzione di cartografia alla scala nominale 1:5000, la memorizzazione di circa 400 fotogrammi aerei.

La visione stereoscopica è gestita mediante uno schermo polarizzato (Z-Screen) posto di fronte al video e osservato dall'utente mediante occhiali passivi. Questo sistema di visione stereoscopica è risultato il più confortevole per l'utente anche se impegnato in sessioni di osservazioni stereoscopica di alcune ore.

4.9.5.3.3 Dotazione software di Stereospace

La progettazione di Stereospace è stata concepita secondo la moderna logica modulare. Accanto al motore fondamentale, che gestisce la navigazione tridimensionale all'interno dell'intero blocco fotogrammetrico in esame, sono già stati realizzati i moduli ritenuti essenziali per l'interrogazione e la consultazione della stereofotocarta secondo i criteri generali prima enunciati.

Il modulo di base è stato sviluppato interamente in ambiente WINDOWS; esso opera su finestre parallele utilizzando, quindi, le stesse logiche di pratica operatività su PC ormai così ampiamente diffusa in ambito professionale.

Le applicazioni che prevedono l'uso delle immagini digitali del blocco corrispondono a finestre sulle immagini intere che vengono caricate nella RAM del calcolatore.

In tutte le finestre operanti sulle immagini digitali la marca stereoscopica, a disposizione dell'utente per la collimazione dei punti di interesse, è fissa e sono le immagini ad essere movimentate secondo le indicazioni fornite dall'operatore. La marca stereoscopica è controllata mediante un mouse multifunzionale.

4.9.5.3.3.1 **Navigazione**

Il modulo che sovrintende alla navigazione all'interno dei modelli costituenti il blocco rappresenta il cuore del sistema.

Stereospace consente all'operatore di muoversi liberamente all'interno del blocco passando, in modo del tutto trasparente, da un modello a quello successivo indipendentemente dalla di-

reazione di navigazione seguita. La tecnica per garantire un'agevole navigazione all'interno del blocco è stata studiata con particolare cura in modo da ovviare ad alcuni inconvenienti tecnici che potrebbero rendere pesante l'utilizzo del sistema da parte di utenti non esperti.

Si prenda in esame il blocco rappresentato in Figura 147: l'operatore può muoversi in entrambe le direzioni indicate senza subire alcun rallentamento dovuto al cambio delle immagini necessarie a garantire la visione stereoscopica. In particolare muovendosi in direzione longitudinale quando la marca di collimazione passa dal modello 1 al modello 2 è necessario che il sistema sostituisca il fotogramma sinistro del modello 1 con il fotogramma destro del modello 2. In modo del tutto analogo muovendosi in direzione trasversale, quando la marca di collimazione passa dal modello 1 al modello 5 il sistema deve sostituire i due fotogrammi del modello 1 con i due fotogrammi che definiscono il modello 5.

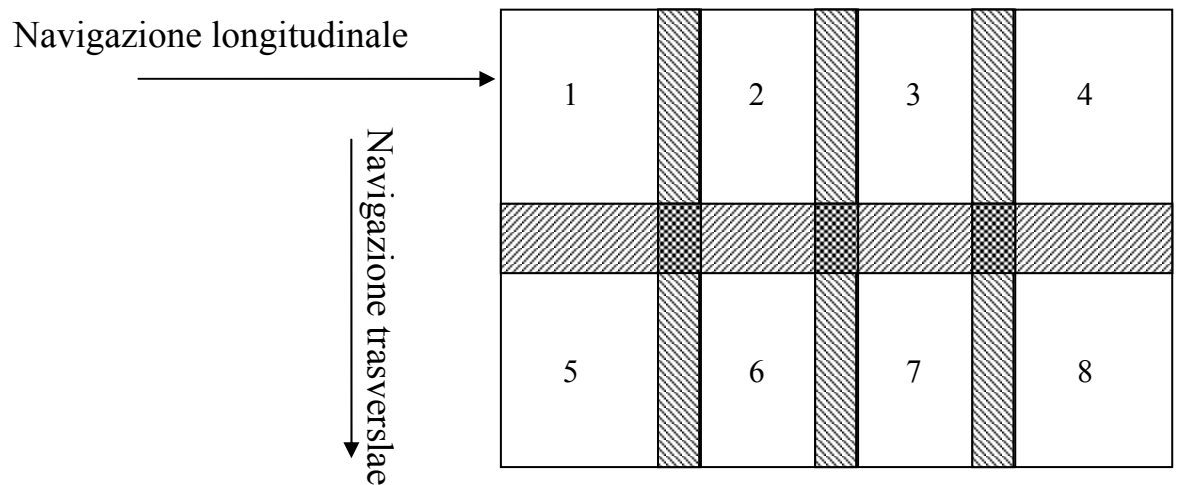
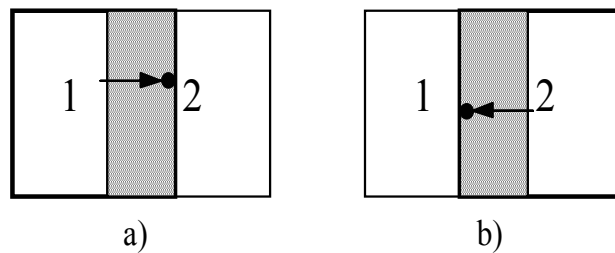
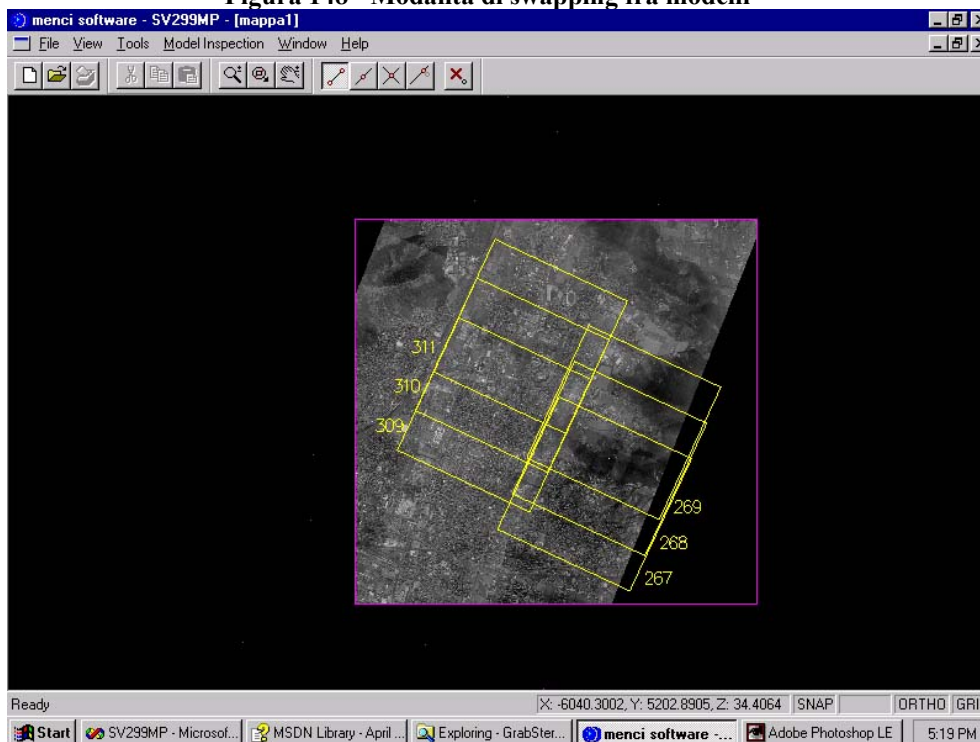


Figura 147 - Schema concettuale di navigazione 3D

Per evitare operazioni di carico e scarico dei dati (swap) continue, quando l'operatore interviene in una zona di passaggio tra modelli contigui, il quale fatto comporterebbe perdite di tempo e rischi di "pendolazione" delle immagini, il sistema considera la zona di sovrapposizione tra i modelli contigui così come schematicamente rappresentata in Figura 147. Lo swap della (o delle) immagine avviene solo quando la marca si trova su uno dei limiti estremi della zona di sovrapposizione. Ad esempio, nel caso della navigazione longitudinale, se la marca si sposta dal modello 1 al modello 2, lo swap avviene solo nel caso indicato nella figura 6-a. Se l'operatore decide di tornare indietro lo swap avviene solo nel caso rappresentato in figura 6-b.

All'operatore viene presentata una finestra all'interno della quale è rappresentata una vista sintetica dell'intero blocco descritto dalla stereofotocarta (solitamente l'immagine raster di una carta preesistente a piccola scala, o un fotomosaico); su di essa sono riportate le zone di abbracciamento dei fotogrammi costituenti il blocco. Con una semplice selezione effettuata con il mouse l'operatore sceglie il punto di inizio dell'esplorazione e provoca l'apertura di una finestra all'interno della quale inizia l'esplorazione stereoscopica della stereofotocarta.

**Figura 148 - Modalità di swapping fra modelli****Figura 149 - La finestra iniziale mostra la zona descritta dalla stereofotocarta**

L'operatore può decidere di attivare più di una finestra stereoscopica relativamente a zone differenti del territorio in studio.

Utilizzando la medesima tecnica di attivazione di più finestre logiche all'interno del video, l'operatore può attivare differenti livelli di zoom della medesima zona e operare simultaneamente su di essi per eseguire analisi dal generale al particolare senza ulteriori interventi del sistema.

4.9.5.3.3.2 Collimazione stereoscopica di punti isolati

La collimazione stereoscopica di un punto isolato avviene con la tecnica a 4 controlli (metodo Helava); in tutte le finestre compaiono le coordinate che definiscono la posizione della marca di collimazione all'interno del sistema di riferimento.

Qualora l'operatore si trova in condizioni di difficoltà dovute ad una eccessiva posizione fuori quota della marca di collimazione, cosa che può rendere impossibile la visione stereoscopica, il sistema prevede un procedimento di ricerca automatica del punto noto più vicino alla attuale posizione della marca di collimazione e la sua visualizzazione nel campo della finestra attiva.

4.9.5.3.3 Memorizzazione di dati numerici

Abbiamo già ricordato come la disponibilità delle coordinate dei punti di interesse in forma numerica richiede al sistema la possibilità di una loro memorizzazione automatica per consentire una elaborazione delle coordinate di tali punti per il calcolo di grandezze derivate quali distanze, aree e volumi. Le stesse coordinate possono essere utilizzate anche per la produzione di elaborati grafici semplici quali profili e sezioni lungo particolari spezzate individuate dall'operatore.

Le coordinate dei punti indicati dall'operatore vengono salvate automaticamente su un foglio elettronico direttamente gestibile dai programmi del pacchetto OFFICE di MICROSOFT. Su questo foglio sono riportati i nomi dei punti (scelti in precedenza dall'operatore e formati da un campo alfanumerico libero e da un campo a numerazione progressiva), le rispettive coordinate, le distanze relative e le eventuali aree racchiuse.



Figura 150 - L'operatore indica il punto di partenza e accede alla finestra stereoscopica

In Figura 152 viene riportata l'immagine di una videata di Stereospace sulla quale sono evidenziati i punti scelti dall'operatore (frecche gialle) e la finestra di testo all'interno della quale compare il foglio elettronico che può essere salvato a discrezione dell'operatore.



Figura 151 - Apertura di finestre relative alla stessa zona con livelli di zoom differenti

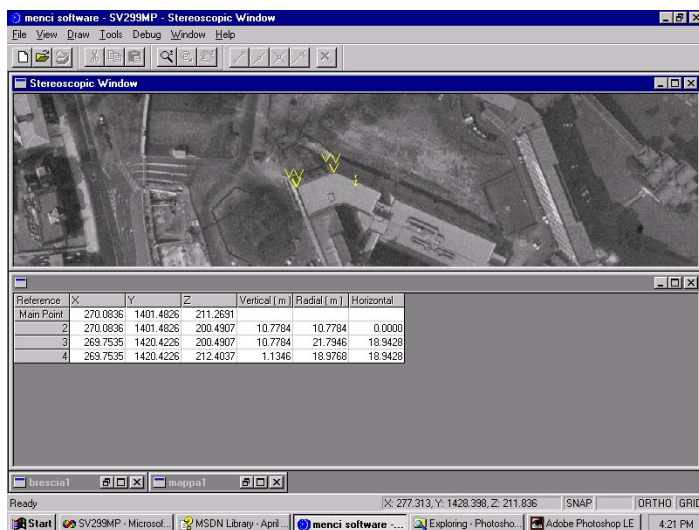


Figura 152 - Memorizzazione delle coordinate dei punti selezionati

4.10 Applicazioni ambientali della fotogrammetria

4.10.1 Variazioni volumetriche di un ghiacciaio

Le oscillazioni temporali della massa di un ghiacciaio sono legate al bilancio quantitativo tra l'entità degli apporti meteorici e l'ablazione. Le variazioni volumetriche nel tempo forniscono importanti indicazioni al fine di rilevare l'esistenza di cambiamenti climatici significativi, in atto o recenti, in aree di cui, generalmente, si ha una limitata disponibilità di serie storiche di dati meteorologici realmente attendibili. In considerazione dell'importante funzione rego-

latrice posseduta nei confronti delle risorse idriche montane, tali indagini consentono inoltre di valutare più correttamente gli elementi che intervengono nei calcoli dei bilanci idrogeologici.

L'evoluzione morfologica di un ghiacciaio è legata all'interazione di fattori concomitanti come la forza di gravità, la plasticità del ghiaccio, la natura del substrato su cui è impostato, gli apporti nevosi e le variazioni climatiche. Nei ghiacciai vallivi di tipo alpino, le maggiori evidenze dei movimenti si hanno in corrispondenza della fronte del ghiacciaio che è soggetta ad alterni fenomeni oscillatori di progressione e regressione dipendenti, in ultima analisi, dalla variazione del volume di ghiaccio. La velocità e l'entità di tale variazione differisce da un ghiacciaio all'altro ed è misurata tradizionalmente attraverso rilievi topografici in sito, generalmente annuali, e comunque ripetuti ad intervalli temporali prefissati. Parallelamente al rilievo a terra, al fine di valutare, a scala di bacino vallivo, l'andamento nel tempo delle variazioni volumetriche, possono essere utilizzate le classiche tecniche di fotointerpretazione multitemporale. Queste forniscono buoni risultati soprattutto nelle aree dove sono disponibili fotogrammi acquisiti ad intervalli temporali regolari. Lo sviluppo delle tecniche di fotogrammetria digitale ed, in particolare, l'introduzione della stereofotocarta e del Navigatore 3D rende possibile un nuovo approccio metodologico alle tecniche di fotointerpretazione. Tali strumenti sono stati utilizzati, principalmente per valutarne i limiti di applicabilità e l'efficacia, nella determinazione delle variazioni volumetriche della massa del ghiacciaio del Rutor (o Rutor) in corrispondenza della fronte Nord nel periodo 1975-1991.

Questo ghiacciaio è situato in Valle d'Aosta, tra la Valgrisanche e il comune di La Thuile, e si estende su una superficie di circa 10 km². Il dislivello complessivo tra il crinale del bacino alimentatore (Testa del Rutor 3485 m.s.l.m.) e la fronte in ablazione è di circa 900 m.

I dati di partenza a disposizione sono rappresentati dalla cartografia in scala 1:10.000 della Regione Valle d'Aosta e da alcuni fotogrammi di voli fotogrammetrici commissionati dal medesimo Ente, eseguiti nel 1975 e nel 1991 aventi caratteristiche riassunte in Tabella 29.

Data	Ora	Camera	Focale [mm]	Quota volo [m]	Quota relativa [m]	Scala media	N° Fotogrammi
5-7-1975	11.57	WILD Uag 411	151.79	5100	2600	1:15.000	1176, 1177
9-8-1991	11.50	WILD 10/4 Uag 13105	153.20	5500	3000	1:17.000	984, 985 986

Tabella 29 - Caratteristiche principali dei fotogrammi utilizzati

I fotogrammi sono stati acquisiti in modalità digitale mediante scanner fotogrammetrico RASTERMASTER 3 (Wehrli & Associates) alla risoluzione di 1200 dpi. Le immagini sono state orientate mediante il software Steroview Suite. I punti di orientamento assoluto sono stati ricavati dalla cartografia 1:10.000. Sebbene non rigoroso, questo approccio permette di azzerare i costi per l'esecuzione dell'appoggio a terra e rende più rapido l'intero processo. L'approssimazione introdotta risulta compatibile con le finalità del lavoro ed è, comunque, eliminabile nel caso si rendessero necessarie analisi più approfondite.

Dopo aver identificato e perimetrato l'area di interesse, sono stati restituiti, mediante il modulo Navigatore 3D, i piani quotati dell'area su ciascuna delle due stereofotocarte realizzate (Figura 153a e Figura 154a), utilizzando una maglia non regolare ed infittendo i punti, secondo la sensibilità dell'operatore, in corrispondenza delle aree a maggior contrasto morfologico (seracchi) Figura 153b e Figura 154b). In tali zone sono state restituite alcune breaklines, necessarie per vincolare la generazione automatica del modello TIN (Triangular Irregular Network) in modo da renderlo più aderente all'effettiva geometria del ghiacciaio. A giudizio degli scriventi, rispetto l'utilizzo di maglie di campionamento regolari (Giada e Zanon, 1995) questo approccio permette una più fedele modellizzazione della superficie del ghiacciaio.

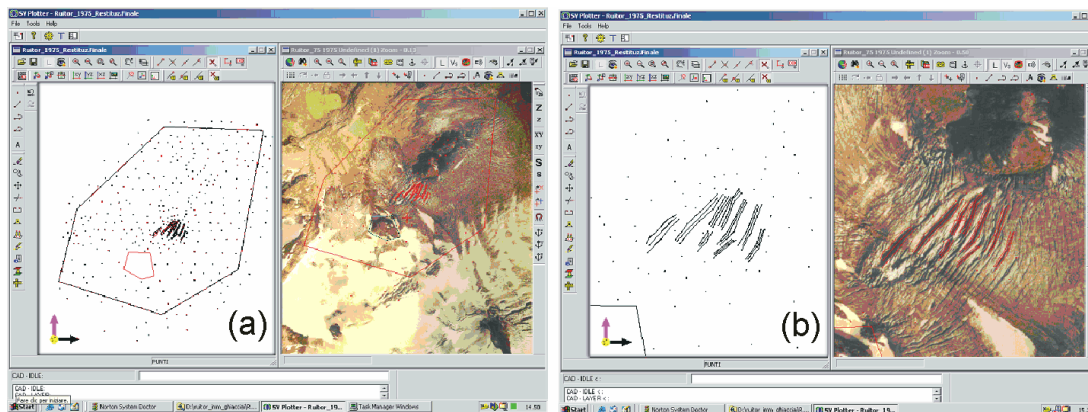


Figura 153 - Restituzione generale effettuata mediante la stereofotocarta del 1975 (a) e dettaglio delle breaklines tracciate nella zona dei seracchi (b)

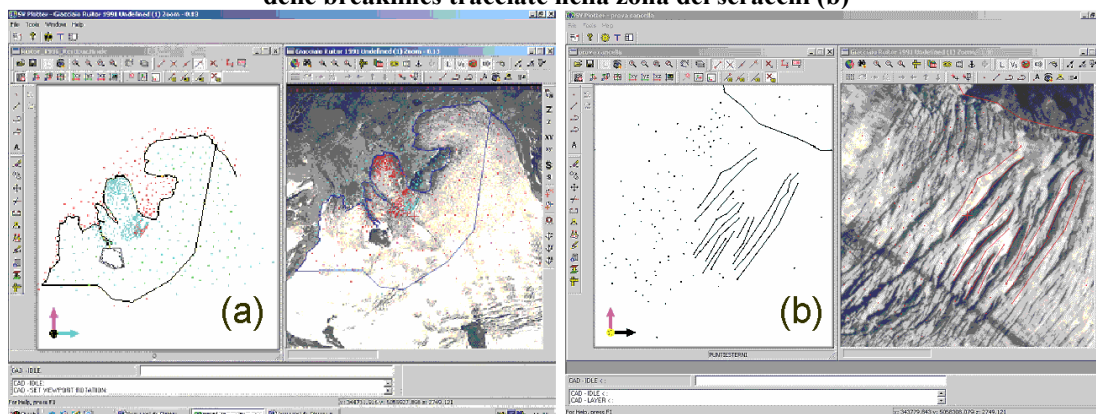


Figura 154 - Restituzione generale effettuata mediante la stereofotocarta del 1991 (a) e dettaglio delle breaklines tracciate nella zona dei seracchi (b)

Per limitare l'effetto di bordo nelle elaborazioni successive, sono stati collimati e restituiti numerosi punti anche all'esterno dell'area esaminata.

Al fine di determinare le superfici su ciascuna restituzione, è stata eseguita una triangolazione secondo la procedura di Delaunay mediante il software TOPKO (Figura 155). È stato quindi isolato il dominio dei punti significativi nell'area indagata intersecando con una polilinea chiusa di contorno (riparto) ciascuna superficie restituita. Utilizzando queste superfici tridimensionali, ritagliate secondo il riparto, è stato calcolato il volume del solido che esse delimitano rispetto al piano di quota 0 m s.l.m.. Confrontando questi volumi, si sono infine valutate le variazioni volumetriche della massa del ghiacciaio avvenute nel tempo nel periodo 1975-1991.

Intersecando i solidi derivati dalle restituzioni eseguite con i fotogrammi relativi alle due stereofotocarte, è possibile osservare in quali tratti dell'area indagata la superficie del ghiacciaio ha mutato quota assoluta evidenziano, in tal modo, le zone di prevalente accumulo, quelle di relativa stabilità e quelle di evidente ablazione (Figura 156).

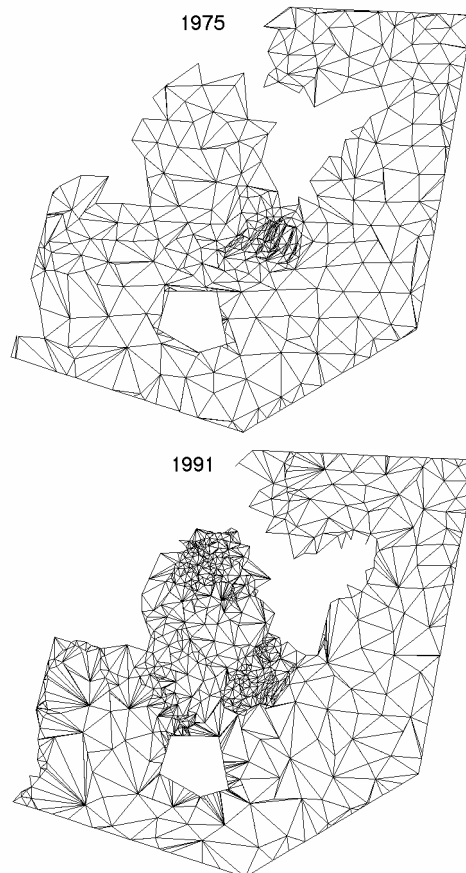


Figura 155 - Modelli TIN

In Figura 157 sono state visualizzate, mediante una rappresentazione a curve di livello, le differenze tra le quote assolute delle superfici rilevate nelle due epoche analizzate. Le tonalità chiare evidenziano le aree di maggiore ablazione, le scure quelle di maggior accumulo con variazioni medie dell'ordine dei 15 m.

Nell'intervallo di tempo considerato, è possibile analizzare gli spostamenti della fronte del ghiacciaio mediante la visualizzazione delle due stereofotocarte (1975 e 1991) in modalità link: in questo caso, gli spostamenti tridimensionali della marca di collimazione vengono eseguiti contemporaneamente in entrambe le finestre stereoscopiche permettendo un'immediata valutazione delle eventuali variazioni nel tempo. Queste sono misurabili mediante un apposito strumento compreso nel software. Dalle misure è risultato che, nonostante la massa del ghiacciaio complessivamente sia aumentata, si è verificato un arretramento medio della fronte di circa 25 m.

In Figura 158 e Figura 159 sono visibili le due finestre stereoscopiche connesse: in esse sono evidenziati le marche di collimazione, i bordi della massa glaciale e l'arretramento misurato in due settori in cui tale fenomeno è particolarmente evidente. Un aspetto interessante da rilevare, analizzando i dati ottenuti e le restituzioni grafiche derivate, è che, complessivamente, l'incremento di volume si è evidenziato quindi più in un accumulo di massa a tergo della fronte piuttosto che in una propagazione verso valle della stessa. Anzi, sulla base di quanto analizzato la fronte è vistosamente arretrata.

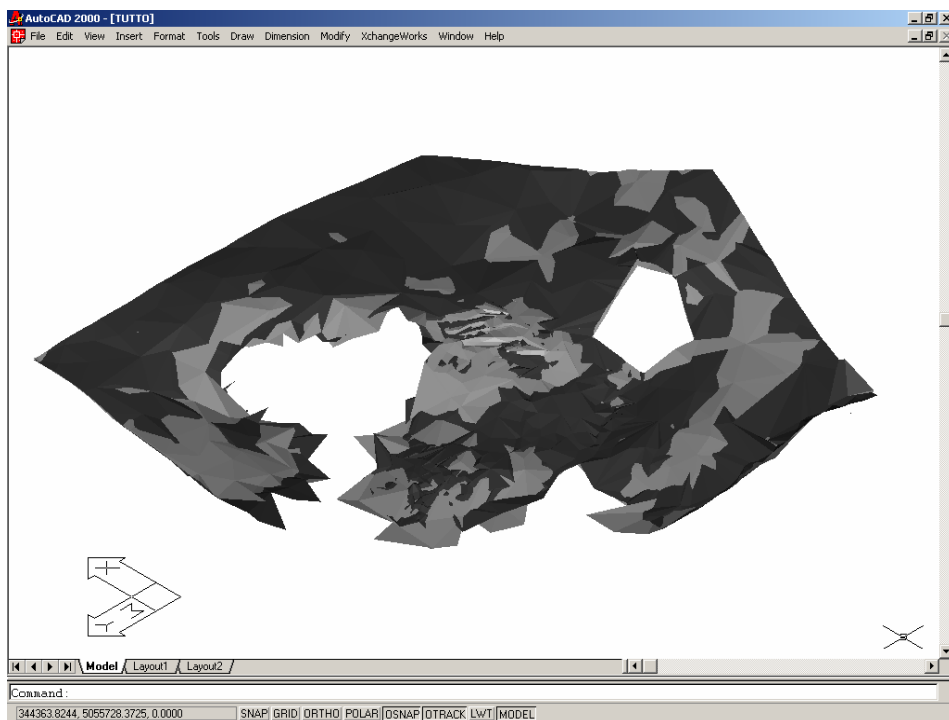


Figura 156 - Assonometria Nord-Ovest dell'intersezione dei modelli 1991 (scuro) e 1975 (chiaro). In bianco vi sono le zone di roccia affiorante

I vantaggi principali di questo tipo di approccio sono rappresentati dalla notevole riduzione del tempo impiegato per le operazioni di data entry, dalla precisione della localizzazione del dato acquisito e dalla relativa facilità di utilizzo anche per utenti non esperti. Inoltre è possibile quantificare, su tutta l'estensione del bacino e quindi anche in punti fisicamente inaccessibili, le oscillazioni topografiche verticali ed orizzontali delle masse in questione. Uno degli aspetti più complessi relativamente all'applicazione di questa tecnologia, soprattutto in ambito alpino, è rappresentata invece dalla difficoltà della realizzazione dei modelli stereoscopici di partenza, in relazione alla scarsità di punti di appoggio a terra, soprattutto in quei tratti dove gli affioramenti rocciosi sono limitati. Le prospettive dell'applicazione di questo metodo allo studio delle oscillazioni delle masse glaciali e, quindi, agli studi sull'evoluzione climatica recente sono evidenti, soprattutto in considerazione delle numerose coperture fotogrammetriche multitemporali esistenti sul nostro territorio.

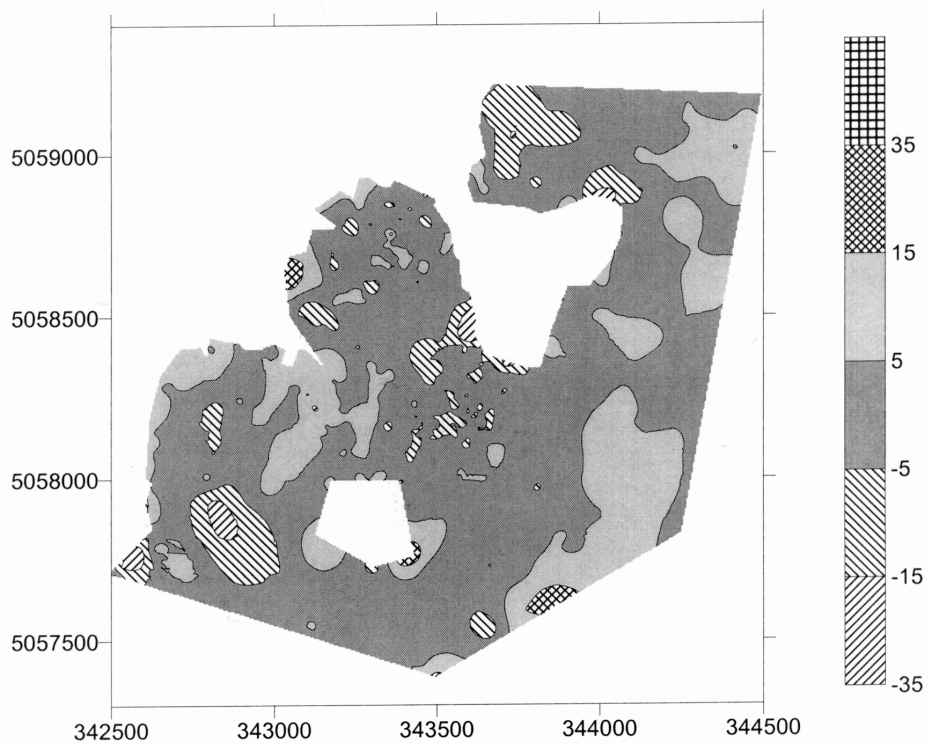


Figura 157 - Variazioni di quota della superficie del ghiacciaio tra il 1975 ed il 1991

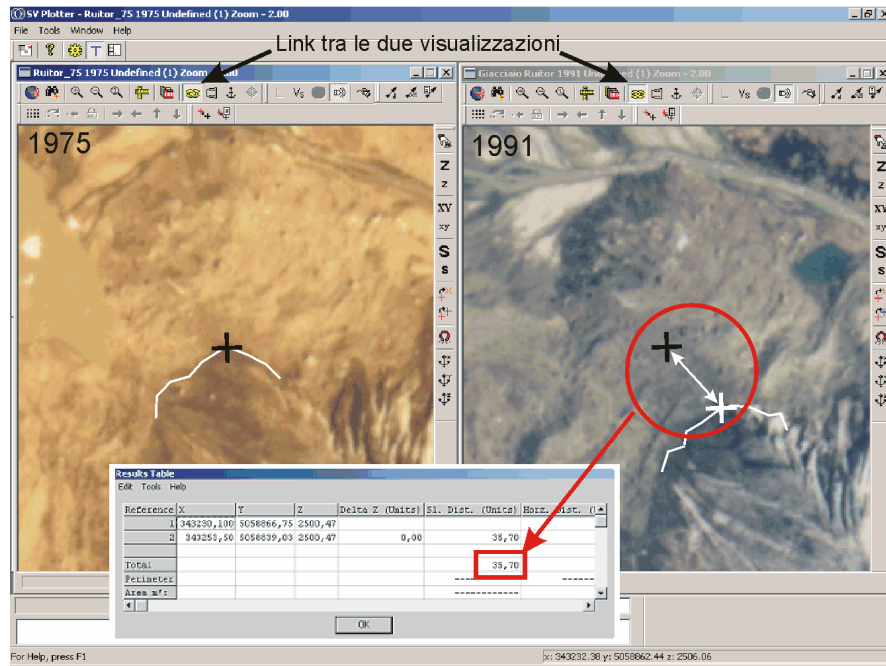


Figura 158 - Esempio di arretramento del fronte (circa 35 m)

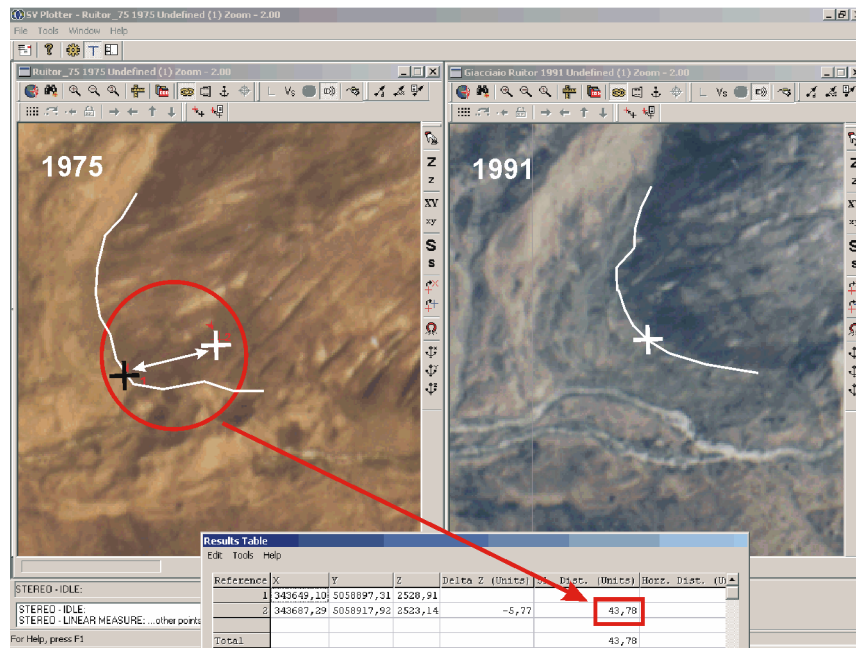


Figura 159 - Altro esempio di arretramento del fronte (circa 43 m)

4.10.2 Valutazione metrica di colate detritiche torrentizie

Utilizzando una metodologia simile a quella descritta nel paragrafo precedente, è possibile effettuare studi analoghi su colate detritico torrentizie (vedi Figura 160 e Figura 161).



Figura 160 - La conoide del Rio Gran Comba in Val Susa

Per la valutazione dei volumi mobilizzati nelle conoidi, i dati di partenza a disposizione erano rappresentati da alcuni fotogrammi a colori di un volo fotogrammetrico (scala media 1:15.000) effettuato nella primavera 1981 e da alcuni fotogrammi a colori del volo fotogrammetrico (scala media 1:12.000) appositamente effettuato nel novembre 2000 su commissione del Politecnico di Torino.

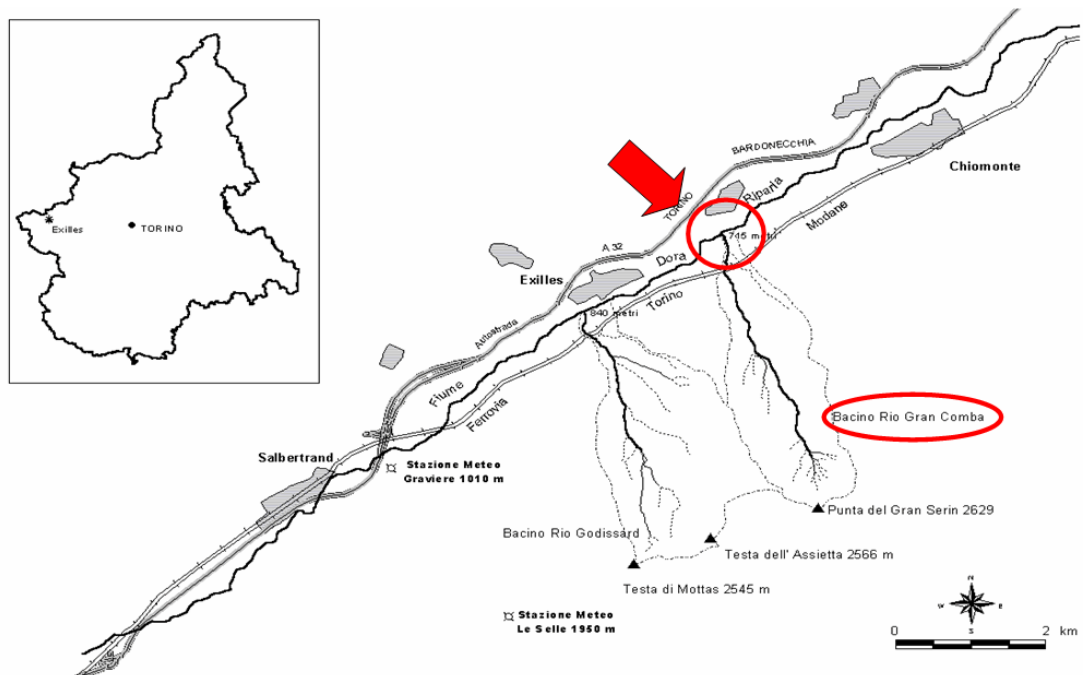


Figura 161 - Localizzazione dell'esempio considerato

I fotogrammi sono stati acquisiti in modalità digitale mediante scanner fotogrammetrico RASTERMASTER 3 (Wehrli & Associates) alla risoluzione di 1200 dpi. Le immagini sono state orientate mediante il software Steroview Suite. I punti di orientamento assoluto sono stati ricavati dalle cartografie 1:5.000 e 1:10.000 sopra citate. Sebbene non rigoroso, questo approccio permette di azzerare i costi per l'esecuzione dell'appoggio a terra e rende più rapido l'intero processo. L'approssimazione introdotta risulta compatibile con le finalità dei lavori ed è, comunque, eliminabile nel caso si rendessero necessarie analisi più approfondite. Dopo aver identificato e perimetrato l'area di interesse, sono stati restituiti, mediante il modulo 3D Navigator, i piani quotati dell'area su ciascuna delle coppie di stereofotocarte realizzate utilizzando una maglia non regolare ed infittendo i punti, secondo la sensibilità dell'operatore, in corrispondenza delle aree maggiormente colpite dal dissesto.

Al fine di determinare le superfici su ciascuna restituzione, è stato eseguita una triangolazione secondo la procedura di Delaunay mediante il software TOPKO. È stato quindi isolato il dominio dei punti significativi nell'area indagata intersecando con una polilinea chiusa di contorno (riparto) ciascuna superficie restituita. Utilizzando queste superfici tridimensionali (Figura 163), ritagliate secondo il riparto, è stato calcolato il volume del solido che esse delimitano rispetto al piano di quota 0 m s.l.m.. Confrontando questi volumi, si sono infine valutate le variazioni volumetriche indotte dai fenomeni di dissesto in conoide e quelle della massa del ghiacciaio avvenute negli intervalli di tempo considerati.

Intersecando i solidi derivati dalle restituzioni (Figura 164) eseguite con i fotogrammi relativi alle due coppie di stereofotocarte, è possibile osservare in quali tratti dell'area indagata la superficie topografica (rispettivamente del detrito o del ghiacciaio) ha mutato quota assoluta evidenziano, in tal modo, le zone di prevalente accumulo, quelle di relativa stabilità e quelle di evidente erosione ed ablazione. Le differenze tra le quote assolute delle superfici rilevate nelle varie epoche possono essere messe in evidenza attraverso semplici rappresentazioni a curve di livello.

Confrontando simultaneamente le stereofotocarte in modalità link è possibile poi eseguire numerose misure dirette in quanto gli spostamenti tridimensionali della marca di collimazio-

ne vengono eseguiti contemporaneamente in entrambe le finestre stereoscopiche permettendo un'immediata valutazione delle eventuali variazioni nel tempo.

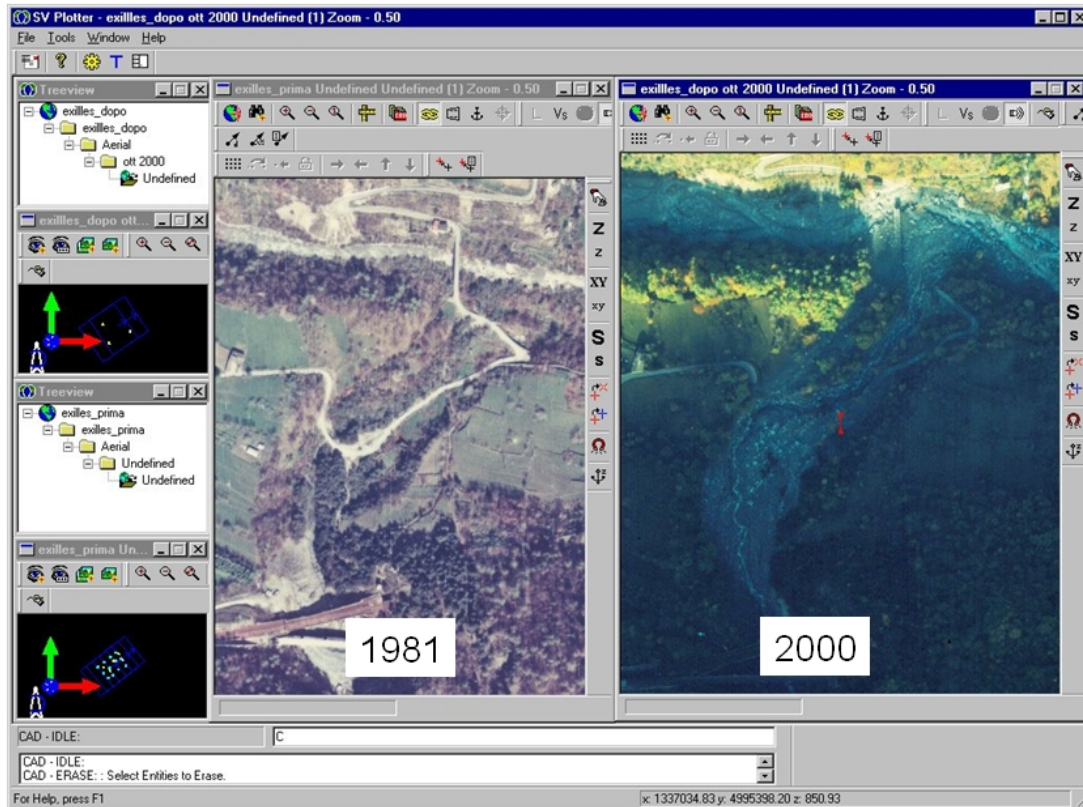


Figura 162 - Un esempio di colata detritico torrentizia

4.10.3 Ortofoto e DEM per la valutazione degli spostamenti

In anni recenti (Kaab, 2003, Kaufmann et al, 2004) hanno proposto un metodo denominato **ADV**M (Automatic Displacement Vector Measurement) che utilizza tecniche di fotogrammetria digitale per determinare le variazioni di una superficie del territorio nel tempo. Questo algoritmo è stato sviluppato per numerose applicazioni di monitoraggio permettendo di determinare i vettori spaziali di spostamento della superficie del terreno soggetti a fenomeni dinamici (superfici di ghiacciai, frane ecc.).

Esso si basa sulla definizione di “pseudo-ortofoto” (**POP** = Pseudo OrthoPhotos) intesa come un'ortofoto generata utilizzando (al posto di un corretto modello di superficie, ad es. un **DDEM**) un modello approssimato (**RDEM** = Rough Digital Elevation Model).

Tramite questo **RDEM** è possibile ortoproiettare tutti i fotogrammi che si sta considerando generando un nuovo insieme di immagini digitali **POPs**. Queste immagini contengono piccole distorsioni prospettive residue ΔR rispetto all'ortofoto di precisione a causa delle quote non corrette contenute nel **RDEM** (vedi Figura 165) e pertanto causate dalla differenza di quota tra **RDEM** e **DEM** corretto. Comunque, esse hanno sostanzialmente la stessa scala e lo stesso orientamento, proprietà molto importanti per facilitare l'autocorrelazione. Insieme al **RDEM**, le **POP** contengono ancora le stesse informazioni stereoscopiche dei fotogrammi originali, che permettono di ottenere una ricostruzione tridimensionale fotogrammetrica. Quindi, le pseudo ortofoto hanno un'insieme di proprietà utili rispetto alle immagini originali:

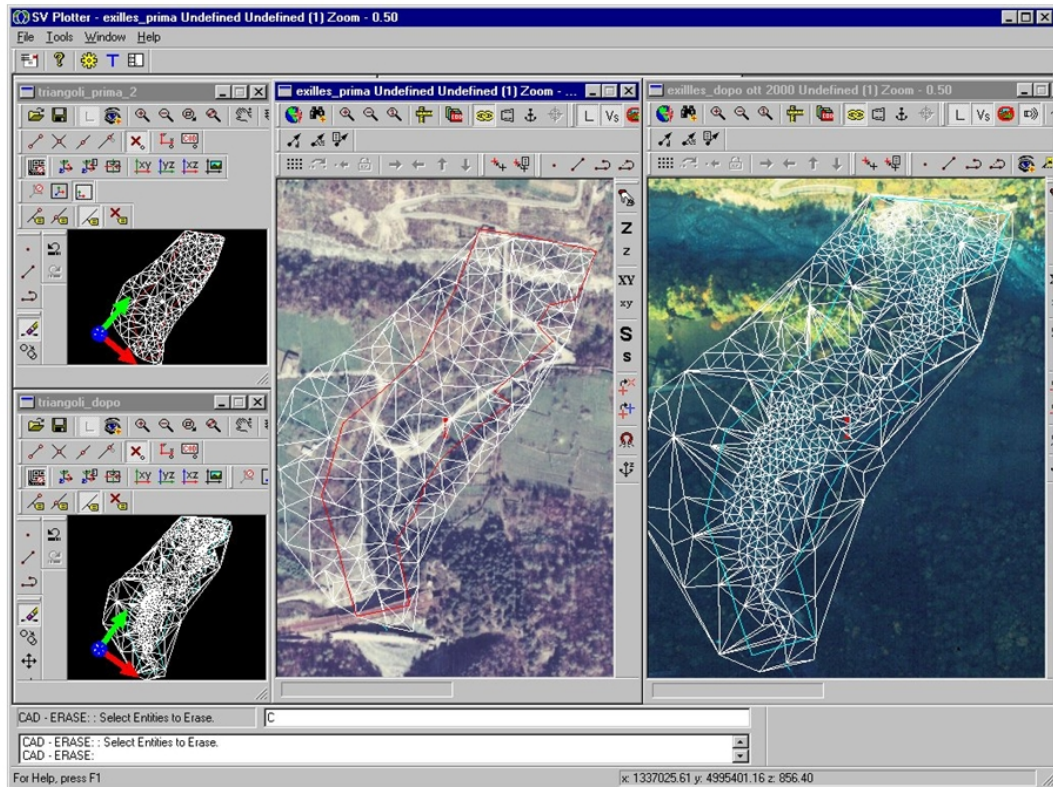


Figura 163 - Triangolazione di Delaunay applicata ai punti restituiti sul Rio Godissard prima (a sinistra) e dopo l'evento (a destra)

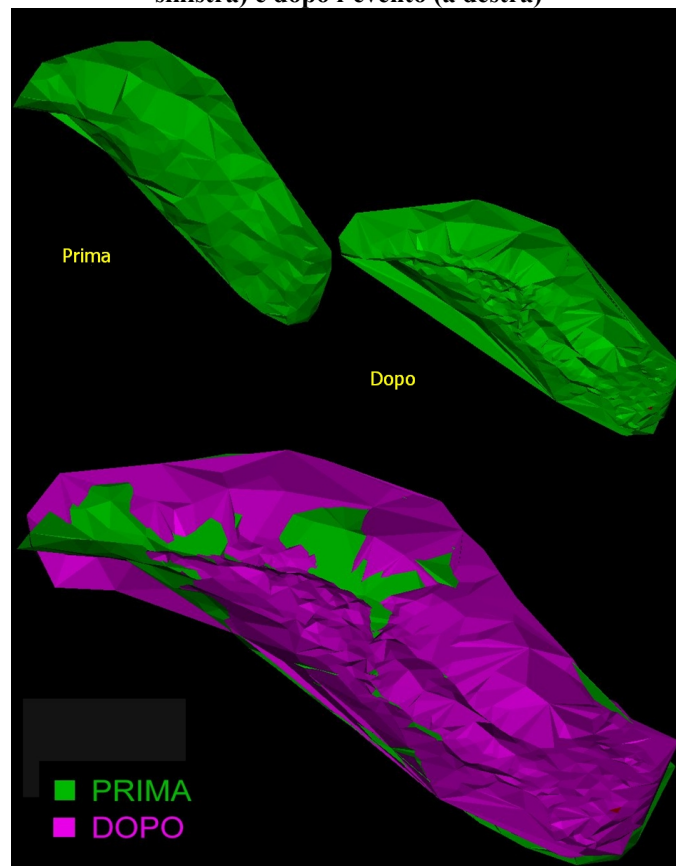


Figura 164 - Visualizzazione assonometrica digitale delle due superfici sul Rio Godissard (prima e dopo l'evento) e in sovrapposizione.

la gran parte delle deformazioni prospettiche sono rimosse;
 l'autocorrelazione applicata a queste immagini funziona meglio (più efficace e robusta);
 solamente l'area interessata dall'indagine deve essere memorizzata, anche in studi multi-
 temporali, con considerevole risparmio di memoria;
 è possibile ottenere una percezione tridimensionale del movimento in **POP** multitemporali
 permettendo una prima visualizzazione delle variazioni nel tempo delle superfici.

Utilizzando una coppia di **POP** è possibile ottenere una ricostruzione 3D di punti ogget-
 to, come indicato in Figura 165: ad es. per i punti omologhi P_1 e P_2 nelle due **POP**, la quota è
 interpolata a partire dal **RDEM** che restituisce i punti di intersezione con i raggi visivi corri-
 spondenti nei punti D_1 e D_2 , rispettivamente. I raggi proiettivi partenti dai centri di proiezio-
 ne C_1 e C_2 coincidono con i raggi usati durante il processo di ortoproiezione e generano per
 intersezione spaziale il punto oggetto Q .

Quindi, per es. individuato il punto significativi D_1 sulla **POP**₁, mediante autocorrelazione di
 determina la posizione del punto D_2 all'interno della **POP**₂ e, mediante intersezione tra i rag-
 gi D_1C_1 e D_2C_2 si determina l'effettiva posizione del punto Q .

E' importante notare che le discrepanze tra il **RDEM** e il **DEM** vero non introducono errori
 sistematici nella ricostruzione della posizione del punto Q , ma all'aumentare delle differenze
 diminuisce l'efficacia dell'autocorrelazione a causa delle distorsioni prospettiche residue via
 via maggiori.

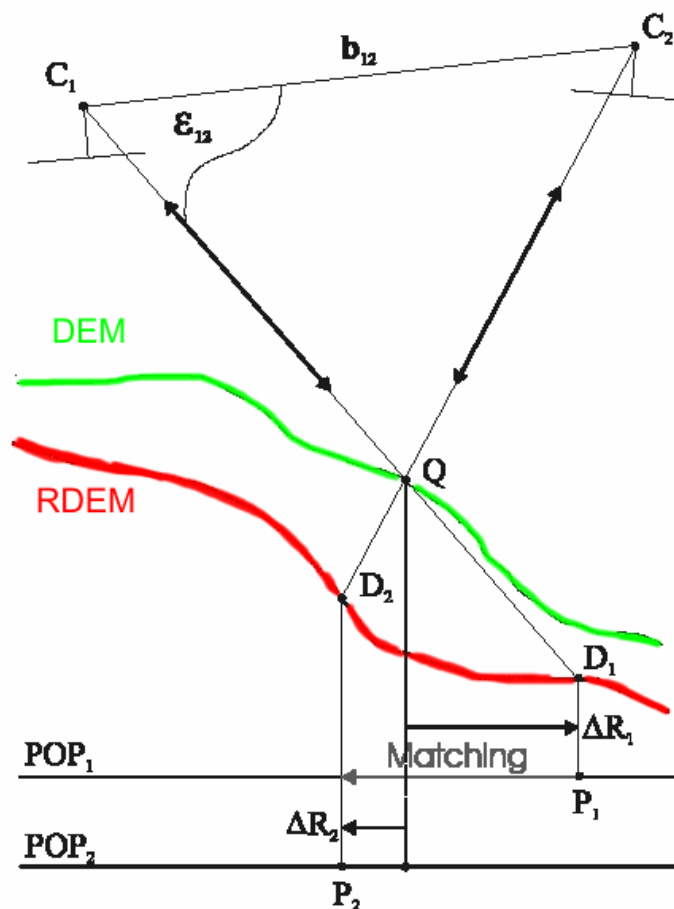


Figura 165 - Ricostruzione del punto oggetto mediante POPs



Nel monitoraggio di un fenomeno dinamico, devono essere disponibili coppie stereoscopiche di almeno due epoche differenti. Un punto significativo sulla superficie del terreno (grossa pietra, albero e quant'altro) può essere tracciato nella sequenza di immagini definendone i suoi spostamenti dovuti al fenomeno in evoluzione.

La metodologia più semplice per ricavare queste informazioni consiste nel acquisire un **DEM** in situazione iniziale (all'epoca **0**) che viene utilizzato come **RDEM** nelle epoche successive. Con questo **DEM₁** si genera una ortofoto (OP=OrthoPhoto) questa volta corretta **OP₁** a partire da un'immagine con centro di proiezione **C₁**.

Avendo acquisito alla nuova epoca una nuova immagine con centro di proiezione **C₂** è possibile generare una **POP₂** e determinare le variazioni rispetto all'epoca **0** mediante la procedura descritta in precedenza: in questo caso tutti gli spostamenti sono legati al ΔR_2 determinato mediante autocorrelazione tra la **OP₁** e la **POP₂**. Pertanto è possibile determinare gli spostamenti anche mediante una sola pseudo ortofoto.

L'approccio più complesso ma più rigoroso e generale invece si basa sulla modifica della soluzione dell'algoritmo di autocorrelazione. Supponiamo che il punto **Q** passi dalla posizione **Q₁** all'epoca **1** alla posizione **Q₂** all'epoca **2**. La determinazione delle coordinate di **Q₁** si può realizzare mediante autocorrelazione applicata alle **POP₁** e **POP₂** (epoca **1**) e in analogia si possono determinare le coordinate del punto **Q₂** mediante autocorrelazione applicata alle **POP₃** e **POP₄** (epoca **2**). Il vettore spostamento sarà determinato mediante:

$$s_{12} = Q_2 - Q_1$$

Mettendo insieme la soluzione di questi due sistemi di autocorrelazione in un unico sistema è possibile determinare in un'unica soluzione sia la posizione 3D di **Q₁**, **Q₂** e il vettore spostamento **s₁₂**. In particolare è altresì possibile inserire delle equazioni di condizione sul vettore **s₁₂** (ad es, la direzione principale per fenomeni dinamici aventi direzione nota a priori) in modo da controllare meglio la soluzione.



[pagina lasciata intenzionalmente vuota]



5 TECNICHE LIDAR

5.1 *Principio di funzionamento*

5.1.1 Il laser come radiazione luminosa

Le sorgenti di luce laser sono diventate, in questi ultimi anni di uso comune. Molti sono i campi di utilizzo di questo tipo di luce. I codici a barre che identificano il tipo di prodotto presente nei supermercati, ad esempio, sono letti per mezzo di un fascio di luce laser.

I laser sono inoltre utilizzati quando sono necessari intensi fasci luminosi di frequenza fissata e diretti verso punti precisi. Questo avviene per esempio in chirurgia, negli interventi di dermatologia e di oftalmologia o ancora nell'industria per processi in cui è necessario raggiungere una precisione elevatissima.

Anche i diffusissimi lettori di CD e DVD funzionano utilizzando un fascio di luce laser.

L'importanza della luce laser deriva da proprietà fisiche che la rendono unica. Per capire questa importanza è sufficiente confrontare la luce laser con la luce emessa da una comune lampadina. Un semplice confronto visivo in effetti mette immediatamente in evidenza due semplici differenze: la luce della lampadina è bianca ed illumina tutto l'ambiente che la circonda mentre la luce laser è di un solo colore e si propaga lungo una sola direzione.

La ragione di questa differenza è dovuta proprio alle caratteristiche fisiche dei due fasci luminosi.

La lampadina emette infatti un'insieme di onde aventi colori differenti o, in campo fisico, frequenze differenti. L'insieme di queste infinite radiazioni di colore differente si fondono naturalmente in un unico fascio luminoso che ai nostri occhi appare bianco.

La luce laser è formata invece da onde di un solo colore, ovvero aventi un'unica frequenza ben definita. Si tratta quindi di un fascio luminoso monocromatico.

La seconda differenza è la direzione di propagazione del raggio laser nello spazio.

La lampadina emette radiazioni in tutte le direzioni mentre se si osserva un fascio di luce laser si nota come la propagazione del raggio avviene lungo una stessa direzione.

Nella realtà queste non sono le uniche differenze esistenti tra un normale fascio di luce bianca ed un fascio di luce laser. Esiste una terza differenza che non è però visibile ad occhio nudo. Il laser infatti è una radiazione coerente nel tempo e nello spazio, vale a dire che le onde elettromagnetiche che la compongono sono in fase tra loro sia al variare del tempo che dello spazio, mentre la luce bianca è del tutto incoerente.

Per capire meglio queste differenze è necessario analizzare i fenomeni che generano un fascio di luce laser a livello atomico, trascurati in questa trattazione.

5.1.2 Il raggio laser

Dal punto di vista applicativo il laser è un'apparecchiatura che trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata: la luce laser.

La scoperta fondamentale che ha permesso l'emissione della luce laser è dovuta ad A.Einstein nel 1917. Quest'ultimo ipotizzò, infatti, che l'emissione di un raggio di luce ad alta energia da un atomo può essere stimolata da un raggio di luce di una certa frequenza incidente a lui stesso. Da questo fenomeno è derivato il laser.

Il termine "**L.A.S.E.R.**" è, infatti, acronimo di: "**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation" (amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione).

Dal punto di vista pratico e più semplicistico il laser non è altro che una radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda luminosa, avente particolari caratteristiche:

deve essere composta da una sola frequenza di luce, non come la luce di una torcia che pur sembrando bianca (o colorata a seconda della lampadina utilizzata) è composta da molte frequenze di luce appartenenti allo spettro visibile all'occhio umano (**monocromaticità**);

deve essere composta da un'onda che non viene irradiata in tutte le direzioni come quella delle sorgenti di tipo tradizionale, ma si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità (**coerenza spaziale** o unidirezionalità);

deve essere costituita da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano l'una all'altra originando un treno di luce che può essere spinto ad elevata intensità e ad elevata potenza (**coerenza temporale**). In particolare la "potenza" della luce laser può giungere a livelli veramente incredibili. Recentemente al Lawrence Livermore Laboratory (California) è stato messo a punto un apparecchio da centoventimila miliardi di Watt;

Naturalmente una radiazione luminosa può avere una lunghezza d'onda differente. Nel caso del laser la radiazione può essere ultravioletta (avere cioè una lunghezza d'onda compresa tra i 200 e 400 nm), visibile (tra i 400 e i 700 nm) o infrarossa (tra i 700 e i 3000 nm).

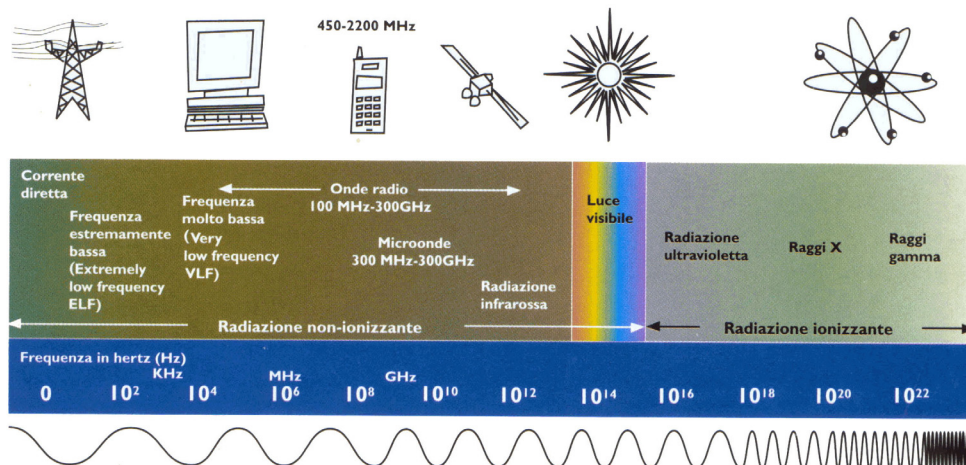


Figura 166 – Schematizzazione dello spettro elettromagnetico

5.1.3 I generatori di luce laser

Per giungere alla realizzazione pratica dello strumento in grado di generare una radiazione laser furono necessari alcuni decenni dal momento della scoperta fondamentale del fenomeno di Amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione (**LASER**).

Nel 1958 i fisici statunitensi Arthur Schawlow e Charles Hard Townes brevettarono il primo dispositivo laser, ma la paternità della scoperta venne reclamata dal loro connazionale Gor-



don Gould. Due anni dopo (1960) il fisico Theodore Maiman (ricercatore presso i laboratori Huyghens-California) osservò il primo fascio laser in un cristallo di rubino e nello stesso periodo il fisico statunitense di origine iraniana Ali Javan costruì il primo dispositivo a elio-neon.

I generatori di luce laser sono generalmente classificati a seconda della natura del materiale attivo utilizzato (sostanza che produce la radiazione laser), in laser a stato solido, a gas, a semiconduttore, a liquido e laser a elettroni liberi. Possiamo ad esempio distinguere laser a: CO₂, Nd-YAG, Argon, fotochemioterapici, rubino, coloranti pulsati, diodi, eccimeri ecc...

LASER A STATO SOLIDO. I materiali più comuni impiegati nei laser a stato solido sono barrette di cristallo di rubino o di vetro drogati con neodimio. Le estremità delle barrette sono costituite da due superfici parallele ricoperte con uno strato sottile di materiale non metallico, altamente riflettente. I laser a stato solido offrono la più alta potenza d'uscita e solitamente generano sequenze di impulsi luminosi molto intensi e di brevissima durata. Il pompaggio si ottiene mediante luce proveniente da tubi flash a xeno, lampade ad arco o lampade a vapori di metallo. La gamma di frequenze dei laser a stato solido oggi è stata estesa dal caratteristico infrarosso (IR) all'ultravioletto (UV), utilizzando cristalli di idrofosfato di potassio che funzionano da "moltiplicatori" della frequenza luminosa; se i fotoni vengono fatti interagire con un bersaglio di cristalli di ittrio posto all'interno della cavità risonante, la frequenza della luce laser in uscita può essere aumentata fino a quella caratteristica dei raggi X.

LASER A GAS. Il materiale usato in questi laser può essere costituito da un gas puro, una miscela di gas o da vapori metallici, e solitamente è contenuto in un tubo cilindrico di vetro o di quarzo. Due specchi sono posti alle estremità del tubo per formare la cavità risonante. I laser a gas vengono pompati mediante luce ultravioletta, fasci di elettroni, corrente elettrica o reazioni chimiche. Il laser a elio-neon è noto per l'alta stabilità di frequenza, la purezza del colore e l'alto grado di collimazione del fascio prodotto. I laser a diossido di carbonio sono i più efficienti e potenti laser a onda continua.

LASER A SEMICONDUTTORE. Di dimensioni particolarmente compatte, i laser a semiconduttore sono basati su una giunzione tra semiconduttori dotati di diversa conducibilità elettrica. La cavità risonante è confinata alla zona di giunzione per mezzo di due pareti riflettenti. Il semiconduttore più usato e più efficiente è l'arseniuro di gallio. Questi laser sono pompati mediante l'applicazione diretta di corrente elettrica alla giunzione, e possono operare in modalità a onda continua con un rendimento superiore al 50%. I laser a semiconduttore vengono comunemente impiegati nei lettori di compact disc (CD) e nelle stampanti laser. I più recenti sviluppi in questo settore sembrano promettere la realizzazione a breve di laser di dimensioni talmente piccole da poter essere inclusi in un chip di silicio. Costituiti da nanofili di solfuro di cadmio, i nanolaser potrebbero consentire un ulteriore sviluppo della microcomponentistica elettronica.

LASER A LIQUIDO. Nei laser a liquido il materiale attivo è costituito generalmente da un colorante inorganico, chiuso in un recipiente in vetro. Sono pompati con potenti lampade flash per operare nella modalità a impulsi oppure con un laser a gas ausiliario per operare nella modalità a onda continua. La frequenza caratteristica di questi laser può essere regolata utilizzando un prisma posto all'interno della cavità.

LASER A ELETTRONI LIBERI. Questi laser producono la luce utilizzando gli elettroni liberi di un plasma, i quali si muovono a spirale (e quindi emettono radiazione perché accelerati) seguendo le linee di un campo magnetico. Furono sviluppati nel 1977 e oggi sono largamente utilizzati nella ricerca. La loro frequenza è regolabile come per i laser a colorante, ma può coprire l'intera porzione dello spettro che va dai raggi infrarossi ai raggi X. Si ritiene che in poco tempo saranno in grado di generare radiazioni ad alta potenza a costi ragionevoli, mentre per ora la loro applicazione resta limitata proprio per motivi economici.

I laser trovano impiego in numerosissimi settori. Finora si sono dimostrati strumenti di grande utilità e importanza nell'industria, nella ricerca scientifica e nelle comunicazioni. Trovano inoltre importanti applicazioni in medicina, nella tecnologia militare e anche in campo artistico.

Tra i numerosi ed interessanti esempi di utilizzo del laser si possono ricordare: l'utilizzo del laser per il controllo degli spostamenti della crosta terrestre, per i rilevamenti geodetici e nel controllo di alcuni tipi di inquinamento dell'aria. Si sono utilizzati laser anche per misurare con esattezza la distanza della Luna dalla Terra e per eseguire esperimenti sulla relatività.

Nell'ambito degli strumenti di misura (distanziometri) presenti nelle stazioni totali o nei dispositivi a scansione laser per rilevamenti geodetici (per il rilevamento di oggetti e di porzioni di territorio) sono generalmente utilizzati i laser a semiconduttore.

5.1.4 Comportamento del laser a contatto con i materiali

Quando una radiazione qualsiasi radiazione luminosa, ivi compresa la luce laser, colpisce la superficie di un corpo reale (detto anche corpo grigio), essa è in parte assorbita in parte riflessa ed in parte trasmessa (Figura 167).

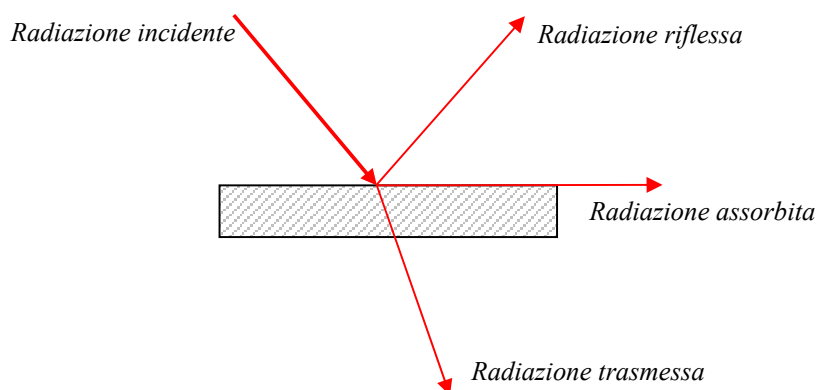


Figura 167 – Comportamento di una radiazione luminosa a contatto con un corpo grigio.

Si possono definire i seguenti coefficienti adimensionali (variabili tra 0 ed 1), che misurano le interazioni tra energia e materia:

Assorbività (α): è il rapporto tra l'energia assorbita da una superficie e quella incidente;

$$\alpha = \frac{E_A}{E_I} \quad (68)$$

Riflettività (ρ): è il rapporto tra l'energia riflessa da una superficie e quella incidente;

$$\rho = \frac{E_R}{E_I} \quad (69)$$

Trasmissività (τ): è il rapporto tra l'energia trasmessa da una superficie e quella incidente.

$$\tau = \frac{E_T}{E_I} \quad (70)$$

Da notare è che lo stesso materiale ha un comportamento differente rispetto a lunghezze d'onda differenti. I coefficienti indicati in realtà sono funzione della lunghezza d'onda, ovvero:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha(\lambda) \\ \rho &= \rho(\lambda) \\ \tau &= \tau(\lambda) \end{aligned} \quad (71)$$

Inoltre per il principio di conservazione dell'energia si ha che:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (72)$$

Questa dipendenza è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'oggetto.

Consideriamo ora solo la parte di energia riflessa (ρ) dalla superficie.

Come noto, se un fascio luminoso incide una superficie liscia di acciaio si forma un raggio riflesso ben definito, mentre se arriva su di un foglio di carta la luce viene riflessa più o meno in tutte le direzioni (riflessione diffusa).

La differenza tra riflessione diffusa e speculare trova la sua ragione nel concetto di ruvidità delle superfici. Il comportamento geometrico della componente riflessa del raggio incidente è governato dal cosiddetto criterio di Rayleigh, per cui una superficie è considerata rugosa se:

$$\Delta h \geq \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\Theta} \quad (73)$$

dove:

Δh è la dimensione verticale media delle asperità superficiali della superficie [m];

λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente [m];

Θ è l'angolo di incidenza dell'onda e.m. rispetto alla verticale [rad].

Da notare il fatto che il concetto di rugosità di una superficie è funzione della lunghezza d'onda incidente la superficie stessa.

In generale le superfici perfettamente lisce riflettono in modo speculare, quelle perfettamente rugose si comportano come riflettori lambertiani, ovvero la direzione di riflessione è indipendente da quella di incidenza. Normalmente le superfici reali non si comportano né da superficie perfettamente speculare né da superficie perfettamente lambertiana ma si comportano in modo intermedio (vedi Figura 168)

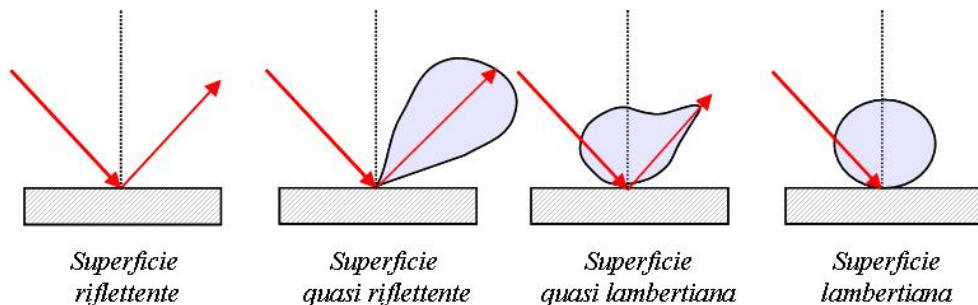


Figura 168 – Comportamento riflettivo delle superfici

Esiste poi una particolare superficie che non si comporta né da superficie speculare né da superficie lambertiana. Si tratta delle superfici così dette retro-riflettenti. Per queste particolari

superfici il raggio riflesso si propaga esattamente lungo la stessa direzione del raggi coincidente. Questa proprietà è valida inoltre per un elevato numero di direzioni di incidenza.

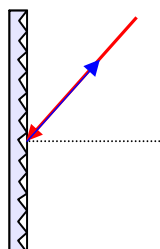


Figura 169 – Comportamento riflettivo delle superfici retro-riflettenti

In Tabella 31 sono riportati alcuni valori significativi di riflettività (ρ) per i più comuni materiali che possono presentarsi all'interno di una scansione laser terrestre.

Materiale	Riflettività (ρ)
Carta bianca	superiore al 100%
Legno asciutto	94%
Neve	80-90%
Calcere, argilla	superiore al 75%
Alberi a foglie	mediamente 60%
Alberi di conifere	mediamente 30%
Sabbia in genere	mediamente 50%
Calcestruzzo liscio	24%
Asfalto con ciottoli	17%
Lava	8%
Neoprene di colore nero	5%
Gomma nera	2%

Tabella 30 - Superfici / materiali a comportamento quasi lambertiano

Materiale	Riflettività (ρ)
Foglio riflettente tipo 3M2000X	1250%
Plastica opaca bianca	110%
Plastica opaca nera	17%
Plastica	mediamente 50%

Tabella 31 - Superfici / materiali a comportamento quasi riflettente o superfici retro-riflettenti

5.1.5 Il problema della divergenza del raggio laser

Come discusso nelle pagine precedenti la luce laser ha la proprietà di essere monocromatica, coerente e direzionale, o, più semplicemente, è possibile definire il laser come una radiazione luminosa concentrata monocromatica formata da onde parallele in fase tra loro.

Nella realtà dei fatti però la condizione di direzionalità è difficilmente raggiungibile. I fasci che compongono un'emissione laser infatti sono "praticamente" paralleli, ovvero sono affetti da una leggera divergenza che, entro distanze ridotte, è assolutamente irrisoria e quindi in praticamente inesistente.



Il fenomeno della divergenza del raggio laser è legato alle dimensioni limitate della cavità nella quale si produce il raggio laser così come al fenomeno di diffrazione imposto dalla finestra d'uscita del fascio.

In assenza del fenomeno di divergenza, un raggio laser incidente una qualsiasi superficie, avrebbe un'area di impatto puntiforme. La divergenza del raggio fa in modo tale che la zona reale di impatto sia invece un'area (in genere abbastanza piccola).

Nel rilevamento laser scanner la determinazione della posizione dei punti acquisiti è come noto effettuata utilizzando un raggio laser. Se il punto colpito dal raggio non è puntiforme ma areale la misura di posizione effettuata è funzione dell'area di impatto. Questo fenomeno si traduce in un lieve disturbo nella determinazione della posizione del punto acquisito ed è funzione della grandezza dell'area di impatto del laser e della geometria della superficie colpita.

In generale è possibile affermare che meno elevato è il valore di divergenza del raggio più risulta precisa la misura della posizione del punto considerato.

5.2 La misura delle distanze

Come discusso in precedenza quando una radiazione qualsiasi radiazione luminosa, ivi compresa la luce laser, colpisce la superficie di un corpo reale (detto anche corpo grigio), essa è in parte assorbita in parte riflessa ed in parte trasmessa.

La parte di energia più utile ai fini del rilevamento è la parte riflessa, ed in particolare la parte riflessa nella stessa direzione di incidenza. E' infatti grazie a questa porzione di energia riflessa che è possibile misurare la distanza tra il punto di emissione del raggio ed il punto acquisito.

Questo è vero dal punto di vista teorico ma si complica in realtà a causa del fenomeno di divergenza del raggio laser.

La divergenza del raggio laser produce un'area di impatto non puntiforme ma areale. Ogni punto dell'area colpita dista però una quantità differente dal punto di emissione. Questo è tanto più vero quanto l'area di impatto si allontana da una superficie sferica con centro nel centro del punto di emissione. Una superficie di questo tipo sarebbe caratterizzata dalla seguente proprietà: ogni punto della superficie è equidistante dal punto di emissione. Solo in questo specifico caso allora, ogni parte del raggio laser riflesso incidente la superficie, tornerebbe al punto di emissione avendo percorso la stessa distanza.

Nella realtà dei fatti però quasi nessuna superficie acquisita si avvicina alla situazione descritta. Consideriamo per semplicità una superficie di impatto del raggio laser avente una leggera asperità.

In questo caso una piccola parte del raggio laser (quella che incide l'asperità della superficie) viene riflesso prima che la restante parte colpisca l'area rimanente.

Alcuni istanti più tardi anche la restante parte del raggio laser viene riflessa.

E' facile capire come il percorso effettuato dalle due porzioni di raggio sia in effetti differente e generi due treni d'onde riflessi. In genere questi treni d'onda sono chiamati impulsi di ritorno.

Nel caso specifico abbiamo analizzato un caso in cui si generano 2 impulsi ma esistono casi in cui i treni d'onda riflessa sono più di due (ad esempio se la luce laser è indirizzata verso una zona vegetata).



Non tutti i gli strumenti laser di valutazione della distanza percorsa (distanziometri) sono in grado di distinguere i differenti impulsi e quindi di valutare le diverse distanze percorse dal raggio (o meglio da porzioni di esso).

Alcuni strumenti misurano un impulso medio, altri permettono di scegliere se misurare la distanza provocata dal primo o dall'ultimo impulso, altri ancora misurano da 2 a 4 impulsi di ritorno. Solo l'ultima generazione di laser da poco introdotti sul mercato è in grado di leggere la forma completa dell'onda di ritorno (quindi tutti gli impulsi e tutte le distanze di riflessione del raggio).

Scendiamo ora nel dettaglio per capire come viene praticamente effettuata la misurazione di una distanza attraverso l'utilizzo di una radiazione elettromagnetica. Gli strumenti di misura delle distanze sono chiamati distanziometri laser.

I metodi di misura della distanza sono diversi. In particolare si possono distinguere: metodi classici (permettono di misurare un solo impulso di ritorno) metodi di lettura di tutta o parte della forma d'onda di ritorno.

5.2.1 I distanziometri classici, la misura della distanza mediante onde e.m.

Si tratta dei distanziometri oggi più diffusi sul mercato (circa il 99% dei distanziometri presenti su strumenti di misura).

I distanziometri classici oggi presenti sul mercato possono essere classificati in due grandi categorie:

- strumenti che prevedono la misura di tempi trascorsi tra due impulsi (emesso e riflesso) o tra due treni d'onda (**distanziometri ad impulsi**);
- strumenti che prevedono la misura dello sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta (**distanziometri a misura di fase**).

A seconda dello strumento utilizzato si ottengono precisioni e distanze massime misurabili (portata) differenti.

Gli strumenti laser scanner oggi sul mercato utilizzano in genere distanziometri laser che misurano il tempo di volo del segnale, ovvero distanziometri ad impulsi.

Solo i laser scanner a tempo di volo del segnale più recenti permettono di scegliere se misurare il primo o l'ultimo impulso riflesso.

La precisione ottenibile con uno strumento a tempo di volo che utilizza un laser di classe 1 (quindi non dannoso per la vista umana) è al massimo di 4 ÷ 6 mm a circa 100 m, valore che decresce in modo non significativo all'aumentare della distanza.

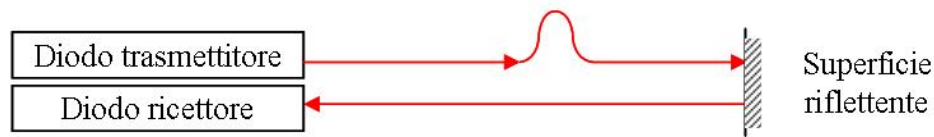
La distanza massima misurabile oggi è di circa 800 ÷ 1000 m nel caso dei distanziometri ad impulsi che non necessitano di prisma riflettente. Questa distanza cresce notevolmente se si utilizzano laser a potenza maggiore (ovvero con classe maggiore).

5.2.1.1 Distanziometri ad impulsi

Il principio su cui si basa questo metodo di misura della distanza è concettualmente semplice. Si tratta di misurare il tempo Δt impiegato da un impulso luminoso per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa.

Nota la velocità di propagazione dell'impulso è possibile calcolare la distanza percorsa:

$$2D = v \cdot \Delta t \quad (74)$$


Figura 170 – Misura di distanza ad impulso

Le prime applicazioni di questo metodo sono state realizzate in ambito militare e nei sistemi di misura satellitari S.L.R. (Satellite Laser Ranging). In questo caso particolare l'impulso emesso, di tipo laser, possedeva tuttavia potenze tali da non essere applicabili in campo civile costituendo un pericolo per la vista.

La potenza emessa è oggi facilmente variabile e può quindi essere resa compatibile con le esigenze degli impieghi civili. Di maggiore rilievo è invece il problema della precisione richiesta per le applicazioni di tipo geodetico e topografico.

Affinché la distanza D abbia una precisione di 10^{-5} occorre che sia le grandezze v (velocità) che Δt (intervallo di tempo misurato) siano determinabili con la medesima precisione.

Nell'ipotesi approssimativa che:

$$v = c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

costante nota con estrema precisione, si ha che Δt deve avere una precisione di 10^{-5} , cioè la sensibilità deve essere:

$$\frac{\delta \Delta t}{\Delta t} = 10^{-5} \Rightarrow \delta \Delta t = 10^{-5} \Delta t$$

Ad esempio per una distanza $D = 3 \text{ m}$ si ha che il segnale torna dopo:

$$\Delta t = \frac{2D}{v} = \frac{6}{3 \cdot 10^8} = 20 \text{ ns}$$

e la sensibilità di misura del tempo dovrebbe essere:

$$\delta \Delta t = 10^{-5} \cdot 20 \text{ ns} = 0.2 \text{ ps}$$

cioè di circa $2 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ ottenibile solo con orologi atomici.

Nei distanziometri esiste un oscillatore molto stabile di precisione $p = 3 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ a frequenza $f = 14.985 \text{ MHz}$ corrispondente a una lunghezza d'onda pari a $\lambda = 20 \text{ m}$.

Il diodo viene attraversato per un tempo ristrettissimo, 12 ns , da una forte corrente di $20 \div 30 \text{ A}$ ed emette un fascio di luce laser. La corrente è costante e stabilizzata in questo brevissimo intervallo.

Dopo un intervallo di tempo Δt arriva al ricevitore il segnale di ritorno. Questo intervallo di tempo permette il calcolo di un valore approssimato della distanza con s.q.m pari a:

$$\sigma_D = p \cdot c = \pm 3 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = \pm 9 \text{ m}$$

Per distanze superiori l'orologio di riferimento determina in modo esatto solo il numero di lunghezze d'onda contenute nell'intervallo di tempo Δt tra il segnale emesso e quello ricevuto.

Chiamando con T il periodo della frequenza fondamentale f (il periodo T sarà pari a $1/f$), l'intervallo Δt tra lo Start (partenza del segnale) e lo Stop (arrivo del segnale) sarà:

$$\Delta t = nT + t_a - t_b$$

Per distanze minori di 10 m il valore è uguale a zero.

Il valore di n è noto in quanto la distanza approssimata è nota con precisione migliore del decametro.

Una precisione dell'ordine del decametro non è però sufficiente nel campo del rilevamento di una distanza in topografia o nelle applicazioni affini.

E' necessario quindi procedere ad un affinamento della misura del tempo entro un periodo di oscillazione (T). Il tempo impiegato dall'impulso è pari al numero di periodi interi trascorsi (nT) e dai tempi residui compresi tra lo Start (t_a) e lo stop (t_b) e la prima oscillazione di riferimento immediatamente successiva.

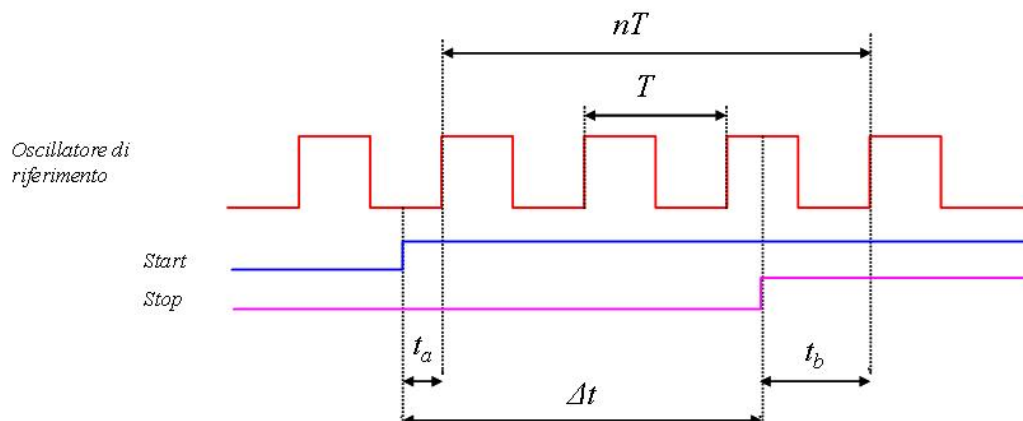


Figura 171 – Misura del tempo trascorso

Ciò è dovuto al fatto che l'oscillatore di riferimento viene attivato all'accensione dello strumento e non al comando di start dell'impulso, con il quale, quindi, non risulta in genere sincronizzato.

Per misurare con precisione t_a e t_b si usa un convertitore tempo tensione: esso è costituito da un condensatore che viene caricato, per i tempi in oggetto, da una corrente costante. Essendo nota la tensione raggiunta per un tempo di carica corrispondente ad un periodo di oscillazione (T), è facile, con una semplice proporzione, ricavare i tempi residui richiesti in funzione della tensione in essi raggiunte dal condensatore.

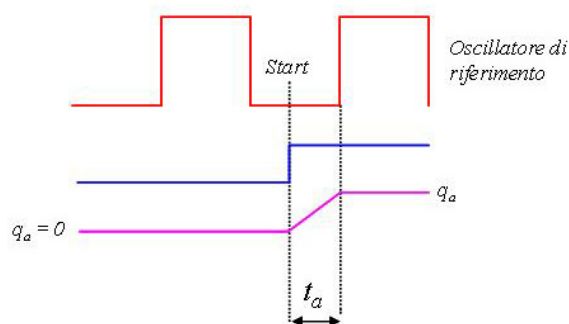


Figura 172 – Misura del tempo t_a



Indicando con q la tensione raggiunta dal condensatore nel tempo t e con Q la tensione raggiunta nel periodo T si avrà:

$$\frac{t}{q} = \frac{T}{Q}$$

Con t si indicano successivamente t_a e poi t_b .

Dopo ogni misura di tensione ed entro un intervallo che al massimo deve durare un ciclo, il condensatore viene scaricato.

Questo condensatore viene cioè aperto dal segnale di start e chiuso dalla prima rampa del segnale dell'oscillatore.

Per la misura di t_b , essendo il segnale ricevuto molto debole, si preferisce fare la misura dopo aver modulato questo segnale con la frequenza data dallo stesso circuito di oscillazione. Un "circuito rivelatore di zero" misura t_b come primo zero della sinusoide smorzata che si ottiene come risultato di detta operazione.

Per poter effettuare misure di tempo così precise, non si può prescindere dai ritardi di fase dell'orologio interno dovuti ai ritardi parassiti dell'elettronica dei circuiti interni o di altri sistematismi qui non più trascurabili.

Per questo motivo, oltre alla "esterna" del tempo, cioè del segnale di ritorno, avviene anche una misura interna di calibrazione, catturando prima dell'uscita, una parte del segnale emesso e misurandone il tempo di percorrenza nei circuiti, cioè a distanza nulla. Questi tempi assumono valori rilevanti in relazione ai tempi normalmente in gioco (ad es. si possono avere ritardi di 100 μ s cui corrisponderebbe una distanza misurata di circa 15 km).

Poiché entrambi i segnali percorrono lo stesso circuito interno, sottraendo al tempo misurato quello di calibrazione, è possibile ricavare il tempo del solo percorso esterno.

5.2.1.2 Distanziometri a misura di fase

Il funzionamento si basa sull'emissione di una radiazione ottica con lunghezza d'onda corrispondente all'infrarosso vicino ($\lambda = 0,78$ mm) che viene modulata e trasmessa verso un prisma retro riflettore; quest'ultimo riflette una parte dell'onda verso l'apparecchio ricevente che interpreta la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta. Questo sfasamento dipende dalla distanza esistente tra il distanziometro e il prisma. I distanziometri a misura di fase sono dunque composti da due parti, una trasmittente ed una ricevente.

L'esigenza di mantenere concentrata l'energia dell'onda emessa, e quindi di poterne riceverne di ritorno una buona parte, fa sì che si debbano utilizzare onde con lunghezza d'onda molto piccola (infrarosso vicino). Invece per poter discriminare la fase con precisione è necessario utilizzare una lunghezza d'onda metrica e quindi bisognerà modulare opportunamente l'onda elettromagnetica.

Prendiamo ad esempio il caso di un'onda con una lunghezza d'onda (λ) qualsiasi e supponiamo di voler misurare, utilizzando questa onda, una distanza che sia inferiore alla metà di λ . L'onda dopo aver percorso la distanza D si riflette sull'estremo opposto e ritorna al punto di partenza (vedi Figura 173).

Lo sfasamento misurabile tra l'onda trasmessa e l'onda ricevuta sarà funzione della distanza D .

Chiamiamo A il punto di emissione e B il punto di riflessione dell'onda. La distanza tra A e B è la distanza che si desidera misurare (D). Si indica con A' il punto simmetrico di A rispetto a B (che dista quindi da A $2D$).

Il punto A', nel caso non ci fosse riflessione in B, sarebbe raggiunto dall'onda nell'istante generico t.

Per il generico istante t è possibile scrivere il valore dell'ampiezza dell'onda:

$$S_e = A \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_0)$$

dove:

S = ampiezza dell'onda

A = ampiezza massima

ω = pulsazione = $2\pi f$

f = frequenza

φ_0 = fase iniziale

λ = lunghezza d'onda = c/f

c = velocità di propagazione

Per l'onda riflessa, tenuto conto che un determinato valore dell'oscillazione si propaga con velocità c e che quindi l'onda rientrante riproduce i valori dell'onda uscente con un ritardo di $\Delta t = 2D/c$ avremo:

$$S_r = A \cdot \text{sen}(\omega(t - \Delta t) + \varphi_0) \quad S_r = A \cdot \text{sen}(\omega t - \omega \Delta t + \varphi_0) \quad S_r = A \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi + \varphi_0)$$

dove con $\varphi = \omega \Delta t$ si indica lo sfasamento tra l'onda uscente e l'onda rientrante.

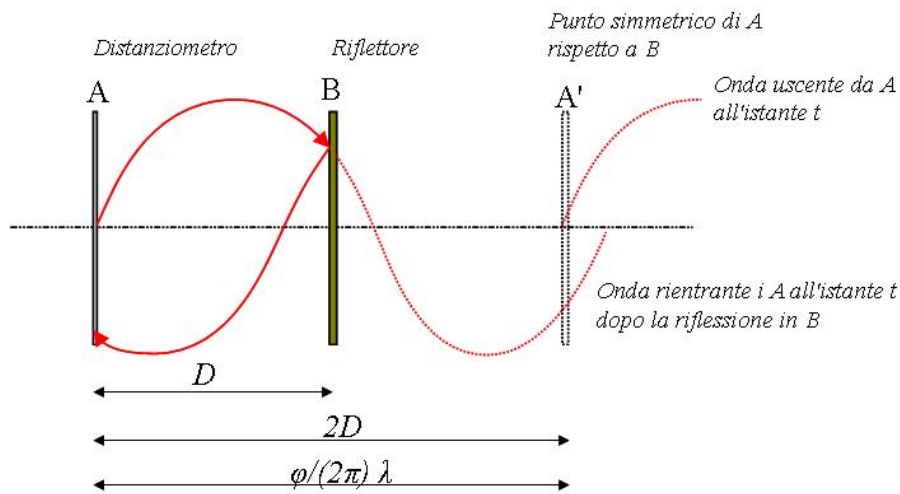


Figura 173 – Principio della misura della distanza per differenza di fase (Caso con $D < \lambda/2$).

Dalla relazione che indica lo sfasamento si avrà:

$$\varphi = \omega \Delta t = \omega \frac{2D}{c} \quad 2D = \frac{c \cdot \varphi}{\omega} = \frac{c \cdot \varphi}{2\pi f} = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda \quad D = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

da cui si può dedurre che misurando lo sfasamento $\Delta\varphi$ tra l'onda uscente e l'onda rientrante si può ottenere la distanza D come una frazione di metà della lunghezza d'onda impiegata (il rapporto $\varphi/2\pi$ varia tra 0 e 1).

Lo strumento che misura lo sfasamento fra due onde si chiama discriminatore o comparatore di fase.

Consideriamo ora il caso in cui il punto di riflessione B sia distante da A di un numero intero di mezze lunghezze d'onda (A' si sposta di un numero intero di lunghezze d'onda). E' evidente che lo sfasamento non cambia perché lungo il percorso 2D si viene ad inserire un nu-

mero intero di lunghezze d'onda e si potrà quindi scrivere l'equazione fondamentale dei distanziometri ad onde:

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} + n \frac{\lambda}{2} \rightarrow D = L + n \frac{\lambda}{2} \quad (75)$$

Il numero intero n si chiama ambiguità. Per misurare una distanza con un distanziometro ad onde occorre quindi misurare lo sfasamento φ e valutare, senza errore, il numero intero di mezze lunghezze d'onda. E' bene puntualizzare che con qualunque distanziometro ad onde la misura dello sfasamento $\Delta\varphi$ permette sempre e solo di valutare quella porzione di distanza che eccede il numero intero di mezze lunghezze d'onda in essa contenuto e che il numero n si può valutare con modalità diverse.

I problemi di misura consistono quindi nel ricavare lo sfasamento φ e l'ambiguità n .

5.2.1.3 Misura della distanza multipla o dello spettro del segnale di ritorno

Finora è stato affrontato l'aspetto teorico secondo il quale sono misurate le distanze per mezzo di un impulso luminoso.

Nella realtà dei fatti però la misura della distanza non è così semplice ed immediata a causa del problema della divergenza del raggio laser. Prendiamo in considerazione un distanziometro laser posizionato su un aereo ad un determinato istante t . Il telemetro emette un impulso luminoso che si propaga nello spazio e si dirige verso il territorio. Naturalmente, a causa della divergenza del raggio, questi man mano che si propaga nell'ambiente aumenta il suo diametro, finora ritenuto nullo dal punto di vista teorico (vedi Figura 174).

Al momento dell'impatto con la superficie l'impulso laser sarà allora caratterizzato da un'area di impatto e non da un singolo punto.

Quando l'area di impatto dell'impulso laser incontra un ostacolo, come foglie, fili sospesi, cornicioni, questa viene riflessa in tempi differenti.

I segnali di ritorno sono quindi più di uno, da cui nasce la possibilità o l'esigenza di misurare uno specifico o una serie.

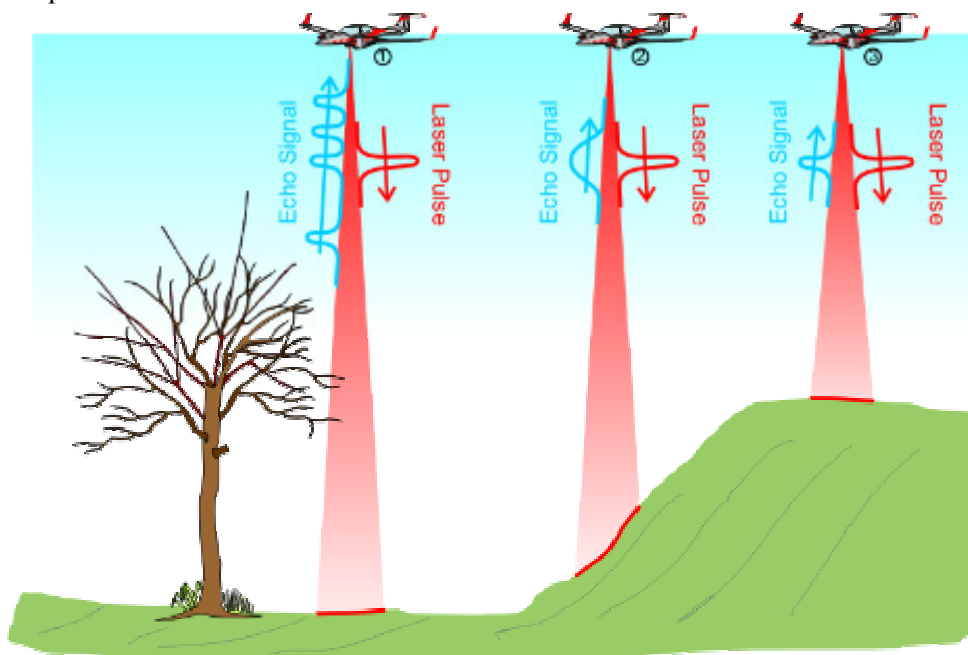


Figura 174 – Esempio di segnale riflesso in presenza di divergenza del raggio laser.

5.2.1.3.1 Primo od ultimo impulso

La maggior parte dei distanziometri laser permettono di effettuare la sola misura del primo impulso riflesso (che nel caso ambientale potrebbe corrispondere con buona probabilità alla parte più alta degli ostacoli presenti sul territorio, quindi le foglie degli alberi), in altri casi è misurata il solo ultimo impulso riflesso (che con buona probabilità corrisponde al riflesso generato dal terreno alla base degli eventuali alberi presenti) come schematizzato in Figura 175.

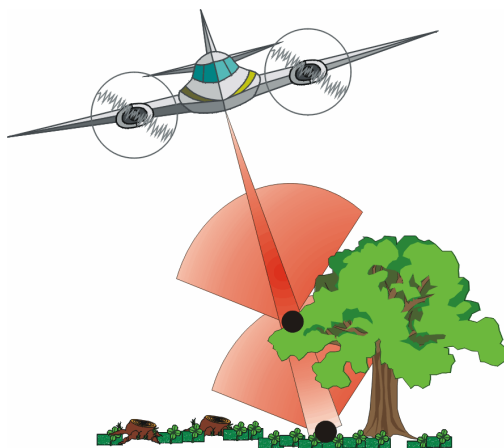


Figura 175 – Esempio di causa di generazione del primo e dell'ultimo impulso.

5.2.1.3.2 I, II, III e ultimo impulso

In alcuni casi è possibile misurare più di un impulso.

Di solito sono misurati 4 impulsi laser riflessi ed in particolare il primo, il secondo, il terzo e l'ultimo impulso. Affinché questi possano essere distinti gli uni dagli altri, è necessario che la discontinuità che descrivono sia maggiore di un certo valore che è dell'ordine di 1 m e comunque è legato alla forma d'onda del laser.

Se la discontinuità è inferiore al valore minimo richiesto dal telemetro non è discriminabile ed il valore di distanza ottenuto è sostanzialmente una media delle distanze reali dei segnali di ritorno.

5.2.1.3.3 Lettura di tutta la forma d'onda

E' di nuova concezione e da poco in commercio un sensore distanziometrico in grado di misurare la forma d'onda completa del segnale luminoso riflesso.

Vediamo di seguito il principio di funzionamento. Nella Figura 176 la prima linea del diagramma identifica il segnale analogico: La parte rossa indica il segnale emesso, mentre la parte blu identifica il segnale riflesso (caso in cui è colpito un ostacolo).

Per la determinazione degli impulsi di ritorno, e quindi per il calcolo delle distanze tra sorgente ed oggetti presenti sul territorio, il segnale analogico è campionato ad intervalli di tempo regolari molto piccoli (linea centrale del diagramma) e convertito in segnale digitale.

Dopodiché il segnale digitale è pronto per essere post-processato. Dal segnale digitale sono calcolate tutte le distanze in corrispondenza dei massimi nella funzione del segnale di ritorno.

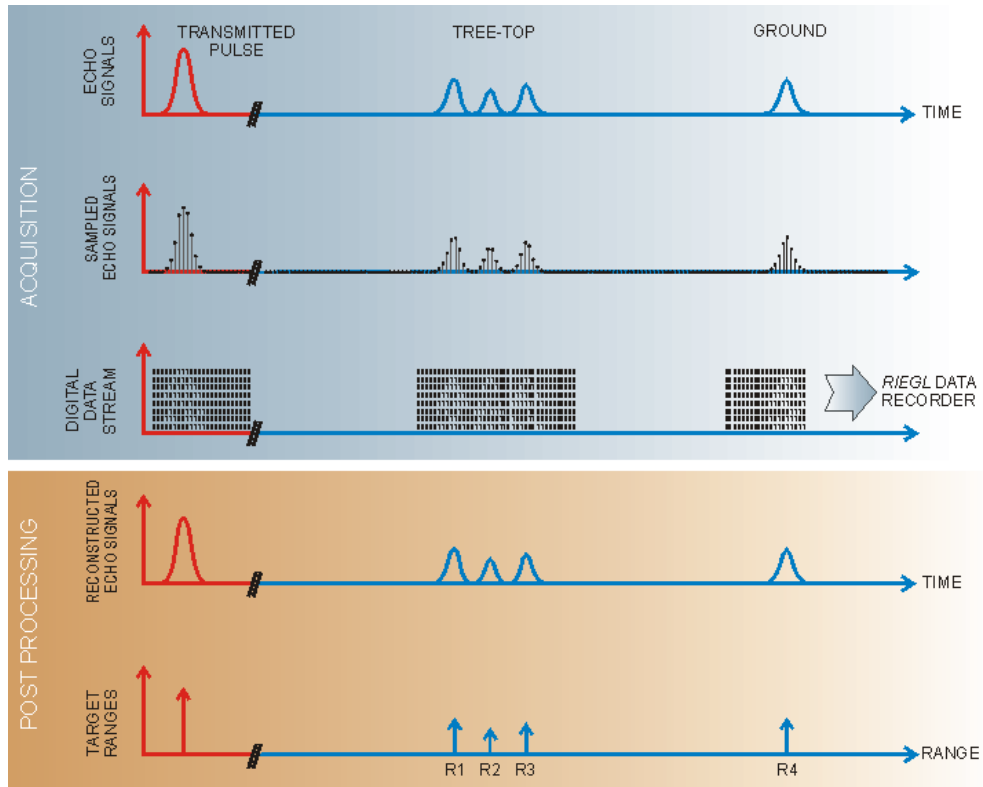


Figura 176 – Principio della misura delle distanze multiple.

5.3 // Laser scanner

L'unione di un distanziometro ad un'insieme di apparati meccanici di alta precisione ha reso possibile la realizzazione dei sensori laser scanner. La meccanica dello strumento permette di materializzare una direzione di acquisizione mentre il distanziometro laser acquisisce una distanza lungo la direzione stessa. Il risultato dell'acquisizione è un insieme di punti sparsi nello spazio in modo più o meno regolare che comunemente viene chiamata “nuvola di punti”.

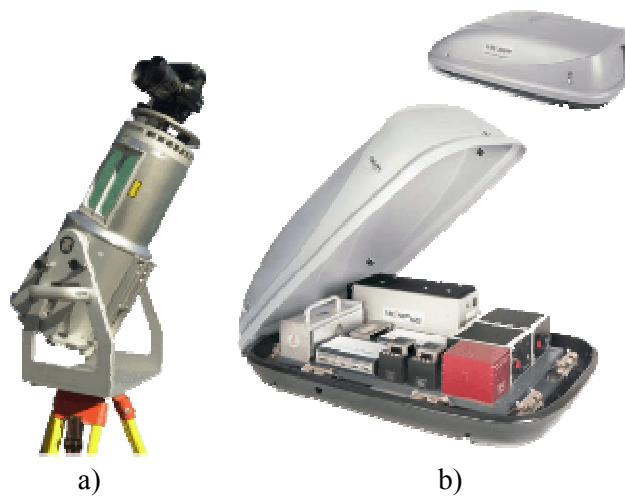


Figura 177 – a) Esempio di laser scanner terrestre (RIEGL LMS-Z420). Esempio di laser scanner aereo (RIEGL Lite Mapper 5600)

I laser scanner oggi presenti sul mercato sono molti ed ognuno di essi presenta caratteristiche differenti nel principio di acquisizione, nella precisione ottenibile, nella portata e nella velocità di acquisizione, nel supporto sul quale sono posizionati.

In particolare è possibile distinguere due grandi categorie di strumenti:

- laser scanner aerei
- laser scanner terrestri

5.3.1 Laser scanner aerei

Con laser scanner aerei si intendono tutti i laser scanner che sono installati su un velivolo (aereo o elicottero) e che effettuano l'acquisizione di dati durante il volo dello stesso (Figura 178 a) e b)).



a)



b)

Figura 178 – a) Esempio di aereo attrezzato con laser scanner. b) Esempio di elicottero attrezzato con laser scanner

Il laser da aereo è composto da un trasmettitore (essenzialmente un laser), di un ricevitore (costituito da un telescopio) e da un sistema di memorizzazione dati. La peculiarità del sistema è l'altissima velocità di acquisizione dei dati abbinata ad una elevata risoluzione.

I laser scanner da aereo sono progettati in modo tale che sia rispettata una condizione di non ambiguità nella misura della distanza. In sintesi, prima che il raggio emesso all'istante $t+1$ sia emesso, è necessario che tutti gli echi di ritorno del raggio emesso al tempo t siano tornati al sensore. Se f è la frequenza di emissione dei segnali, ciò equivale a dire che il tempo di andata e di ritorno sia minore del periodo dell'onda:

$$\frac{2h}{c} < \frac{1}{f} \Rightarrow h > \frac{c}{2f} \Rightarrow f < \frac{c}{2h} \quad (76)$$

Esiste quindi un vincolo che lega la frequenza massima e l'altezza massima (o distanza relativa massima) tra velivolo o sensore e territorio da acquisire.

Lo scanner aereo però non misura solo distanze ma misura le coordinate tridimensionali di punti del territorio. Naturalmente il sensore e quindi il sistema di riferimento proprio rispetto al quale il sensore stesso misura la posizione dei punti del territorio acquisito, essendo su una piattaforma in movimento, si sposta e ruota in modo continuo ed irregolare.

Per sapere in ogni istante la posizione e l'orientamento del sensore nello spazio è quindi necessario associare allo stesso una serie di apparecchiature di posizionamento, in particolare GPS e piattaforme inerziali (IMU).

Tale apparato è costituito essenzialmente da un sensore inerziale, dotato di tre accelerometri e tre giroscopi, capace di misurare le accelerazioni lineari e le velocità angolari, da un ricevitore GPS e da un apparato elettronico che provvede a sincronizzare i vari strumenti, a ricevere ed a memorizzare i dati da essi prodotti.

Durante l'acquisizione dei dati il sistema integrato GPS/IMU registra quindi la posizione e l'assetto del velivolo in ogni istante, mentre il sensore laser acquisisce il terreno in direzione ortogonale alla rotta, misurando e registrando le distanze dalla superficie al velivolo. Lo stesso sensore consente anche di misurare l'orientamento della retta normale all'aereo.

Dopo il volo, le coordinate planoaltimetriche (vedi Figura 179) dei punti misurati sono calcolate da un programma di post-elaborazione che combina le informazioni relative alla posizione e all'assetto del velivolo, alla direzione di scansione e alla distanza dei punti.

Oltre ai sensori laser, GPS ed IMU i velivoli sono quasi sempre equipaggiati anche con una camera fotografica o telecamera che serve ad acquisire le informazioni radiometriche del territorio digitalizzato.

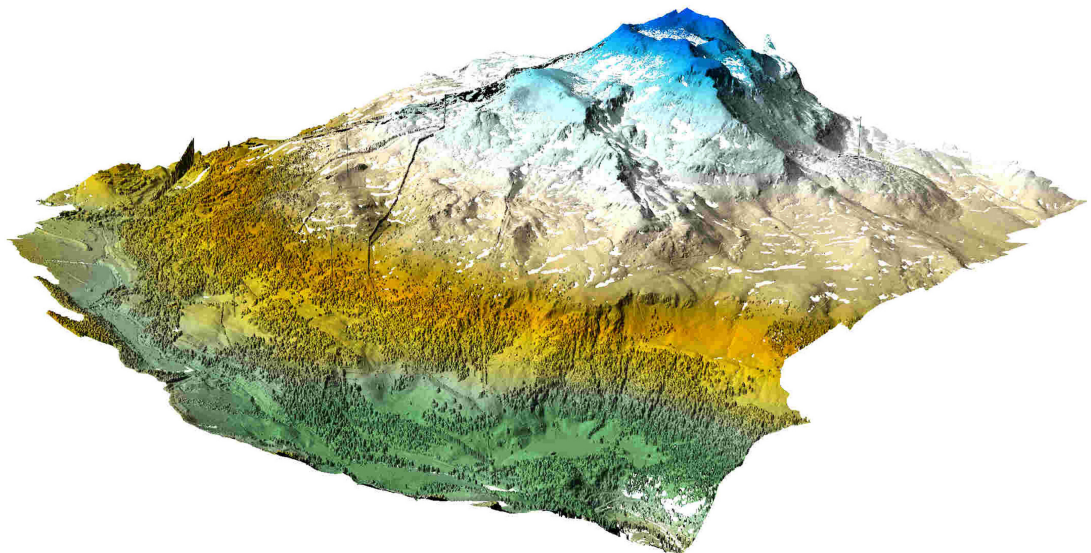


Figura 179 – Esempio di modello 3D ottenuto per mezzo di un sensore laser scanner aereo

5.3.1.1 Sistema a specchi di rotazione

Il sensore laser posizionato su velivolo è dotato di un distanziometro laser ottimizzato per l'alta velocità e di uno specchio rotante. La misura della posizione tridimensionale del punto avviene in coordinate sferiche. Il centro del sistema di riferimento è in genere nel centro di

rotazione dello specchio. Per ogni punto acquisito sono misurati una direzione nello spazio (ovvero due angoli) ed una distanza inclinata come schematizzato in Figura 180.

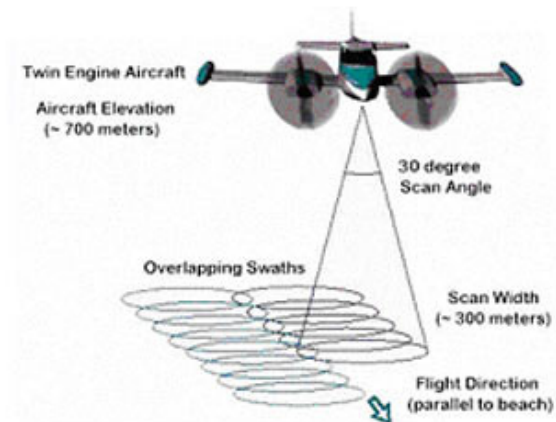
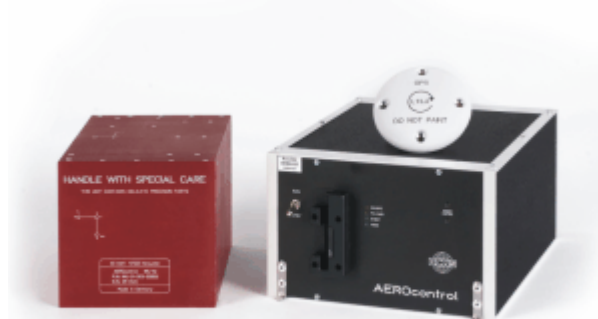


Figura 180 – Esempio di pattern di acquisizione da aereo con specchi o prismi di rotazione.

5.3.1.2 Integrazione con piattaforme GPS/IMU

In sintesi la scansione laser richiede che a bordo dell'aeromobile o dell'elicottero siano montati un distanziometro laser, un sensore GPS/IMU (Figura 181) e vari apparati di servizio per l'alimentazione di tutti i sistemi ed il controllo dei sensori e la memorizzazione dei dati acquisiti.

La modalità GPS utilizzata è quella relativa, cinematica, post processata, dunque è necessaria la presenza di uno o più ricevitori GPS master a terra, su punti di coordinate note.



a) b)
Figura 181 – Esempio di sistema GPS/IMU per laser scanner – a) Piattaforma inerziale IGI systems - b) Ricevitore GPS con unità di acquisizione a 12 canali L1/ e antenna GPS L1/L2.

5.3.1.3 Integrazione con camera metrica

La più semplice integrazione possibile degli strumenti laser da aereo o elicottero è quella con una camera fotografica digitale di tipo metrico.

L'integrazione che si ottiene attraverso l'accoppiamento del sistema laser con la camera fotografica digitale riguarda sostanzialmente i prodotti ottenibili. E' possibile integrare i due dati per creare modelli 3D a colori o ortofoto, semplici o di precisione, del territorio acquisito.

Affinché l'integrazione sia fattibile è necessario utilizzare una macchina fotografica digitale calibrata, avente un obiettivo di lunghezza focale adatto al tipo di acquisizione.



In particolare l'abbracciamento a terra dei due sensori (in termini di territorio acquisito) deve essere simile o meglio, l'abbracciamento ottenuto per via fotografica deve essere leggermente superiore all'abbracciamento del sensore laser. Questo aspetto è di fondamentale importanza per ottenere medelli del terreno colorati in ogni parte e non rischiare di avere porzioni di DEM prive dell'informazione radiometrica relativa.

La camera fotografica digitale è generalmente installata a fianco del sensore laser in modo da minimizzare la distanza tra centro di presa del laser e centro di prospettiva dell'immagine digitale.

La macchina fotografica è inoltre perfettamente integrata agli altri sensori presenti sul velivolo. L'acquisizione delle immagini è effettuata in modo del tutto automatico dal software di navigazione e per ogni immagine acquisita è memorizzato l'istante temporale dello stesso. In questo modo, quando si effettua il pre-processamento dei dati laser, è possibile determinare, di ogni immagine, i parametri di orientamento esterno (posizione nello spazio e assetto) tramite i dati acquisiti dai sensori GPS ed IMU.

5.3.1.4 Unità di acquisizione dati

Riassumendo, il sistema di acquisizione da aereo o elicottero è caratterizzato da un sensore laser scanner, una macchina fotografica digitale, dal sensore GPS e dalla piattaforma inerziale IMU.

Oltre ai sensori è necessario equipaggiare il velivolo di appropriate unità di acquisizione dati. Si tratta di banchi di memoria in grado di gestire e memorizzare la notevole mole di dati acquisiti. In genere esiste per ognuno dei sensori a bordo una specifica unità di acquisizione.

Il tutto è inoltre integrato mediante un computer che gestisce il navigatore di bordo e l'acquisizione dati.

5.3.1.5 Calibrazione pre-volo e durante il volo

Dopo l'installazione dei sensori sull'aeromobile, la prima operazione da effettuare, è la calibrazione del sistema. I sensori GPS, IMU, laser e camera digitale materializzano altrettanti sistemi di riferimento indipendenti tra loro. Si rende quindi necessario conoscere i parametri delle rototraslazioni spaziali che li legano, in modo da ricondurre tutte le misure effettuate con i differenti sistemi ad un unico sistema di riferimento. La strategia per risolvere questo problema, differente per ogni strumento, è generalmente basata su due passi: eseguire precise e opportune strategie nel montaggio dei sensori e misurare direttamente, all'interno del velivolo o dell'apparato nel quale sono alloggiati gli strumenti, alcune grandezze, quali il vettore eccentricità del centro di fase dell'antenna GPS rispetto all'origine del sistema inerziale, eseguire un volo di calibrazione su un poligono opportuno (generalmente la pista di un aeroporto) e determinare in modo indiretto le rimanenti grandezze come gli angoli della rotazione nello spazio che connette il sistema di riferimento materializzato dal IMU con quello del laser scanner.

Si tratta di una fase molto delicata la cui non corretta esecuzione provoca la presenza di errori sistematici nei dati finali. Se ad esempio, la differenza di altezza tra il centro del distanziometro ed il centro dell'antenna GPS è stata misurata con un'errore di 50 cm, le altezze di tutti i punti misurati durante il volo laser saranno sbagliate della stessa quantità.

Naturalmente a causa delle forti vibrazioni cui gli strumenti sono sottoposti durante il volo, gli allineamenti tra gli stessi tendono a modificarsi nel tempo. E' quindi necessario ripetere periodicamente la calibrazione del sistema.



Prima del volo è inoltre necessario effettuare l'operazione che generalmente è nota con il nome di allineamento, una fase in cui tutti i sensori sono accesi e registrano dati ma il velivolo sta fermo in pista. Tale fase è necessaria per determinare la posizione e l'assetto iniziale dei sistemi. La modalità con cui è effettuato l'allineamento e la sua durata variano da sensore a sensore. In genere l'allineamento ha una durata di circa 10 minuti. Le ditte costruttrici stanno cercando di ridurre al minimo il tempo necessario alla fase di allineamento senza compromettere la qualità dei risultati.

5.3.1.6 La sequenza di produzione dei dati dopo la calibrazione

Durante il volo l'acquisizione avviene mediante strisciate parallele in modo tale da acquisire in modo completo tutto il territorio.

La progettazione delle singole strisciate è effettuata attraverso il progetto di un piano di volo che deve tenere in conto la portata massima del sensore, la conformazione del territorio e una zona minima di sovrapposizione tra strisciate adiacenti.

I laser da aereo acquisiscono infatti una porzione di territorio che dipende dall'altezza relativa di volo e dall'apertura di acquisizione del sensore (o campo di vista del laser rispetto alla direzione nadirale di acquisizione).

La sovrapposizione tra strisciate è necessaria per garantire la copertura totale del territorio. Infatti il velivolo è soggetto a sbandamenti laterali dovuti sostanzialmente alle raffiche di vento che spostano la direzione di acquisizione del laser da nadirale ad inclinata. Avendo una sufficiente zona di sovrapposizione tra strisciate adiacenti si garantisce la copertura completa del territorio.

In ogni caso i parametri di inclinazione del velivolo durante l'acquisizione sono controllati da operatore a bordo direttamente durante il volo. Nel qual caso ci si accorgesse che il velivolo si è inclinato troppo è sufficiente ripetere la strisciata compromessa.

Durante il volo i sensori GPS, IMU laser e camera fotografica acquisiscono i loro dati in modo del tutto indipendente. Ad ogni dato è però associata un'etichetta temporale secondo una scala comune, in genere quella del GPS. In questo modo si rende possibile sincronizzare le varie misure a volo terminato. I sensori operano dunque indipendentemente gli uni dagli altri ma comunicano tra loro mediante i vari apparati elettronici di servizio presenti a bordo.

Alla fine del volo i dati prodotti dai sensori IMU e GPS di bordo e di terra sono integrati tra loro mediante l'utilizzo di software basati essenzialmente su filtri di kalman, che calcola la posizione e l'assetto dell'aereo in ogni istante del volo. Si tratta di una delle fasi più delicate di tutto il processamento dei dati e la qualità complessiva del dato finale dipende essenzialmente dalla qualità con cui è stato ricostruito l'orientamento esterno (posizione ed assetto) del sensore laser.

Il numero e la lunghezza dei cycle slips del GPS (perdita di segnale) condizionano fortemente i risultati, così come la distanza tra le stazioni GPS a terra ed il GPS a bordo. Nelle applicazioni GPS/IMU è raccomandata una distanza master-rover che non deve eccedere i 40 km circa.

L'accoppiamento dei dati GPS ed inerziali consente di ricostruire posizione ed assetto del sensore laser in tutti gli istanti in cui l'IMU ha effettuato misure. In realtà si tratta però di informazioni di tipo discreto. Per la risoluzione dell'orientamento è però necessario conoscere i dati inerziali come fossero una funzione continua nel tempo. La continuità temporale dell'orientamento si ottiene per interpolazione dei dati nel tempo.

Quando l'orientamento esterno del sensore è stato calcolato in funzione del tempo, la combinazione di questa informazione con le misure di distanza effettuate dal distanziometro laser



consente di calcolare le coordinate tridimensionali di tutti i punti colpiti. Quel che si ottiene è un seminato di punti sparsi chiamato in genere dato grezzo (o raw-data).

5.3.2 Laser scanner terrestri

I laser scanner terrestri sono l'insieme di strumenti laser a scansione che durante le fasi di acquisizione non si trovano installati su un velivolo in movimento.

I laser scanner terrestri sono in genere suddivisi in diverse categorie a seconda del sistema di acquisizione utilizzato e delle precisioni e portate raggiungibili.

In particolare è possibile distinguere due grandi categorie:

laser scanner distanziometrici o a tempo di volo
laser scanner triangolatori

Le differenze sostanziali esistenti tra i sistemi afferenti ad ognuna delle due categorie sono sostanzialmente la portata di acquisizione e le precisioni raggiungibili.

Nel caso degli strumenti distanziometrici è possibile raggiungere portate elevate (fino ad 1 km circa) con precisioni che mediamente sono dell'ordine del centimetro, nel caso degli strumenti a triangolazione è possibile ottenere precisioni submillimetriche ma con portate ridotte ad un massimo di una decina di metri.

Vista questa semplice considerazione è facile capire come nell'ambito del monitoraggio ambientale gli unici strumenti laser scanner al momento utilizzabili siano i laser scanner distanziometrici o a tempo di volo in quanto gli altri strumenti sono classicamente utilizzati per oggetti di piccole dimensioni ed in genere il laboratorio.

Per questo motivo la trattazione seguente sarà espressamente effettuata sui soli strumenti distanziometrici.

I laser scanner terrestri di tipo distanziometrico sono strumenti che dal punto di vista pratico possono facilmente essere paragonati a delle stazioni totali motorizzate ad elevata automazione (Figura 182, Figura 183). In effetti questi strumenti sono dotati di un dispositivo per la misura di un angolo lungo la verticale allo strumento (che corrisponde all'angolo zenitale nel caso in cui lo strumento sia posizionato in posizione verticale), di un dispositivo per la lettura di un angolo orizzontale rispetto l'asse dello strumento (o azimutale nell'ipotesi di verticalità dello strumento) e da un distanziometro per la misura delle distanze. La misura della posizione dei punti avviene quindi in coordinate sferiche rispetto al centro strumentale.

Esiste però una sostanziale differenza tra i rilevamenti topografici con stazione totale e le acquisizioni laser scanner. Le stazioni totali sono datate di un cannocchiale per la collimazione, questo significa che quando si effettua un rilievo topografico classico sono misurate le coordinate di punti particolari, scelti dall'operatore. In genere si tratta di punti appartenenti all'oggetto, che devono essere ben riconoscibili all'occhio e che definiscono in genere la sagoma dell'oggetto stesso (come ad esempio spigoli, fessure, ...).

I laser scanner terrestri, per loro natura, non sono dotati di un cannocchiale per la collimazione ma di uno specchio rotante per indirizzare il laser nella direzione voluta

Questo tipo di logica di acquisizione fa sì che non vi sia, per i sistemi ad acquisizione laser scanner, alcuna possibilità di scegliere i punti da rilevare. E' possibile in genere definire solo l'area che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata. Definiti questi parametri l'acquisizione è completamente automatica. Il risultato del rilevamento è una nuvola di punti molto densa ma con gli stessi distribuiti in modo casuale sull'oggetto. Non sono quindi in genere rilevati i punti che classicamente sono misurati con le tecniche di topografia classica.

I laser scanner distanziometrici in genere sono dotati di distanziometri laser ad impulsi (che misurano quindi un tempo di volo) in quanto permettono di effettuare misure molto velocemente (circa 10000 pti/sec) con precisioni elevate (dell'ordine dei 5 – 10 mm). La portata massima oggi raggiungibile con un sensore laser di classe 1 (quindi non pericoloso per la vista) è di circa 800 m (per punti naturali) – 1000 m (per punti ad elevata riflettività).

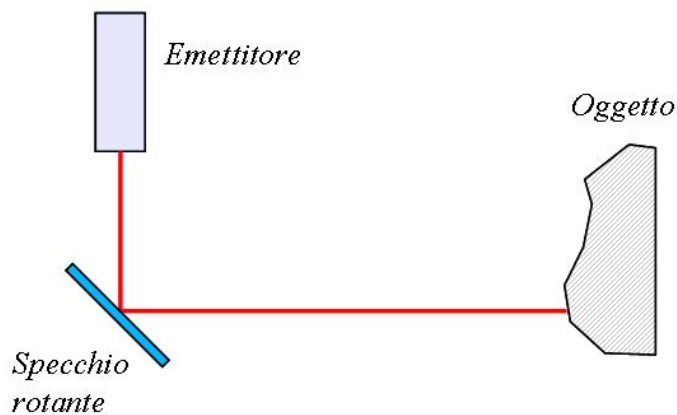


Figura 182 – Schema di funzionamento di un laser scanner terrestre di tipo distanziometrico.

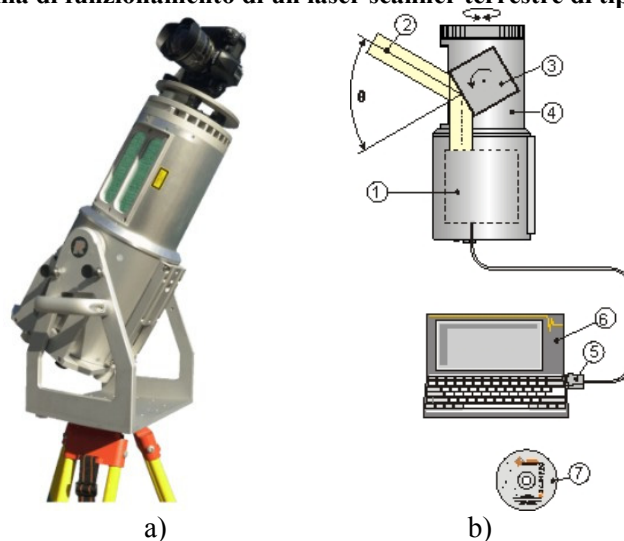


Figura 183 – Esempio di strumento laser scanner distanziometrico. a) RIEGL LMS-Z420, b) Principio di acquisizione del sensore RIEGL LMS-Z420.

5.3.2.1 Integrazione con camera digitale

I sensori laser scanner terrestri sono strumenti in grado di fornire modelli digitali di qualsiasi oggetto sotto forma di una nuvola di punti molto densa. Un modello a punti non è però, in genere, facilmente interpretabile da parte degli utilizzatori e spesso non è facile estrarvi informazioni utili.

Rispetto all'oggetto reale però un modello descrittivo ottenuto con i sensori laser scanner è ancora privo di tutta l'informazione radiometrica che è propria degli oggetti naturali e/o artificiali.

Per assegnare un valore aggiunto ai modelli 3D ottenuti con i sensori laser scanner i produttori di tali strumenti hanno integrato, all'interno degli strumenti stessi, apparecchi fotografici

digitali. Oltre al modello di forma i sensori moderni sono quindi in grado di acquisire anche l'informazione radiometrica dell'oggetto stesso.

La possibilità di disporre anche dell'informazione radiometrica agevola ulteriormente l'interpretazione dell'oggetto in quanto permette di ottenere modelli digitali tridimensionali perfettamente rispondenti in termini di forma e colore a quello reale, modelli che in letteratura informatica sono chiamati anche di realtà virtuale.

5.3.2.2 Metodi per l'integrazione fisica dei dati

Oggi è possibile integrare i dati laser scanner con le informazioni radiometriche dell'oggetto in diverse maniere.

Le più semplici soluzioni oggi proposte sono principalmente due:

utilizzare una fotocamera rigidamente connessa al laser scanner attraverso un sostegno calibrato (Figura 184 a);

utilizzare un sensore radiometrico interno al laser coassiale al raggio laser stesso (Figura 184 b).

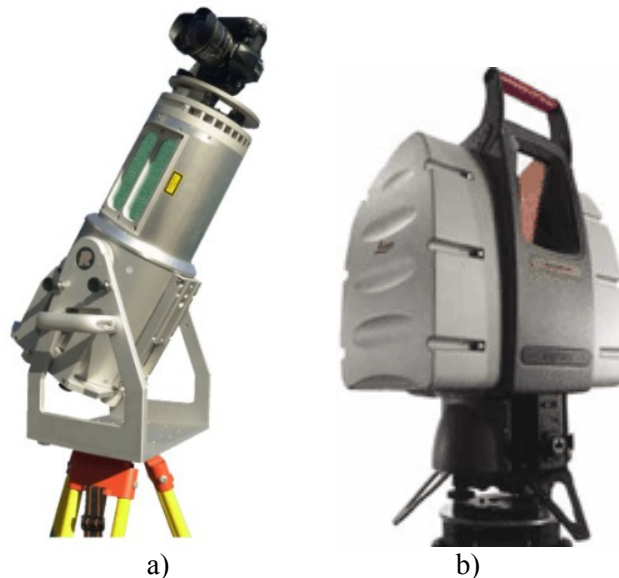


Figura 184 - a) Esempio di laser con fotocamera digitale connessa (RIEGL LMS-Z420 + Nikon D1X). b) Esempio di laser con sensore radiometrica integrato (LEICA HDS 3500).

Queste due tipologie di integrazione si distinguono sostanzialmente per alcuni motivi. Utilizzare una fotocamera esterna connessa allo scanner ha il vantaggio di permettere all'utente di scegliere la risoluzione dell'immagine e l'obiettivo più adatto alle proprie esigenze ed inoltre permette di ottenere una serie di prodotti di integrazione che si basano sull'utilizzo delle immagini digitali. Un esempio di integrazione sono l'immagine solida e l'ortofoto di precisione. Inoltre una fotocamera esterna può essere sostituita semplicemente con una più recente in caso di necessità. E' sufficiente effettuare la calibrazione dell'apparecchio prima del suo utilizzo.

Il numero di immagini da realizzare e la loro acquisizione viene effettuata direttamente attraverso il software di gestione dello strumento.

Per quanto riguarda i sensori interni integrati si possono distinguere due tipologie di sensori differenti:

laser con fotocamera interna integrata. Si tratta in genere di sensori a risoluzione fissata e con obiettivo di focale fissa, stabiliti dalla casa costruttrice in funzione della risoluzione del laser. Il numero di immagini digitali acquisite è funzione della dimensione della scena rilevata ed avviene in genere in modo automatico. La scelta del numero di immagini necessarie è demandata al software di gestione dello strumento;

laser con sensore a singolo spot coassiale con il raggio laser. Si tratta di strumenti dotati di un sensore radiometrico coassiale al raggio laser che, per ogni punto acquisito, misura anche il relativo tono radiometrico.

I sensori interni integrati sono in genere più difficilmente aggiornabili rispetto ad un apparecchio esterno, presentano però il vantaggio di poter effettuare il rilevamento con un solo strumento senza la necessità di trasportare fino al luogo del rilievo più strumenti e diversi cavi o dispositivi di connessione.

Nel caso dei sensori interni integrati a misurazione spot un ulteriore svantaggio è dovuto alla bassa risoluzione dell'immagine ottenuta (Figura 185). Essendo inoltre l'acquisizione laser, e quindi quella radiometrica, molto lenta, questo tipo di immagine è soggetta a cambiamenti di esposizione alla luce evidenti da un punto acquisito ad un altro.

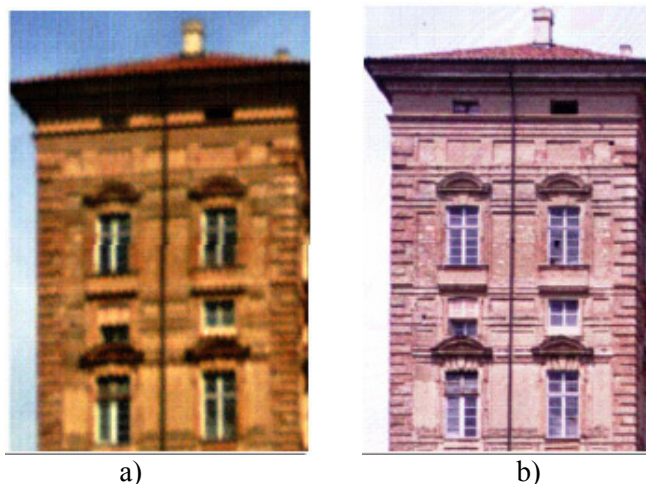


Figura 185 - a) Immagine acquisita con il laser scanner RIEGL LMS-Z210 dotato di un sensore interno integrato di tipo spot. b) Immagine acquisita con la camera digitale Nikon D1X.

5.3.2.3 Il principio dell'integrazione

L'intento dell'integrazione è quello di associare ad ogni entità geometrica acquisita (punto) il proprio colore. Il modello tridimensionale a punti acquisito con i sensori laser scanner è acquisito secondo coordinate sferiche.

L'informazione radiometrica degli oggetti viene rilevata attraverso l'acquisizione di una immagine digitale avente una certa dimensione, realizzata utilizzando un obiettivo avente una determinata focale, ovvero secondo il principio della prospettiva centrale.

Il principio di integrazione tra i dati laser scanner e le immagini digitali è semplicemente legato a queste due geometrie di presa che sono tra loro uguali.

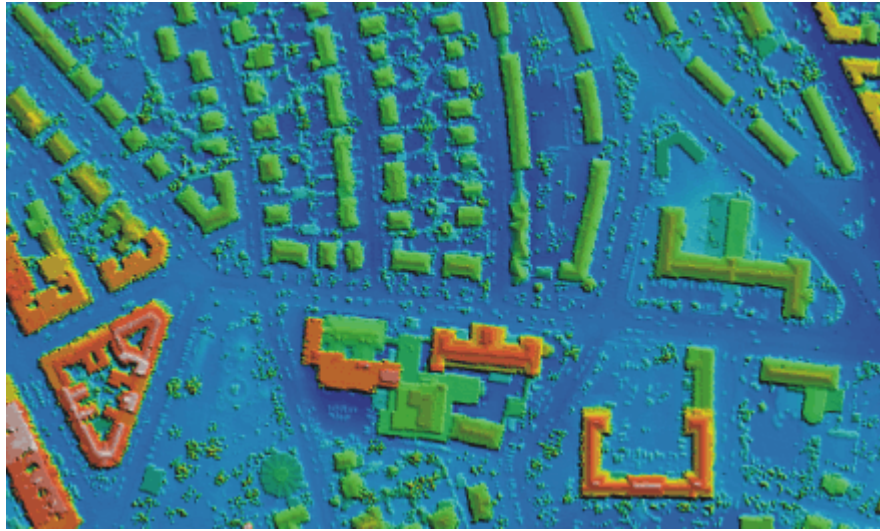
Affinché sia possibile una corretta integrazione tra le due tecniche è necessario che i due centri di presa coincidano per quanto possibile. In questo modo l'area acquisita da un sensore sarà la stessa acquisita con l'altro sensore.

Utilizzando le equazioni di collinearità (o equazioni della prospettiva centrale per le immagini digitali) è possibile associare ad ogni entità rilevata con il sensore laser un tono radiometrico e quindi colorare il modello (Figura 186 b).

5.4 *Trattamento dei dati LIDAR aerei*

A volo concluso e pre-processamento dei dati effettuato, quello che si ottiene è un seminato tridimensionale di punti noto anche con il nome dati sparsi (o raw-data)

I dati laser sono del tutto disponibili ma un loro uso corretto richiede spesso di effettuare alcune operazioni e trasformazioni riguardanti il loro inquadramento geodetico-cartografico e la loro struttura.



a)



b)

Figura 186 - a) DDEM acquisito con il sensore laser scanner da aereo – b) DDEM colorato

5.4.1 Il sistema di riferimento laser ed il cambio di datum plano-altimetrico

L'acquisizione dei punti laser scanner avviene riferendo il centro strumentale del laser al centro dell'antenna GPS. Per questo motivo le coordinate dei punti sparsi sono riferite al datum WGS-84 e le quote sono ellissoidiche.

Le coordinate ellissoidiche GPS non coincidono però con le coordinate geodetiche e/o cartografiche di cui in genere si necessita. Si pone dunque il problema del cambio di datum planimetrico ed altimetrico.

Spesso in Italia vi è la necessità di effettuare il cambio di datum planimetrico, cioè di convertire le coordinate fornite dal GPS dal datum WGS-84 originario al datum della cartografia



italiana, Roma 40. Si tratta di un'operazione ragionevolmente sicura, che tuttavia richiede qualche consapevolezza per essere ben compresa nelle sue modalità e nei suoi effetti. Esiste in ogni caso una metodologia ufficiale, definita dal IGMI (Istituto Geografico Militare Italiano), che vende anche i dati necessari ad effettuare la trasformazione.

Il cambio di datum altimetrico, cioè la conversione delle altezze da ellissoide a ortometriche, è sempre necessaria e presenta significativi pericoli in quanto tale fase inserisce nei dati degli errori che sono dello stesso ordine di grandezza di quelli commessi dal sensore. E' importante che le ondulazioni del geoide siano ben modellate per la zona interessata dal rilevamento laser. Anche in questo caso l'IGMI fornisce una metodologia ufficiale e definita su tutto il territorio, caratterizzata da una precisione nominale di 10 – 12 cm.

Per raggiungere precisioni superiori è necessario utilizzare in modo integrato dati acquisiti ad hoc sulla zona rilevata con metodologie differenti ed opportunamente integrati tra loro come ad esempio misure GPS e livellazioni, oppure misure gravimetriche.

5.4.2 Sovrapposizione delle strisciate

Durante il volo l'acquisizione avviene mediante strisciate parallele in modo tale da acquisire in modo completo tutto il territorio.

La progettazione delle singole strisciate è effettuata attraverso il progetto di un piano di volo che deve tenere in conto la portata massima del sensore, la conformazione del territorio e una zona minima di sovrapposizione tra strisciate adiacenti.

I laser da aereo acquisiscono infatti una porzione di territorio che dipende dall'altezza relativa di volo e dall'apertura di acquisizione del sensore (o campo di vista del laser rispetto alla direzione nadirale di acquisizione).

La sovrapposizione tra strisciate è necessaria per garantire la copertura totale del territorio. Infatti il velivolo è soggetto a sbandamenti laterali dovuti sostanzialmente alle raffiche di vento che spostano la direzione di acquisizione del laser da nadirale ad inclinata. Avendo una sufficiente zona di sovrapposizione tra strisciate adiacenti si garantisce la copertura completa del territorio.

5.4.3 Rimozione della vegetazione

I dati acquisiti con i sensori laser da aereo riguardano sostanzialmente porzioni di territorio. E' quindi usuale che parte dei dati laser acquisiti non riguardino direttamente il territorio interessato dall'acquisizione ma anche la vegetazione e le infrastrutture presenti su di esso.

L'acquisizione laser da aereo ha però come fine principale la descrizione della forma del territorio, privo di manufatti o vegetazione.

Una operazione che deve essere effettuata per ottenere il DTM del territorio è il filtraggio dei dati (Figura 187).

Esistono molte metodologie di filtraggio dei dati. Il principio al quale tutte le metodologie si rifanno è il cercare di discriminare punti appartenenti al terreno dagli altri in funzione della loro posizione spaziale nei confronti dei punti direttamente adiacenti. Si tratta in genere di metodi iterativi o regressivi che utilizzano come punti di partenza i punti aventi quota minore, quindi quelli che con maggiore probabilità appartengono al terreno.

5.4.4 Creazione del DEM

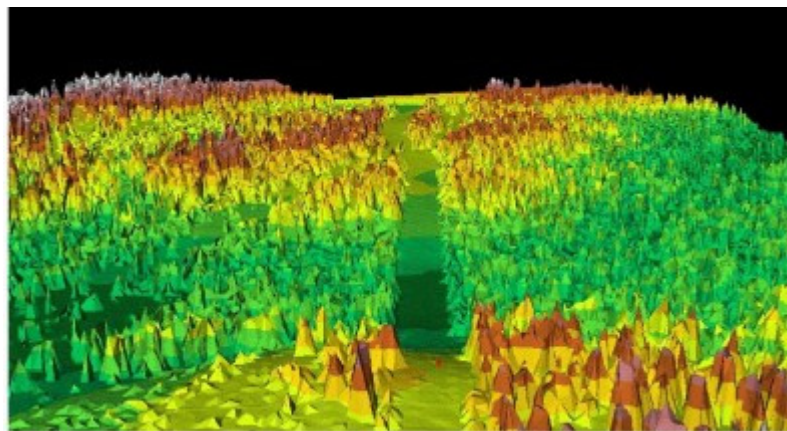
Il metodo di acquisizione laser scanner fornisce una nuvola di punti sparsi in modo irregolare sul territorio acquisito. In genere questo tipo di informazione non è facilmente utilizzabile.

Risulta decisamente più comodo utilizzare al posto dei punti casualmente distribuiti, dei grigliati regolari di punti.

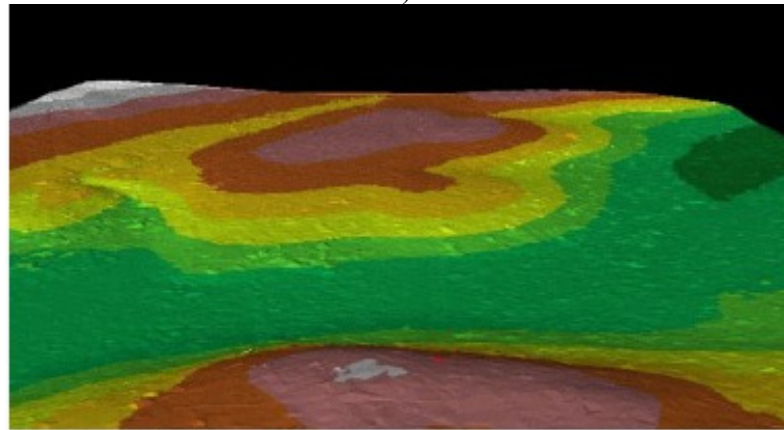
Al posto di rappresentare quindi l'andamento del terreno mediante un insieme di punti quotati o linee di livello che vi appartengono, si schematizza il territorio con una superficie regolare costituita da celle quadrate o rettangolari di dimensione scelta in funzione della scala del rilievo, o della densità iniziale di punti acquisiti sul territorio, le cui altezze sono determinate a partire dall'informazione altimetrica contenuta nei punti sparsi.

I grigliati di punti regolari inoltre occupano meno spazio sui dispositivi di memorizzazione dei dati e risultano decisamente più maneggevoli e più agevoli nel loro utilizzo.

Da non dimenticare che sono un dato di seconda generazione, ovvero frutto di una prima manipolazione informatica. Ne consegue un abbassamento della precisione.



a)



b)

Figura 187 - a) DDEM originale – b) DDEM filtrato dalla presenza della vegetazione

5.4.5 Segmentazione del DEM

I modelli digitali di forma ottenuti con i sensori laser non sono altro, come visto in precedenza, che nuvole di punti di tipo denso casualmente o irregolarmente sparsi sul territorio. Queste nuvole di punti presentano spesso una notevole complessità dovuta alla presenza di vegetazione e manufatti come ponti, lampioni, edifici, ecc sul territorio.

Dopo aver acquisito un modello a punti con metodologia laser scanner di un qualsiasi oggetto lo scopo che in genere ci si propone è quello di riuscire ad estrarre dalla nuvola di punti il maggior numero di informazioni geometriche possibili.

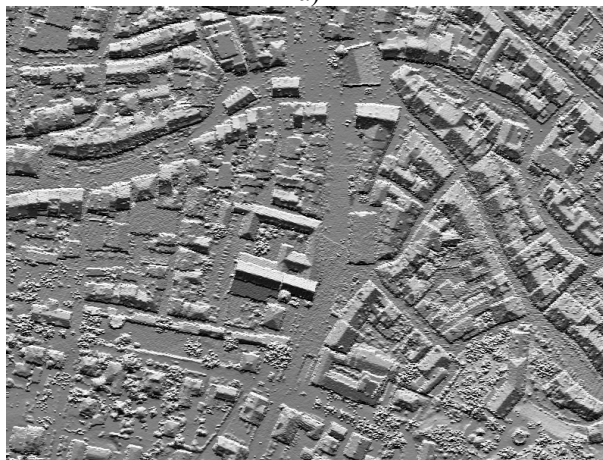
Uno dei metodi oggi utilizzati per l'estrazione di informazioni geometriche dalla nuvola di punti è la segmentazione.

Per segmentazione si intende l'insieme di analisi geometriche di forma e distribuzione dei punti all'interno della nuvola acquisita in grado di suddividere la nuvola stessa in sottoinsiemi uniformi, ovvero porzioni di punti aventi una distribuzione spaziale continua (Figura 188).

Lo scopo della segmentazione è ad esempio quello di suddividere la nuvola di punti laser in territorio, di suddividere le porzioni di tetto in falde, ecc...



a)



b)

Figura 188 - a) DDEM originale – b) DDEM segmentato

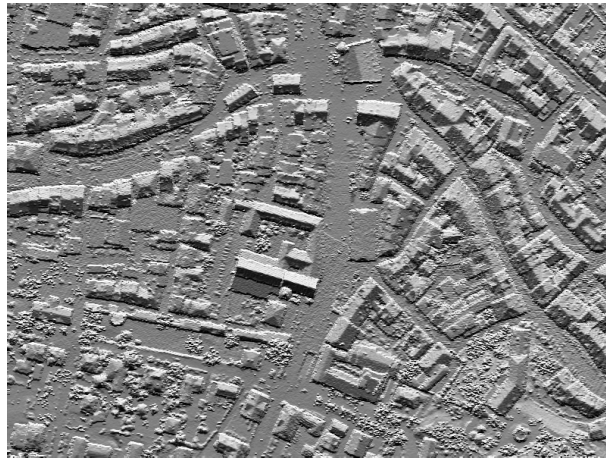
5.4.6 Estrazione delle linee di discontinuità

L'estrazione delle linee di discontinuità è l'operazione immediatamente successiva alla segmentazione della nuvola di punti. Come visto in precedenza la segmentazione è l'operazione che permette di suddividere una nuvola di punti in porzioni omogenee, ad esempio le due falde di un tetto.

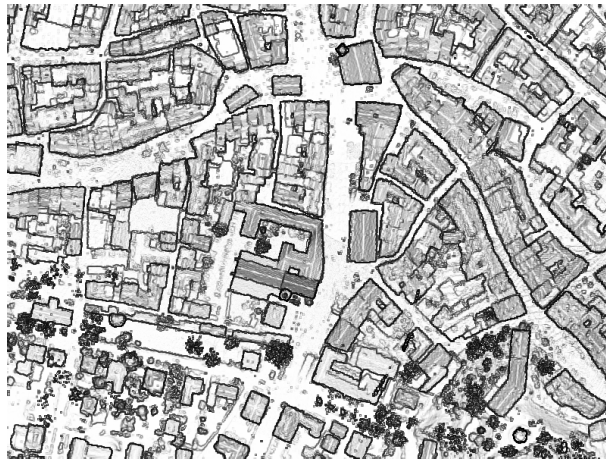
L'estrazione della linea di discontinuità (in letteratura chiamata anche breakline) è l'operazione che permette di trovare la linea tridimensionale di divisione tra due segmenti o porzioni di nuvola di punti adiacenti.

Normalmente l'estrazione della linea di discontinuità (Figura 189 b) avviene sostituendo ai due segmenti di nuvole di punti adiacenti la superficie matematica continua che meglio li approssima ed intersecando le due superfici stesse.

Dopo aver estratto dalla nuvola di punti le linee di discontinuità è necessario procedere alle fasi di editing e di analisi di coerenza ed intersezione delle linee stesse nello spazio.



a)



b)

Figura 189 - a) DDEM segmentato – b) Linee di discontinuità

5.5 *Tattamento dei dati LIDAR terrestri*

L'interesse di chi utilizza un sensore laser scanner è quello di ottenere uno o più prodotti del rilevamento che gli consentano di estrarre, nel modo più agevole possibile, una serie di informazioni riguardanti l'oggetto che è stato rilevato.

Le nuvole di punti acquisite con i sensori laser sono in grado, per loro natura, di rispondere a questo tipo di esigenza solo parzialmente. Si tratta infatti di dati di tipo discreto e quindi difficilmente interpretabili. Per questi motivi, al fine di ottenere uno o più prodotti in grado di rispondere alle esigenze dell'utilizzatore, si rende necessario elaborare correttamente i dati acquisiti.

A seconda del tipo di prodotto che si vuole ottenere dovranno essere attuate particolari procedure di trattamento ed elaborazione che, esattamente come nel caso delle acquisizioni, dovranno essere progettate a priori e controllate durante l'utilizzo.

Il progetto delle fasi di elaborazione del dato laser è di fondamentale importanza in quanto è proprio da questo insieme di operazioni che si ottiene il prodotto finale. Effettuare il trattamento dei dati in modo sbagliato è la causa principale dell'ottenimento di un prodotto non congruo rispetto a quello prospettato. Un progetto di trattamento dei dati laser correttamente

ideato permette invece da un lato di ottenere un prodotto finale di qualità, dall'altro di controllare operazione per operazione ciò che si sta producendo.

Con il termine di trattamento dei dati laser scanner si intende l'insieme delle operazioni che consente di ottenere, a partire da una o più nuvole di punti acquisite, un prodotto finale che possa essere utile ad un utente per l'estrazione di informazioni di interesse (modello 3D a colori, immagine solida, ortofoto di precisione,...). Questo insieme di operazioni può, per semplicità, essere rappresentato da due fasi ben distinte schematizzate in Figura 190.

trattamento preliminare dei dati laser;
creazione di un prodotto finale.

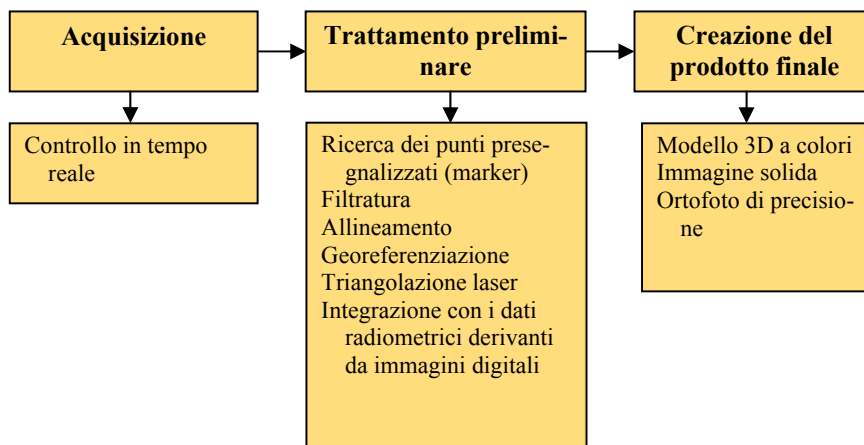


Figura 190 - Schema della procedura di trattamento dei dati laser scanner terrestri.

Con il termine trattamento preliminare del dato laser si intendono tutte le operazioni che vengono effettuate direttamente sulla nuvola di punti per la creazione di un modello 3D completo e corretto dell'oggetto. Al termine di questo insieme di operazioni il modello ottenuto è ancora sottoforma di punti sparsi ma privo di errori di acquisizione ed espresso in un unico sistema di riferimento scelto a piacere.

Le operazioni tipiche del trattamento preliminare dei dati laser sono:

- ricerca di punti presegnalizzati all'interno della scansione laser (marker o entità geometriche di vario tipo, ad esempio sfere di dimensione nota);
- filtratura della nuvola di punti per l'eliminazione degli errori di acquisizione (outliers e gross errors) e del rumore presenti;
- eliminazione dei punti non contestualmente legati all'oggetto (ad es. punti di sfondo o di primo piano);
- allineamento automatico di modelli tridimensionali adiacenti;
- georeferenziazione delle nuvole di punti in un sistema di riferimento esterno noto a priori;
- triangolazione laser delle nuvole di punti (per un corretto allineamento di una serie di scansioni adiacenti);
- colorazione della nuvola di punti per mezzo delle immagini digitali acquisite durante le operazioni di rilievo.

Il risultato che si ottiene dall'insieme delle operazioni elencate è una nuvola di punti complessa e completa dell'oggetto che rappresenta il corretto punto di partenza per la creazione di qualsiasi prodotto rivolto all'utilizzatore finale dei dati.

Dopo aver effettuato l'insieme delle operazioni di trattamento preliminare è possibile procedere alla creazione del prodotto finale vero e proprio. I prodotti oggi ottenibili utilizzando la tecnologia laser possono essere di vario tipo.



In particolare è possibile distinguere due famiglie di prodotti sostanzialmente differenti: prodotti che è possibile ottenere utilizzando la sola tecnologia laser (modello tridimensionale a superfici, curve di livello, sezioni, modelli di esposizione,...); prodotti ottenibili dall'integrazione della tecnologia laser scanner con le classiche tecniche di fotogrammetria digitale (ortofoto di precisione, immagine solida).

5.5.1 Integrazione con rilievo topografici terrestri e satellitari

Uno degli aspetti di fondamentale importanza nell'ambito delle acquisizioni laser scanner è la necessità di esprimere il modello acquisito rispetto ad un sistema di riferimento scelto a priori con tecniche topografiche o GPS.

Quando si effettuano delle acquisizioni laser queste sono espresse nel sistema di riferimento interno dello strumento.

In ambito ambientale od architettonico vi è però sempre la necessità di esprimere il modello acquisito in un sistema di riferimento scelto a priori, ad esempio nel sistema di riferimento cartografico o in un sistema di riferimento locale di monitoraggio.

Si rende quindi fondamentale, in questi ambiti, riuscire a esprimere il modello acquisito in un determinato sistema di riferimento attraverso l'integrazione del rilievo laser con rilievi topografici o satellitari.

Tipicamente con la topografia ed il GPS sono misurate le coordinate spaziali di singoli punti naturali o presegnalizzati sul territorio.

I laser scanner, al contrario, sono in grado di misurare la posizione 3D di milioni di punti.

L'acquisizione però è del tutto casuale quindi, in generale, i laser scanner non sono in grado di rilevare la posizione di un punto preciso.

E' necessario quindi, per rendere possibile l'integrazione dei dati laser con i dati della topografia e del GPS, stabilire una metodologia che permetta, utilizzando i dati laser scanner, di misurare o stimare le coordinate di singoli punti.

Il metodo di individuazione della posizione di un punto preciso all'interno delle scansioni laser si basa sul principio di acquisizione della riflettività da parte dello strumento.

I laser scanner sono in grado di misurare la posizione 3D di milioni di punti e per ognuno di essi di fornire il valore di riflettività (in termini di % di raggio riflesso) che il materiale possiede nei confronti del raggio laser.

L'informazione di riflettività è oggi ancora poco utilizzata dai software commerciali, ma non deve essere tralasciata quando si parla di ricerca. Il valore di riflettività è infatti legato al tipo di materiale componente l'oggetto, aspetto che può divenire di fondamentale importanza nell'analisi e nello sviluppo di procedure di elaborazione automatiche sul modello 3D.

L'informazione di riflettività del materiale acquisita con il laser scanner è classicamente utilizzata dai produttori di sistemi a scansione laser terrestre per visualizzare la nuvola di punti colorata secondo una scala di grigi (Figura 191 b). La scelta del tono radiometrico è funzione del valore di riflettività. Si ottiene in questo modo una visualizzazione in falsi colori che agevola la comprensione del modello .



a)



b)

Figura 191 – a) “La fagiania” Parco di Racconigi. b) – nuvola di punti 3D – colore espresso in funzione dell’istogramma dei valori di riflettività. Acquisizione effettuata con il laser scanner Riegl LMS Z420.

Il nostro intento è quello di individuare la posizione di punti precisi all'interno della nuvola di punti. Per fare ciò è sufficiente, al momento dell'acquisizione, disporre sull'oggetto alcuni adesivi ad alta riflettività (marker).

Quando il raggio laser colpisce questi adesivi (Figura 192) il valore di riflettività registrato è molto elevato, in generale è decisamente superiore rispetto a quello registrato per i punti naturali (ad esempio per la roccia, il legno, ...). Utilizzando questa semplice proprietà è possibile individuare la posizione degli adesivi in modo automatico all'interno del modello 3D acquisito con il laser scanner.

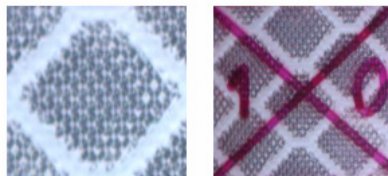


Figura 192 – Esempio di marker utilizzati per l'allineamento di scansioni adiacenti

Gli adesivi ad alta riflettività devono però essere opportunamente disposti e dimensionati sull'oggetto per una corretta determinazione della loro posizione. La loro ubicazione e dimensione devono essere calcolate in funzione della posizione dalla quale si intende effettuare la scansione, dalla risoluzione angolare che si vuole utilizzare e dalla distanza media tra oggetto e laser scanner.

5.5.2 Filtratura dei dati

Una delle operazioni fondamentali del trattamento preliminare del dato laser di tipo terrestre è la filtratura. Le nuvole di punti acquisite sono spesso affette da un leggero disturbo la cui entità è generalmente inferiore alla precisione dichiarata dello strumento (Figura 193 a). La sua presenza è dovuta in modo particolare alla divergenza del raggio laser che provoca una non esatta valutazione della distanza tra oggetto e punto di emanazione del raggio. Questo disturbo diventa facilmente visibile se si utilizza il dato laser originale nelle fasi di modellazione solida o per la creazione di ortofoto .



Figura 193 – Visualizzazione del rumore presente tramite una procedura di proiezione dell'immagine sul modello 3D originale. b) Visualizzazione degli errori di acquisizione commessi (outliers e gross errors)

Per ottenere il modello dell'oggetto depurato dal disturbo è necessario utilizzare appositi algoritmi in grado di ridurre o eliminare, per quanto possibile, gli errori di acquisizione presenti nel modello 3D.

La prima considerazione che è necessario fare è rivolta a capire quale è la sorgente del disturbo e degli errori di acquisizione presenti nella scansione. Gli strumenti laser, come già ampiamente specificato in precedenza, possono essere considerati come delle stazioni totali motorizzate ad elevata automazione. L'acquisizione è effettuata in coordinate sferiche attraverso la misurazione di un angolo orizzontale, un angolo verticale ed una distanza. La misurazione degli angoli è effettuata attraverso strumenti meccanici di precisione mentre la misurazione della distanza viene effettuata da un distanziometro laser. La precisione nella misurazione degli angoli è in genere molto elevata e comunque, in genere, sensibilmente più elevata rispetto alla precisione nella misurazione delle distanze. Se ne può quindi dedurre come i problemi relativi al rumore presente ed agli errori di acquisizione siano in gran parte computabili al distanziometro laser ed al problema, non trascurabile, della divergenza del raggio laser.

In Figura 194 sono riportati ad esempio due modelli prima e dopo le operazioni di filtratura che mettono bene in evidenza come siano stati eliminati gli errori grossolani ed accidentali (secondo esempio) e come sia stato effettivamente ridotto il rumore presente (primo esempio).

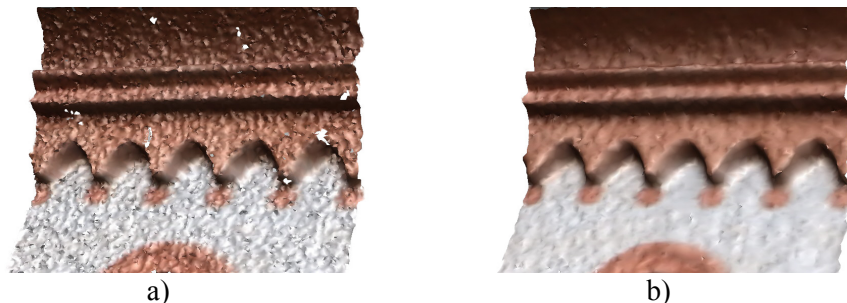


Figura 194 – Esempio di riduzione dl rumore presente. a) Proiezione dell'immagine sul modello 3D originale (a sinistra). b) Proiezione dell'immagine sul modello 3D filtrato (a destra).

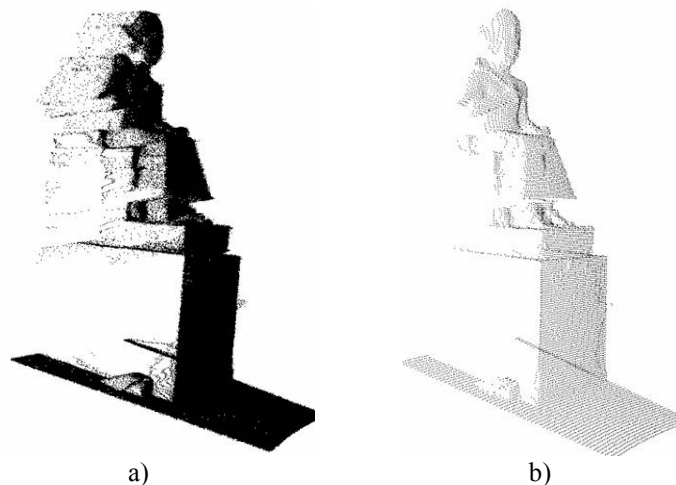


Figura 195 – Esempio di eliminazione dei gross errors ed outliers. a) Modello 3D originale (a sinistra). b) Modello 3D filtrato (a destra).

5.5.3 Rimozione della vegetazione

Quando si effettua una acquisizione laser in ambito architettonico, al fine di ottenere un modello a punti corretto dell'oggetto, è sufficiente filtrare i dati in modo da eliminare gli outliers ed i gross errors, che sono errori di acquisizione dovuti alla tecnica di acquisizione.

Nell'ambito ambientale sorgono alcune problematiche aggiuntive legate alla presenza di vegetazione.

La vegetazione deve essere considerata in modo differente se si sta effettuando una acquisizione da aereo o terrestre.

Per quanto riguarda le acquisizioni con lidar aereo la vegetazione è facilmente riconoscibile in quanto per ogni punto acquisito sono registrati più impulsi riflessi. Si possono distinguere quindi i rami alti dal terreno. Questo aspetto permette quindi di suddividere la nuvola di punti in terreno (DTM) e parte vegetata.

Nell'ambito terrestre le cose sono ben differenti. I laser scanner terrestri permettono infatti di acquisire un solo impulso per ogni punto e quindi non è possibile discriminare in modo semplice la vegetazione dal territorio. Le nuvole di punti risultano quindi molto più complesse sia da gestire che da trattare.

La rimozione della vegetazione è oggi effettuata in alcuni sporadici casi solo in parte in modo automatico. Esistono infatti in sviluppo alcuni algoritmi di filtratura che permettono di eliminare dalla nuvola di punti parte della vegetazione, in particolare una piccola parte del fogliame. Nella maggior parte dei casi, e anche se si utilizzano software per la rimozione della vegetazione, è sempre necessario effettuare una eliminazione manuale della vegetazione. Questa operazione viene effettuata per mezzo di software di modellazione tridimensionale con notevole dispendio di tempo.

5.5.4 Allineamento delle scansioni

Altra operazione di fondamentale importanza nel trattamento preliminare dei dati laser terrestri è l'allineamento di due nuvole di punti.

Nel rilievo di particolari opere architettoniche o di porzioni di territorio una singola scansione non è in genere sufficiente a descrivere in modo completo il soggetto in esame. Nella maggior parte dei casi è necessario eseguire più scansioni da punti di vista differenti in modo

da ottenere un modello privo di zone defilate o coni d'ombra (Figura 196). Naturalmente ogni scansione possiede un proprio sistema di riferimento locale. Allineare due scansioni significa esprimerle in un unico sistema di riferimento.

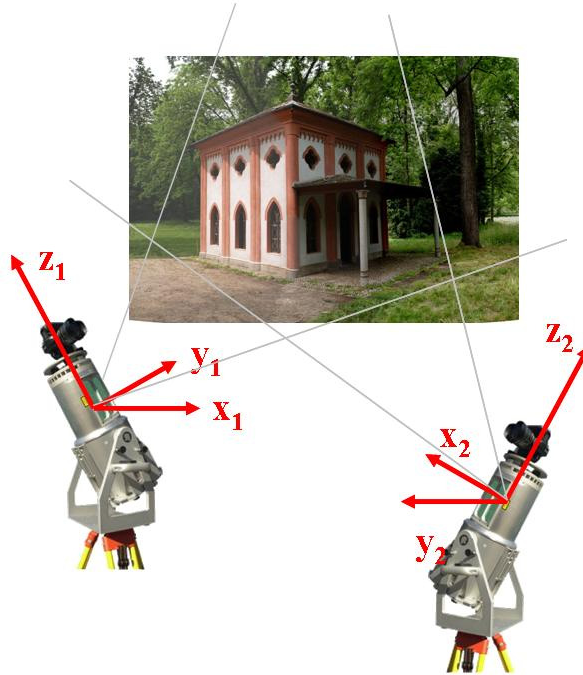


Figura 196 – Esempio di oggetto per descrivere il quale sono necessarie più di una scansione.

Per allineare due scansioni adiacenti queste devono avere tra loro una zona di sovrapposizione sufficientemente ampia che funge da collegamento tra le due. Nel caso di zone di sovrapposizione molto ridotte è comunque possibile ottenere la registrazione di un modello nei confronti di quello adiacente ma possono crearsi problemi di mal condizionamento che si traducono in un non corretto allineamento tra le due nuvole di punti.

I metodi di allineamento che sono oggi utilizzati nel campo del laser scanner terrestre sono sostanzialmente due:

metodi che utilizzano punti pre-segnalizzati (marker) che fungono da punti di legame e di controllo

metodi iterativi che utilizzano la forma completa dell'oggetto.

Nel caso dell'allineamento con utilizzo di marker, questi sono posizionati nella zona di sovrapposizione dei due modelli 3D adiacenti. La loro grandezza è calcolata in funzione della densità di punti che si vuole ottenere sull'oggetto. I marker servono in parte da punti di legame tra le scansioni adiacenti in parte possono servire da punti di controllo per valutare la bontà dell'allineamento.

Altro metodo per l'allineamento di modelli adiacenti è quello di utilizzare un algoritmo iterativo in grado di allineare due oggetti utilizzando tutti i punti presenti nella zona di sovrapposizione (ad esempio l'algoritmo ICP – Iterative Closet Points). Questo metodo, per funzionare correttamente, ha necessità di utilizzare ampie zone di sovrapposizione tra i modelli adiacenti ed è necessario conoscere a priori una buona soluzione approssimata di allineamento tra le acquisizioni.

Di solito il metodo iterativo non consente di utilizzare punti di controllo e non fornisce nessun parametro statistico in grado di permettere la valutazione di qualità dell'allineamento. Di

solito sono forniti semplicemente la soluzione finale e la distanza media tra i modelli (che è un indice poco significativo in quanto non è valutata su punti omologhi ma su punti probabilmente, ma non certamente, omologhi.)

Tra le due metodologie di allineamento delle scansioni, dal punto di vista del trattamento topografico delle misure, risulta sicuramente più corretta la prima, quella che utilizza i marker come entità di allineamento in quanto i punti omologhi sono effettivamente punti omologhi, è possibile ottenere tutti i parametri di stima dell'allineamento ed è possibile utilizzare punti di controllo.

5.5.5 Georeferenziazione dei modelli complessi

La georeferenziazione è una procedura che consente di rototraslare una nuvola di punti nello spazio in modo da allinearla od esprimerla in un determinato sistema di riferimento stabilito a priori (ad esempio quello di una rete topografica o GPS).

La procedura di georeferenziazione è del tutto analoga a quella di allineamento di due scansioni con l'utilizzo di marker. L'unica differenza consiste nell'insieme di punti iniziali. Nel caso dell'allineamento si hanno due insiemi di marker determinati in modo automatico dal software. Nel caso della georeferenziazione si utilizza un insieme di punti estratto automaticamente dalla nuvola di punti ed un secondo insieme di punti determinato per via topografica o GPS e successivamente importato nel programma.

Per poter effettuare la georeferenziazione di un modello non è possibile utilizzare metodi di allineamento iterativi.

Utilizzare i marker consente inoltre di impostare alcuni punti come punti di controllo (come nel caso dell'allineamento tra scansioni adiacenti) per la corretta valutazione della precisione ottenuta durante le fasi di georeferenziazione.

5.5.6 Triangolazione LIDAR

Per ottenere il modello 3D di oggetti particolarmente complessi o di dimensioni elevate (ad esempio il fronte di un edificio o un'area ambientale particolarmente estesa) è necessario effettuare più di una scansione (Figura 197). Il modello finale è ottenuto allineando, a due a due, le varie scansioni effettuate.

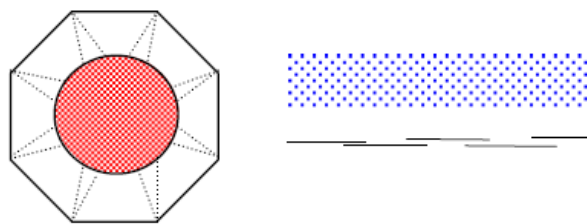


Figura 197 – Esempi di oggetti per cui sono necessarie molte scansioni per effettuare un rilevamento laser scanner completo.

Dovendo effettuare il rilevamento di una porzione di territorio od oggetto particolarmente ampia è necessario effettuare acquisizioni che non presentino aree di sovrapposizione troppo ampie per motivi di tipo economico e di tempo.

Registrando molte scansioni in successione, se la zona di sovrapposizione tra le stesse è ridotta, è facile incorrere in problemi di errato allineamento. In questi casi si rischia di ottenere una nuvola di punti che si allontana sempre più dalla sua posizione corretta.

Per poter recuperare la posizione corretta dei singoli modelli, utilizzando i marker impiegati per l'allineamento delle coppie di scansioni, è necessario utilizzare appositi algoritmi di triangolazione.

Come evidenziato nel caso dell'allineamento di due scansioni adiacenti l'allineamento di una lunga serie di scansioni può, per similarità, essere ricondotto al problema fotogrammetrico della triangolazione a modelli indipendenti nel caso di lunghe strisciate singole.

Le numerose esperienze effettuate nel campo fotogrammetrico mettono in evidenza come nella triangolazione aerea la precisione che è possibile ottenere dipende dal numero e dalla posizione dei punti di controllo a terra (Figura 198).

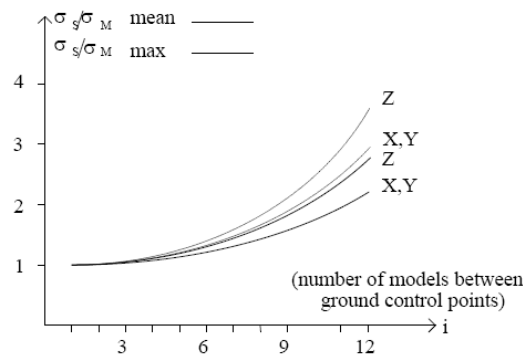


Figura 198 – Precisioni ottenibili nel caso di una lunga strisciata nel caso di triangolazione fotogrammetrica.

Nella triangolazione fotogrammetrica, per poter ottenere come risultato finale la precisione desiderata, è necessario posizionare un punto di controllo a terra ogni 3 modelli (che deve essere computato nella stima per l'ottenimento della soluzione finale). Considerando l'analogia tra il caso fotogrammetrico ed il caso laser è possibile affermare come, anche nel caso laser, per ottenere un modello finale corretto dell'oggetto, è necessario utilizzare almeno un punto di controllo a terra ogni 3 scansioni. Naturalmente il numero minimo di punti di controllo a terra deve essere 3.

Il problema della triangolazione laser è risolto utilizzando una procedura analoga a quella utilizzata in campo fotogrammetrico nel caso dei modelli indipendenti. Il calcolo delle correzioni ai singoli modelli (o delle singole scansioni) è effettuato utilizzando un metodo di stima basato sui minimi quadrati.

Per concatenare tra loro le singole scansioni in un'unica strisciata o blocco riferito al sistema di riferimento terreno (o topografico) si utilizzano i punti di legame (appartenenti contemporaneamente a più di un modello) e punti di appoggio rilevati a terra con le tecniche topografiche classiche.

Sia i punti di legame che i punti di appoggio a terra sono materializzati sull'oggetto utilizzando adesivi ad alta riflettività.

La compensazione consiste nel trasformare ogni modello mediante tre rotazioni e tre traslazioni in modo tale che i punti di legame risultino il più possibile coincidenti e gli scarti residui sui punti di appoggio siano i più piccoli possibile.

5.6 Integrazione dei dati LIDAR con la Fotogrammetria

Per quanto visto in precedenza, i sensori laser scanner, che siano essi aerei o terrestri, sono strumenti in grado di fornire modelli digitali di qualsiasi oggetto sotto forma di una nuvola di

punti molto densa. Un modello a punti non è però facilmente comprensibile e spesso non è facile estrarvi informazioni utili.

Affinché il modello sia più semplicemente comprensibile è usuale effettuare la modellazione tridimensionale, che consiste nel trasformare, attraverso opportune metodologie, l'insieme di punti in una o più superfici (Figura 199).

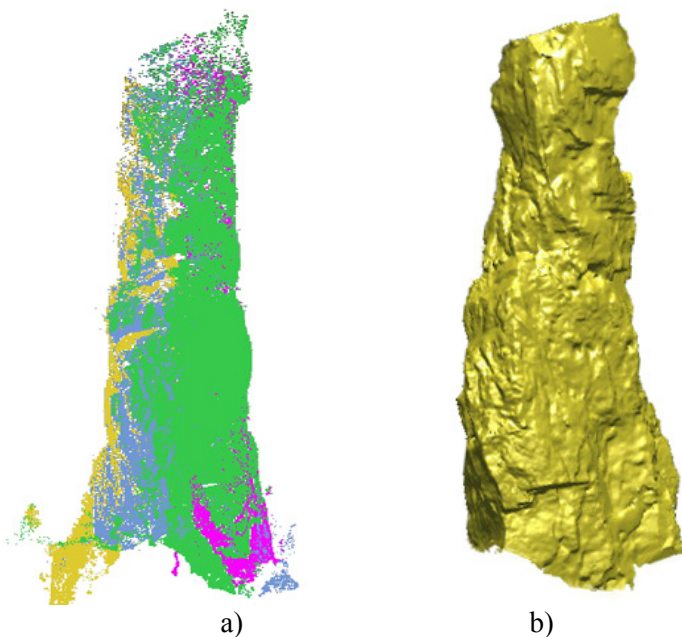


Figura 199 - a) Nuvola di punti acquisita con un sensore laser (4 scansioni). b) Superficie 3D ottenuta dal modello a punti (Tours Saint Jacques – Allèves – Francia)

Quando si ha a disposizione un modello a superfici dell'oggetto è possibile, attraverso l'utilizzo di appositi software, estrarre informazioni di volume, sezioni, ecc...

Rispetto all'oggetto reale però un modello descrittivo così ottenuto è ancora privo di tutta l'informazione radiometrica che è propria degli oggetti naturali e/o artificiali.

La possibilità di disporre anche dell'informazione radiometrica agevola ulteriormente l'interpretazione dell'oggetto in quanto permette di ottenere modelli digitali tridimensionali perfettamente rispondenti a quello reale, modelli che in letteratura informatica sono chiamati di realtà virtuale.

Per questo motivo i costruttori di laser scanner e molti ricercatori hanno cercato, negli ultimi anni, di integrare l'informazione tridimensionale geometrica acquisita con i sensori laser scanner con l'informazione radiometrica reale degli oggetti. Le soluzioni ottenute sono diverse ed oggi, molti degli strumenti laser presenti nel mercato del rilevamento, permettono di acquisire, oltre all'informazione geometrica ed ai valori di riflettività valutati per mezzo della radiazione laser anche l'informazione radiometrica. I modelli ottenuti sono quindi nuvole di punti tridimensionali di tipo denso colorate.

5.6.1 Colorazione del modello a colori reali

Si trascurano in questa trattazione i laser scanner con sensore integrato di tipo spot coassiali al raggio laser in quanto per questo tipo di sensore è semplicemente acquisito un tono radiometrico per ogni punto geometrico.

In tutti gli altri strumenti l'informazione radiometrica viene rilevata attraverso l'acquisizione di una immagine di una certa dimensione (sia nel caso di sensore interno che nel caso di fo-

tocamera esterna infatti si hanno un sensore collegato ad un obiettivo fotografico stabilito), realizzata utilizzando un obiettivo avente una determinata focale.

L'intento dell'integrazione è quello di associare ad ogni entità geometrica acquisita (punto) il proprio colore (Figura 200)..

Per poter associare ad ogni punto il proprio colore è necessario per prima cosa conoscere le relazioni geometriche in base alle quali si sono formate le immagini (vedi par. 4.6.3).

Note le coordinate X, Y, Z del punto acquisito (nel sistema laser scanner) e noti i parametri di orientamento esterni ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$) ed interni ($\xi_0, \eta_0, c, k_1, k_2, k_3$) dell'immagine è possibile calcolare le corrispondenti coordinate immagine del punto ξ, η e di conseguenza il tono radiometrico relativo al punto. Ripetendo l'operazione di prospettivizzazione per ogni punto del modello si ottiene come risultato finale un modello 3D a punti colorato.



Figura 200 - Nuvola di punti acquisita con un sensore laser scanner terrestre colorata.

Naturalmente l'integrazione tra due tecniche è effettuata tramite l'utilizzo di due tecniche combinate. Particolare attenzione deve essere posta nei confronti degli eventuali errori di integrazione (ad esempio dovuti ad un non perfetto allineamento dei sensori laser e fotogrammetrico).

Un sistema di acquisizione di buona qualità deve poter prevedere la possibilità di riallineare le due metodologie e deve essere in grado di fornire dei parametri, meglio se statistici, che indicano l'ordine di grandezza dell'errore che si commette integrando le differenti metodologie utilizzate.

5.6.2 Immagini solide

Come visto nei capitoli precedenti, uno degli argomenti che maggiormente ha suscitato e continua a suscitare interesse da parte dei ricercatori e dei produttori di strumenti laser scanner, è l'integrazione della tecnologia laser scanner con altri tipi di informazione. Tra tutte le possibili integrazioni quella dell'informazione radiometrica derivante da immagini digitali ad elevata definizione è quella che suscita maggior interesse. Questo tipo di completamento di dati permette infatti di colorare la nuvola di punti con i colori reali dell'oggetto. I modelli ottenuti sono molto simili a quelli di realtà virtuale e rendono possibile la creazione di modelli tridimensionali e di visualizzazioni digitali prima d'ora impensabili.



Colorare la scansione laser non è però l'unica scelta possibile.

Innanzitutto è necessario effettuare alcune considerazioni sul ruolo dei sensori laser e delle tecniche di fotogrammetria nel rilevamento di oggetti in genere e come queste due tecniche trovino modo di integrarsi.

Effettuare un rilevamento di un oggetto significa descrivere la forma dell'oggetto stesso rispettandone dimensioni e proporzioni. Per descrivere un oggetto in genere sono restituite (o disegnate) le parti che caratterizzano l'oggetto stesso e che possono essere di tipo geometrico (ad esempio spigoli, angoli, cambi di pendenza) o radiometrico (ad esempio il passaggio, su una superficie piana, da un materiale ad un altro).

La fotogrammetria, la topografia e le tecniche di rilevamento in genere cercano proprio di descrivere gli oggetti secondo questa ottica, attraverso cioè l'individuazione e la successiva restituzione delle linee di discontinuità.

Il laser scanner, per le sue caratteristiche di acquisizione, non rispecchia invece questo tipo di esigenza. La possibilità offerta dai laser scanner è infatti quella di poter creare una copia dell'oggetto in scala sottoforma di nuvola di punti, quella che in genere è chiamata **DDSM** (*Dense Digital Surface Model*). I punti acquisiti non coincidono però mai con le linee di discontinuità dell'oggetto in quanto l'acquisizione avviene in modo casuale. In genere quasi nessun punto acquisito colpisce perfettamente i bordi geometrici o radiometrici dell'oggetto.

Da questa semplice ma fondamentale considerazione si capisce come in realtà i laser scanner siano uno strumento che si rivolge al mercato del rilevamento fornendo un'informazione assolutamente nuova rispetto a quelle fornite dalle tecniche di fotogrammetria e topografia e che non si trova in alcun modo in concorrenza con esse.

Valutando la diversità di prodotto fornito è quindi facilmente comprensibile come la massima produttività possibile la si ottiene attraverso un'integrazione ragionata delle due tecniche di rilevamento.

La più semplice di queste integrazioni è quella di unire i dati radiometrici della fotogrammetria a quelli geometrici acquisiti dal sensore laser, ovvero colorare la nuvola di punti utilizzando delle immagini digitali.

Le immagini digitali ad alta definizione sono però, allo stato attuale, molto più ricche di informazioni rispetto alle scansioni laser (in termini di punti acquisiti a parità di distanza di presa e di campo di acquisizione). Colorare una nuvola di punti significa quindi in qualche modo perdere parte delle informazioni acquisite per via fotografica. Come se non bastasse le informazioni perse sono proprio quelle che, in fotogrammetria, sono utilizzate per la definizione delle linee di discontinuità.

Una soluzione alternativa è quella di cercare di preservare la qualità dell'immagine digitale ed integrare le due tecniche secondo principi differenti. E' proprio in questa ottica che è stata sviluppata l'immagine solida. Si tratta di un nuovo prodotto di integrazione che mantiene completamente intatte le caratteristiche geometriche e radiometriche dell'immagine digitale permettendo però la gestione contemporanea di tutte le informazioni tridimensionali geometriche acquisite con i sensori laser scanner.

Una qualsiasi immagine può essere considerata con buona approssimazione una prospettiva centrale dell'oggetto fotografato¹⁸.

Se di una immagine digitale si conoscono i parametri di orientamento e di calibrazione, per ogni pixel di essa è possibile stabilire una direzione nello spazio nel sistema di riferimento ξ ,

¹⁸ Si trascurano in questa prima parte di trattazione i problemi dell'orientamento interno delle immagini digitali per facilità di comprensione del problema. L'immagine è considerata come una prospettiva centrale corretta dell'oggetto. In seguito saranno introdotti i problemi relativi all'orientamento interno delle immagini.

η e ζ attraverso la determinazione di un angolo orizzontale ed un angolo verticale (vedi Figura 202)

$$\Theta = \arctan \frac{\xi_i}{c}$$

$$\alpha = \arctan \frac{\eta_i}{\sqrt{c^2 + \xi_i^2}}$$

dove:

Θ = angolo orizzontale;

α = angolo verticale;

c = distanza focale;

ξ, η = coordinate immagine.

Se si desidera determinare la posizione di un oggetto in coordinate 3D non è però sufficiente utilizzare una sola immagine in quanto da questa è possibile stabilire al massimo delle direzioni nello spazio. Per poter ricostruire gli oggetti nella loro tridimensionalità è necessario utilizzare almeno 2 immagini secondo i classici principi della fotogrammetria.

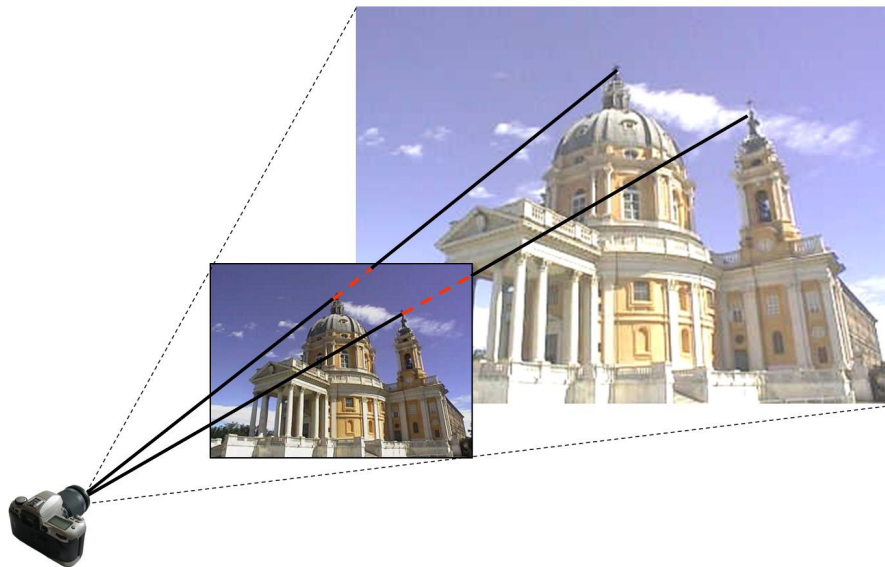


Figura 201 – Concetto di prospettiva centrale

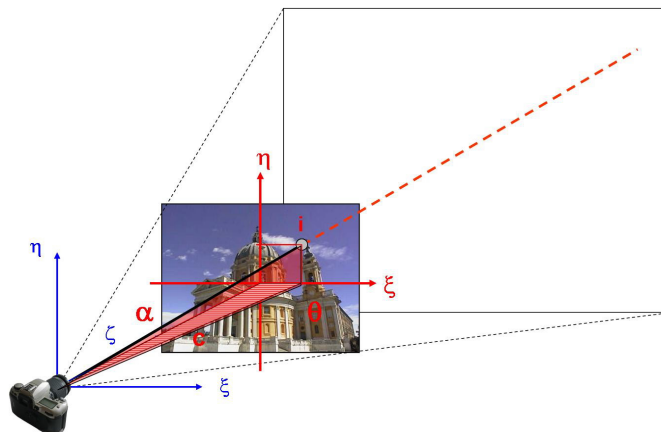


Figura 202 – Determinazione di una direzione nello spazio.

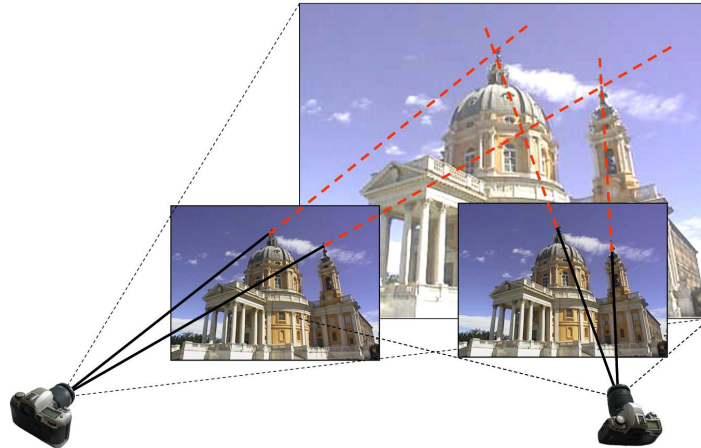


Figura 203 - Ricostruzione della tridimensionalità secondo il principio della fotogrammetria.

Una valida alternativa all'uso delle tecniche di fotogrammetria è rappresentata dalla possibilità di conoscere, per ogni direzione nello spazio, il valore di distanza tra il centro di prospettiva dell'immagine e l'oggetto stesso. In questo modo è possibile stabilire la posizione di un oggetto nelle coordinate ξ , η e ζ utilizzando delle semplici equazioni geometriche (vedi Figura 204).

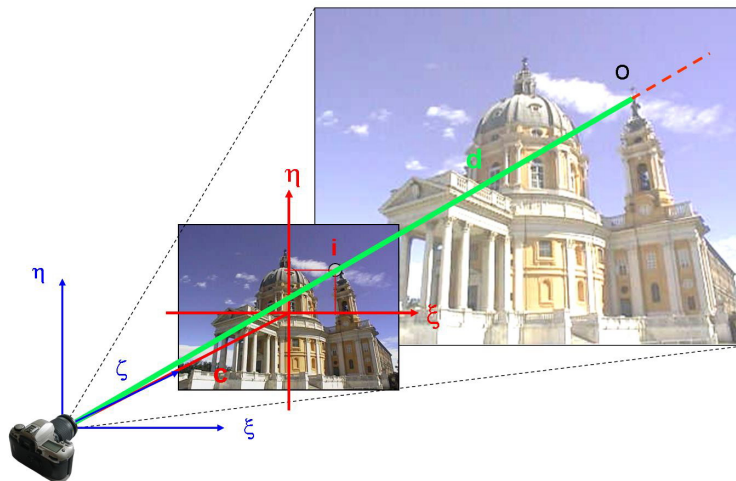


Figura 204 – Determinazione della posizione di un punto attraverso la conoscenza di una direzione e di una distanza

$$\xi_0 = d \cdot \cos \alpha \cdot \sin \Theta$$

$$\eta_0 = d \cdot \sin \alpha$$

$$\zeta = d \cdot \cos \alpha \cdot \cos \Theta$$

con

$$\Theta = \arctan \frac{\xi_i}{c}$$

$$\alpha = \arctan \frac{\eta_i}{\sqrt{c^2 \cdot \xi_i^2}}$$

dove:

ξ , η , ζ definiscono le coordinate pixel dell'immagine;

α , e θ sono i due angoli che definiscono la direzione nello spazio;

d è il valore di distanza tra il centro della prospettiva e l'oggetto

ξ_0 , η_0 e ζ sono le coordinate 3D del punto di oggetto.

Per calcolare le coordinate 3D dell'oggetto rappresentato sull'immagine utilizzando una sola immagine è quindi sufficiente conoscere, per ogni direzione nello spazio, e quindi per ogni pixel dell'immagine digitale, il valore di distanza tra il centro di prospettiva dell'immagine e l'oggetto stesso.

Questo insieme di informazioni è facilmente ottenibile attraverso l'utilizzo di un modello 3D di tipo denso (DDSM).

Tali modelli sono oggi ottenuti in modo agevole ad esempio avvalendosi dei sensori laser scanner. I laser scanner sono in grado di acquisire una nuvola di punti molto densa dell'oggetto stesso. Se si conosce la posizione relativa laser scanner e centro di prospettiva dell'immagine è possibile per prima cosa calcolare la distanza punto acquisito centro di prospettiva ed in secondo luogo prospettivizzare il punto sull'immagine (il che significa proiettarlo sul piano dell'immagine ovvero valutare la sua posizione sul piano immagine).

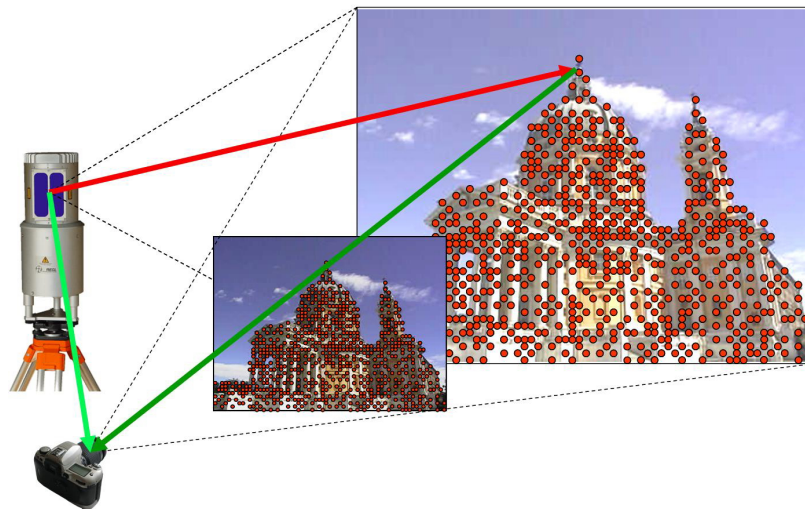


Figura 205 – Determinazione della posizione di un punto attraverso la conoscenza di una direzione e di una distanza

Se stiamo lavorando con una immagine digitale il punto tridimensionale prospettivizzato sull'immagine avrà le coordinate di un determinato pixel. Al pixel interessato sarà quindi associato il valore di distanza tra il punto stesso ed il centro di prospettiva dell'immagine. La stessa operazione viene ripetuta per tutti i punti acquisiti dal sensore.

Naturalmente la scansione laser e l'immagine devono essere realizzate da due punti di vista o di presa coincidenti o molto vicini l'un l'altro per ridurre le zone d'ombra e quelle defilate.

Come già spiegato in precedenza le immagini digitali ad alta definizione sono molto più ricche di informazioni rispetto alle scansioni laser in termini di punti acquisiti. Questo significa che dopo aver prospettivizzato tutti i punti della scansione non a tutti i pixel dell'immagine sarà associato un valore di distanza. Per associare a tutti i pixel dell'immagine digitale un va-

lore di distanza è quindi necessario procedere con una operazione di interpolazione dei valori di distanza.

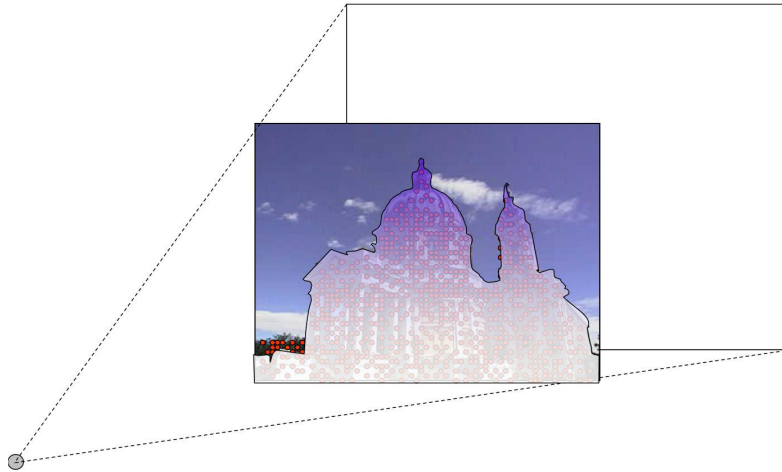


Figura 206 – Interpolazione dei valori di distanza

Alla fine della procedura di interpolazione a tutti i pixel dell'immagine sarà stato associato un valore di distanza.

Allo stesso modo, se il sensore laser utilizzato permette di acquisire per ogni punto un valore di riflettività, ad ogni pixel dell'immagine è possibile associare anche un valore di riflettività. Anche in questo caso è necessario procedere ad un'interpolazione dei dati.

L'insieme dei valori di distanza e di riflettività ottenuti attraverso l'utilizzo del DDSM associato ad una immagine digitale è stato chiamato immagine solida. L'immagine solida è un prodotto che permette di ottenere informazioni sulla posizione tridimensionale di punti da una sola immagine, senza l'ausilio di complicati sistemi di visione stereoscopici od anaglifici.



6 TELERILEVAMENTO MULTISPETTRALE

In termini strettamente disciplinari tutte le tecniche che prevedono il rilievo di proprietà fisiche di un oggetto senza un contatto diretto con l'oggetto stesso e utilizzando la registrazione delle onde elettromagnetiche emise e/o riflesse sono classificate tecniche di telerilevamento. In questo senso anche la fotogrammetria e il LIDAR rappresentano tecniche di telerilevamento in quanto si prefiggono di determinare la forma geometrica dell'oggetto utilizzando la registrazione (sotto forma di immagini digitali) delle onde elettromagnetiche comprese nello spettro del visibile o di alcune bande dell'infrarosso.

Nella letteratura specifica di settore con il termine di telerilevamento multispettrale (o più semplicemente Telerilevamento) si intendono tutte quelle tecniche che utilizzando la registrazione delle onde elettromagnetiche emesse e/o riflesse da un oggetto per determinare altre proprietà fisiche.

Il telerilevamento multispettrale (satellitare e aereo) costituisce un'importante fonte di dati, necessaria per descrivere il territorio e monitorare diversi parametri ambientali. I dati telerilevati, oggi facilmente disponibili, consentono infatti di ricavare valide informazioni qualitative relative alla superficie terrestre esaminata, oltre che informazioni di tipo geometrico. In particolare, dati satellitari con risoluzione geometrica medio-bassa e buona risoluzione spettrale, caratterizzati da frequente ripetitività temporale, vengono efficacemente applicati per la descrizione e il monitoraggio del territorio. Essi forniscono a basso costo un importante strumento di supporto per le politiche di pianificazione ambientale.

Nel seguito verranno presentati i principi del telerilevamento multispettrale, le principali caratteristiche dei dati multispettrali aerei e satellitari dedicati alle applicazioni ambientali e infine descritte le abituali procedure di trattamento per l'estrazione delle informazioni in essi contenute.

6.1 Principi

Con il termine telerilevamento si fa qui riferimento alle tecniche di rilievo della superficie terrestre tramite strumentazione posta a bordo di aerei o satelliti e non a contatto diretto con l'oggetto da rilevare.

Le caratteristiche misurate dai sensori di telerilevamento sono l'energia elettromagnetica emessa e riflessa dalla superficie terrestre. L'energia elettromagnetica generata da una opportuna sorgente raggiunge l'oggetto osservato e interagisce con esso (avvengono fenomeni di riflessione, diffusione, assorbimento o trasmissione) e di conseguenza si modifica. Tale radiazione viene infine misurata e registrata da un sensore remoto. Il risultato è solitamente immagazzinato sotto forma di immagini. Analizzando e interpretando tali misure di campo elettromagnetico è possibile risalire alle proprietà di interesse dell'oggetto.

I sensori di acquisizione sono dei sistemi ottico-elettronici in grado di rilevare la radiazione elettromagnetica diffusa o emessa dalla superficie terrestre (emersa o marina) e dall'atmosfera. In particolare rilevano radiazione solare riflessa (o meglio, diffusa) nel visibile, vicino infrarosso e infrarosso medio e radiazione emessa (emissione termica) nell'infrarosso medio, infrarosso termico e lontano o nelle microonde. Inoltre, appartiene al



dominio del telerilevamento anche la capacità di rilevare radiazione riflessa prodotta da sorgenti artificiali, ad esempio nelle microonde (è il caso dei RADAR).

Secondo la modalità dell'acquisizione, si possono suddividere i sensori disponibili in attivi e passivi. Su questi ultimi si concentrerà l'attenzione in questo capitolo. I sensori passivi dipendono da una sorgente esterna di energia. Le principali regioni o bande dello spettro elettromagnetico usate nel telerilevamento passivo sono elencate nella Tabella 30. Queste particolari regioni spettrali sono d'interesse perché ad esse corrispondono le finestre atmosferiche, cioè quelle zone dello spettro elettromagnetico attraverso le quali la radiazione solare riesce a raggiungere la superficie terrestre senza subire assorbimenti. Al di fuori di queste finestre, i vari componenti dell'atmosfera sono in grado di assorbire la radiazione. Un altro motivo d'interesse per queste parti dello spettro è legato alla natura dei sensori disponibili, che consentono di acquisire solo determinate bande spettrali.

Come si può osservare, nelle bande V, NIR e SWIR (da 0,4 μm ai 3 μm circa) la radiazione registrata dal sensore ha origine dal sole ed è stata in parte riflessa dalla superficie terrestre e in parte causata da effetti di scattering che si originano in atmosfera. Al di sopra dei 5 μm , nella banda TIR, la radiazione termica registrata viene emessa direttamente dai materiali posti sulla superficie terrestre ed è quella dominante. Poiché il fenomeno della radiazione termica emessa non dipende direttamente da una sorgente esterna come il sole, le immagini nella banda TIR possono essere acquisite anche di notte, oltre che di giorno. La banda MWIR, infine, è di transizione e in essa si fanno misurazioni della radiazione solare riflessa e della radiazione termica.

Nome	Intervallo di lunghezza d'onda	Sorgente di radiazione	Misurazione
Visibile (V)	0,4 – 0,7 μm	Solare	Radiazione solare riflessa
<i>Near InfraRed</i> (NIR)	0,7 – 1,1 μm	Solare	Radiazione solare riflessa
<i>Short Wave InfraRed</i> (SWIR)	1,1 – 1,35 μm 1,4 – 1,8 μm 2 – 2,5 μm	Solare	Radiazione solare riflessa
<i>Mid Wave InfraRed</i> (MWIR)	3 – 4 μm 4,5 – 5 μm	Solare Termica	Radiazione solare riflessa Radiazione termica emessa
<i>Thermal InfraRed</i> (TIR)	8 – 9,5 μm 10 – 14 μm	Termica	Radiazione termica emessa
Microonde, radar	1 mm – 1 m	Termica (sistemi passivi) Artificiale (sistemi attivi)	Radiazione termica emessa Rugosità

Tabella 30 - Principali regioni spettrali usate nel telerilevamento

Sensori attivi sono invece quei sensori che emettono essi stessi la radiazione che poi riceveranno riflessa dal bersaglio. Si rimanda, per la trattazione dei dati ottenuti da sensori attivi, al successivo capitolo 7 dedicato alle tecniche di telerilevamento radar.

6.2 Firme spettrali

I corpi posti sulla superficie terrestre ricevono l'energia elettromagnetica emessa dal sole: parte di tale energia viene assorbita, parte viene riflessa (radianza, $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) e parte, in alcuni casi, viene trasmessa; inoltre gli stessi corpi emettono energia precedentemente assorbita. La porzione di energia riflessa nel visibile contiene informazioni spettrali inerenti anche al colore della superficie riflettente.

La percentuale dell'energia radiante incidente che viene riflessa (riflettività ρ) da una superficie in una certa lunghezza d'onda è determinata dalla struttura geometrica delle superfici, dalla natura e dalla composizione dei corpi (influiscono, ad esempio, il contenuto di acqua di un suolo o la presenza di vegetazione). Ogni superficie interagisce in modo diverso con l'energia elettromagnetica incidente su di essa, ed è quindi caratterizzata da una specifica riflettività al variare della lunghezza d'onda, ossia da una specifica funzione di riflettività $\rho(\lambda)$. Per questo la funzione $\rho(\lambda)$ relativa ad un particolare materiale posto sulla superficie terrestre viene definita firma spettrale (*spectral signature*) di quel materiale. Tali curve di riflettanza spettrale permettono ad esempio di riconoscere ed individuare i tipi, le condizioni e le caratteristiche dei terreni, delle aree coperte da vegetazione e dei corpi idrici da cui sono state rilevate. È possibile analizzare in laboratorio, mediante uno spettroradiometro, come varia il valore della riflettività di un corpo in relazione alle lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico e tracciare la sua curva di riflettività.

Nelle Figure 207, 208 e 209 sono riportate le firme spettrali ottenute in questo modo per alcune categorie tipiche di copertura del suolo.

I fattori che producono variazioni nelle curve di riflettività spettrale possono essere statici, come la pendenza e l'esposizione del terreno, o dinamici, come lo stadio fenologico delle colture erbacee, la condizione fitosanitaria e il grado di copertura del terreno, l'umidità superficiale del suolo, la trasparenza atmosferica e la posizione del sole.

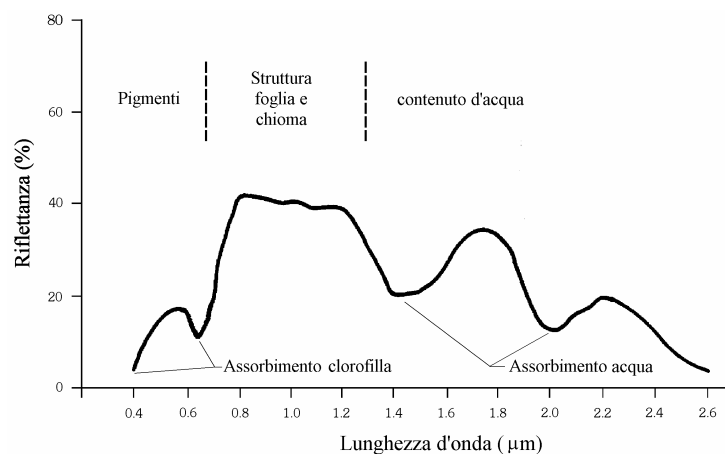


Figura 207 - Firma spettrale della vegetazione e indicazione dei principali fattori che la influenzano.

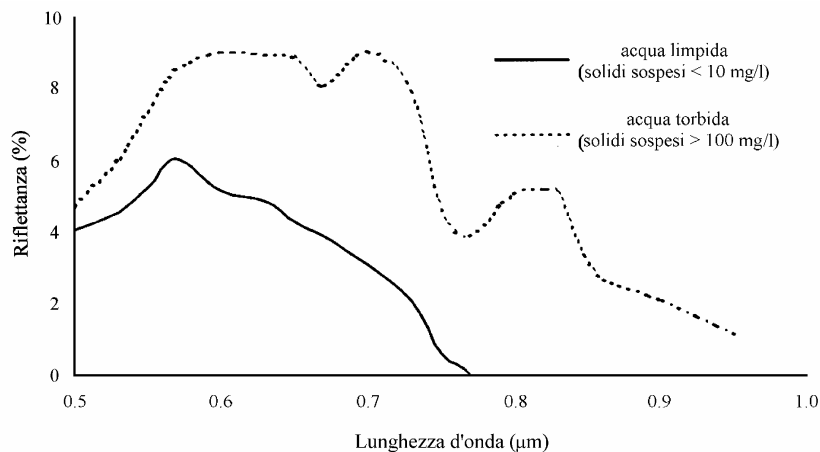


Figura 208 - Firma spettrale dell'acqua

I sensori multispettrali dedicati allo studio delle risorse terrestri misurano l'energia proveniente dalla superficie dei vari corpi presenti al suolo: scopo dell'analisi spettrale (o radiometrica) dei dati telerilevati che essi forniscono è quello di riuscire a stabilire una corrispondenza tra la quantità e la qualità dell'energia riflessa o emessa registrata e la natura dei corpi o delle superfici dalle quali tale energia proviene, a seconda delle varie lunghezze d'onda. L'utilità dell'impiego di dati telerilevati multispettrali risiede proprio nella possibilità che essi forniscono di determinare e poi utilizzare le firme spettrali degli oggetti contenuti nelle scene esaminate ai fini del loro riconoscimento.

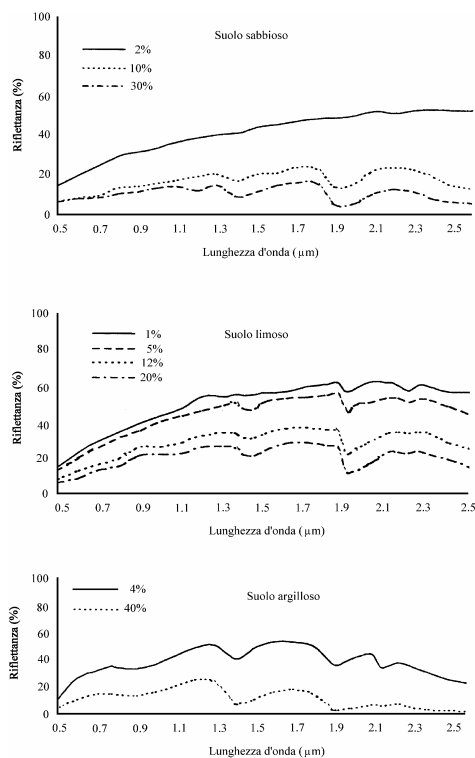


Figura 209 - Firma spettrale del suolo in funzione della sua composizione.

6.3 Tecniche di acquisizione

Si riprendono in questo paragrafo alcune definizioni già fornite nell'ambito della descrizione dei sistemi di acquisizione di immagini in ambito fotogrammetrico puntualizzando gli aspetti di più spiccato interesse per il Telerilevamento.

Un sensore è un sistema in grado di convertire la radiazione riflessa e/o emessa dagli oggetti posti sulla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole in un'immagine digitale che rappresenta la distribuzione spaziale di tale energia. I dettagli costruttivi dei sensori variano secondo le lunghezze d'onda acquisite, così come le dimensioni dei sistemi ottici dipendono da limitazioni tecniche.

Componente fondamentale di un sensore è il rivelatore fotosensibile (tecnologia CCD *Charge Coupled Device*) che trasforma il flusso radiante su esso incidente proveniente da una porzione di superficie terrestre in un segnale elettrico, che viene campionato nel tempo e quantizzato.

Un'immagine digitale telerilevata è una matrice rettangolare costituita da celle contenenti un valore numerico proporzionale all'energia proveniente da una piccola porzione della superficie terrestre. In un dato momento, infatti, ogni elemento sensibile che costituisce il sensore, osserva una piccola area della superficie terrestre lungo una data linea di scansione. Questa area a terra può essere considerata una cella dell'immagine. La variabilità del numero contenuto nelle celle che costituiscono la matrice immagine ricompono la scena osservata dal sensore.

L'angolo sotto cui viene prelevata la radiazione, denominato IFOV (*Istantaneous Field of View*), è determinato in grande misura dalla dimensione dell'elemento rivelatore w del sensore e dalla lunghezza focale f dell'ottica ($IFOV = w/f$). La radiometria associata ad ogni cella risulta una media delle radianze registrate all'interno dell'IFOV.

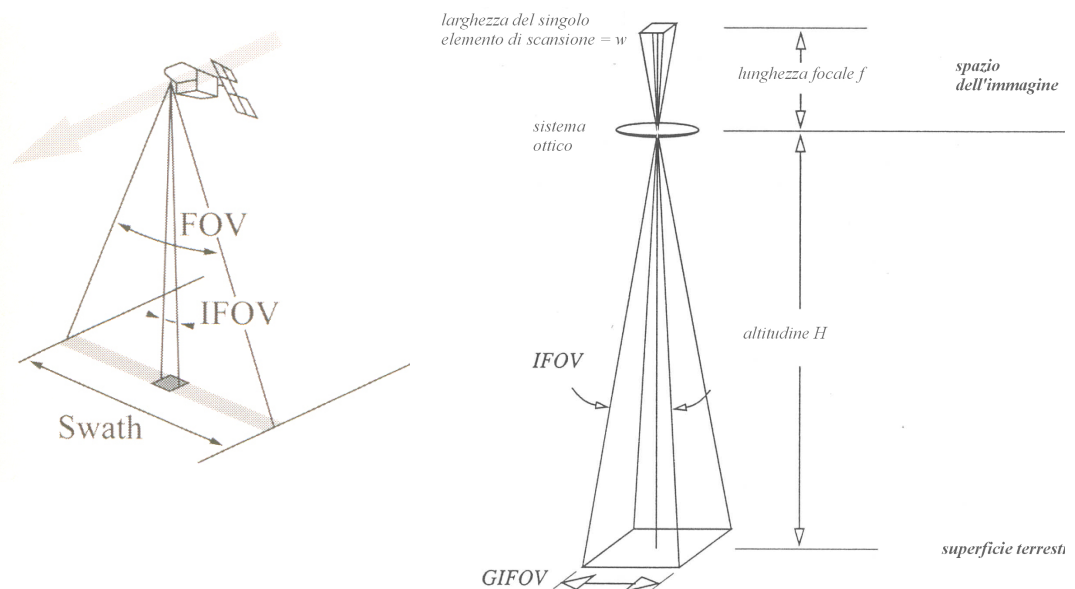


Figura 210 - Descrizione della geometria di scansione del sistema (a sinistra) e per il singolo elemento di scansione (a destra) posto all'interno di un sensore ottico (la dimensione di w e f sono state esagerate rispetto a H per maggiore chiarezza).



La matrice di celle che costituisce l'immagine digitale, è ottenuta attraverso la combinazione di una scansione nella direzione cross-track (vale a dire ortogonale al movimento della piattaforma che trasporta il sensore) e di uno spostamento della piattaforma lungo la direzione in-track (Figura 210). Il valore radiometrico contenuto in una cella è generato ogni volta che il sistema d'acquisizione campiona elettronicamente il flusso continuo dei dati fornito dalla scansione.

Qualunque sia il sistema di acquisizione è utile focalizzare quali parametri possano caratterizzare la qualità e la valenza applicativa dei prodotti finali (le immagini e le loro elaborazioni).

I parametri più utilizzati sono i seguenti:

la risoluzione geometrica rappresenta la capacità di rivelare i dettagli e può essere definita come la minima distanza di due oggetti puntiformi sulla scena che possono essere distinti sull'immagine. Essa è funzione della quota di volo, delle dimensioni del singolo elemento CCD del sensore e della focale dell'ottica del sistema;

la risoluzione radiometrica rappresenta invece la minima variazione di segnale che il sistema riesce a distinguere (ci sono vari modi di esprimerla). Essa è vincolata dal rapporto tra segnale utile proveniente dall'oggetto e le sue fluttuazioni aleatorie dovute ad esempio al rumore introdotto dal sensore;

la risoluzione spettrale è l'intervallo di frequenza (o lunghezza d'onda) a cui si riferisce la misura in ciascun canale spettrale di cui il sensore è dotato. Per osservare alcune peculiarità della firma spettrale di un oggetto occorre in alcuni casi lavorare su bande molto strette, da cui l'importanza del parametro in questione.

In base al numero di bande che il sensore può acquisire, si distinguono sistemi:

MONOSPETTRALI o pancromatici (1 sola banda);

MULTISPETTRALI (da 2 a poche decine di bande);

IPERSPETTRALI (molte decine di bande).

L'acquisizione dei dati telerilevati è vincolata alla quantità di energia radiante che il sistema deve raccogliere; ciò impedisce di migliorare contemporaneamente i parametri di risoluzione definiti. A parità di qualità della tecnologia usata, le tre risoluzioni sono legate tra loro e il miglioramento di una va sempre a discapito delle altre. In particolare, un aumento della risoluzione spettrale del sistema è sempre accompagnato da un peggioramento della risoluzione geometrica delle immagini acquisite, per effetto dell'aumento necessario delle dimensioni degli elementi CCD. D'altra parte, un sensore caratterizzato da una buona risoluzione spettrale, fornisce una risposta spettrale molto dettagliata, caratteristica che si rivela indispensabile, come si vedrà in seguito, per le applicazioni del telerilevamento finalizzate alla lettura del territorio, oggetto di questo capitolo.

In seguito verranno descritti sinteticamente alcuni dei sensori multispettrali e iperspettrali più comuni. In considerazione della geometria di scansione impiegata, i sistemi di acquisizione si classificano in due categorie fondamentali (Figura 211).

La tecnica di scansione meccanica (line scanner) prevede la presenza di uno specchio rotante o oscillante che proietta l'IFOV del rilevatore verso diverse porzioni della superficie. La superficie viene "esplorata" secondo linee ortogonali (o quasi) alla linea di volo (scansione lineare) o secondo archi di circonferenza (scansione conica). La combinazione del movimento dello specchio e della piattaforma può determinare scansioni a terra di geometria più o meno complicata.

L'energia elettromagnetica incidente sullo specchio viene inviata a un prisma che, in corrispondenza delle differenti direzioni di rifrazione, ripartisce le differenti bande spettrali ai relativi elementi sensibili del sensore.

Spesso un solo rilevatore non avrebbe tempo sufficiente per scandire una linea dell'immagine e perciò vengono allineati alcuni rilevatori lungo la direzione di volo per acquisire altrettante linee contemporaneamente (sensori a scansione meccanica di tipo *whiskbroom*). Nel rilevamento a scansione meccanica esiste una notevole distorsione geometrica insita nel meccanismo proprio di scansione e indipendente dall'assetto della piattaforma. Questo succede in particolar modo nei sensori che acquisiscono con specchi oscillanti, in quanto a velocità costante di oscillazione dello specchio del sistema non corrisponde un I-FOV costante al suolo. Dato che le immagini digitali devono presentare celle della matrice immagine di uguale dimensione lungo le righe e le colonne, l'I-FOV al suolo (non costante) viene forzato ad assumere la stessa dimensione lungo ogni singola linea di scansione e questo avviene ricampionando l'immagine ad una risoluzione geometrica media (si parla in proposito di EIFOV, *Effective Instantaneous Field of View*). I sistemi a scansione meccanica permettono di osservare zone a terra ampie (ampia "*swath*" o campo di vista) e assicurano di solito una dettagliata esplorazione dello spettro elettromagnetico, estesa sovente all'infrarosso medio e termico.

In definitiva, questi sistemi di acquisizione presentano generalmente buone risoluzioni radiometriche e spettrali, ma basse risoluzioni al suolo; questo, unito alla difficoltà di stabilire un modello prospettico che tenga conto dell'oscillazione dello specchio in contemporanea all'avanzamento della piattaforma, rende tali sistemi difficilmente utilizzabili per scopi metrici, ma efficaci per le applicazioni ambientali del telerilevamento.

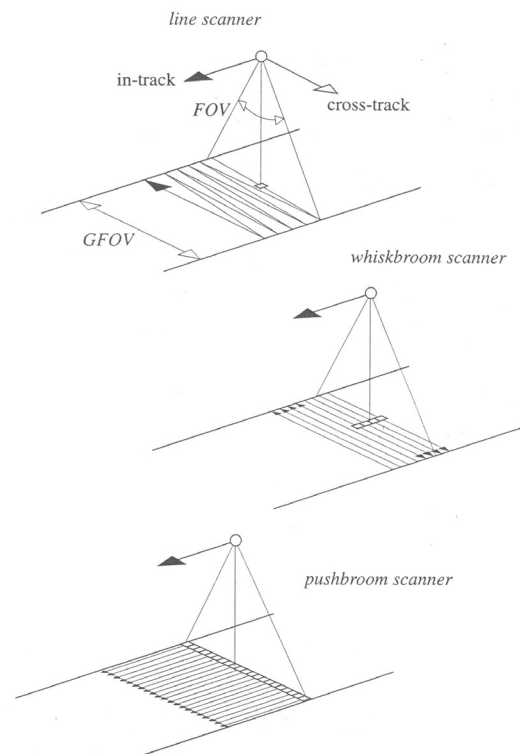


Figura 211 - Schema del principio di acquisizione delle immagini mediante scansione meccanica (line scanner e whiskbroom scanner) e pushbroom.

Nel caso dei sensori di tipo *pushbroom*, infine, un'intera linea dell'immagine, costituita da un certo numero di celle ed ortogonale alla direzione di volo, viene acquisita da altrettanti rilevatori allineati tra loro. Il movimento della piattaforma permette poi di acquisire linee successive tra loro adiacenti.

I sistemi di questo tipo assicurano le migliori risoluzioni spaziali grazie al maggior tempo che ogni rivelatore dedica a ciascuna cella e limitano le distorsioni geometriche. Questo tipo di sensori e il loro campo di applicazione, fondamentalmente legato alla fotogrammetria, sono già stati trattati nel capitolo riguardante la fotogrammetria.

6.4 Informazione contenuta nelle immagini multispettrali

I dati telerilevati sono acquisiti dai sensori sotto forma di immagini digitali memorizzate in un formato regolare a griglia (righe e colonne). Queste sono quindi insiemi di misurazioni quantitative di energia elettromagnetica. I singoli elementi della griglia, o celle, contengono le misure effettuate, immagazzinate come *Digital Number (DN)*.

Ogni cella risulta così caratterizzata da una terna di valori: numero di riga e numero di colonna che individuano la sua posizione all'interno dell'immagine digitale e **DN**, il numero indice correlato alla grandezza misurata nella porzione di superficie terrestre corrispondente (spesso si tratta della riflettività ρ , adimensionata, o della radianza spettrale al suolo, in $mW \cdot m^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$).

Un sensore multispettrale è in grado di acquisire un'immagine multispettrale, ossia formata da N differenti immagini riferite esattamente alla stessa scena della superficie terrestre: ciascuna di esse è relativa a una banda specifica dello spettro della radiazione e centrata su un valore medio di lunghezza d'onda $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$. Per ottenere immagini multispettrali vengono utilizzate opportune tecniche che consentono di separare le diverse componenti spettrali della radiazione incidente sul sensore. Vengono spesso impiegati prismi dispersivi o specchi dicroici trasparenti solo a certe bande di frequenza oppure filtri (Figura 212).

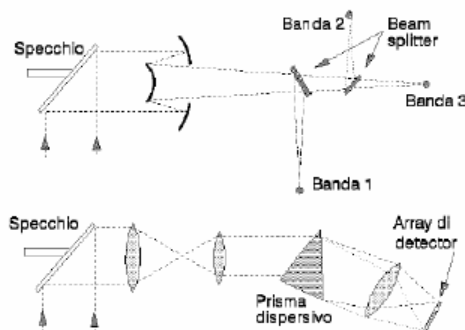


Figura 212 - Tecniche di acquisizione di dati multispettrali.

Per ciascuna cella di un'immagine multispettrale vengono quindi registrati N valori numerici, o **DN**, proporzionali alla riflettività o alla radianza della porzione di superficie terrestre ripresa, misurata in corrispondenza delle diverse bande di acquisizione del sensore.

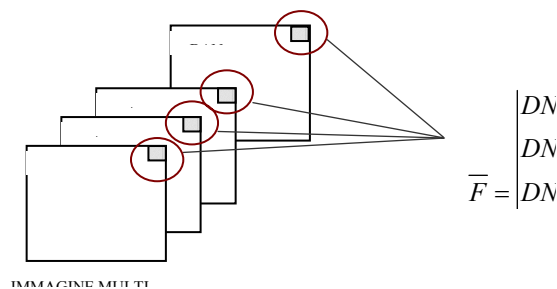


Figura 213 - Immagine multispettrale e vettore firma spettrale

L'insieme di questi valori costituisce semplicemente la firma spettrale \overline{F} di quella singola cella.

A differenza delle immagini telerilevate caratterizzate da risoluzione geometrica elevata (immagini pancromatiche), che vengono utilizzate prevalentemente per impieghi in ambito fotogrammetrico, le immagini ottenute da sensori multispettrali sono caratterizzate da una minore risoluzione geometrica, ma da una discreta risoluzione spettrale e per questo vengono impiegate con profitto in diversi campi di applicazione, tutti accomunati dalla necessità di disporre di informazioni sullo stato del territorio.

Nome	Intervallo di lunghezza d'onda	Ambito applicativo
Visibile (V)	0,4 – 0,7 μm	0.38–0.52 μm (blu): banda utilizzata per lo studio della trasparenza dell'acqua a motivo della sua penetrazione nei corpi idrici; 0.52–0.60 μm (verde): banda scelta per misurare il picco di riflessione della vegetazione alla lunghezza d'onda corrispondente al verde e per la determinazione dello stato di vigore della vegetazione stessa; 0.63–0.75 μm (rosso): banda fondamentale per la diversificazione tra le classi di vegetazione, per effetto dei diversi valori di assorbimento della clorofilla tra le specie e la sensibilità al contenuto di tannini. Sono messi in evidenza i limiti tra le zone vegetate e i suoli nudi. Il disturbo dell'atmosfera è più basso che nel resto del visibile.
Near InfraRed (NIR)	0,7 – 1,1 μm	Banda utilizzata per gli studi sulla biomassa e sulla quantità d'acqua della vegetazione; in questa regione si registrano i valori massimi di riflessione della vegetazione. Particolarmente adatta per la delimitazione delle masse d'acqua e del reticolo idrografico.
Short Wave Infra-Red (SWIR)	1,1 – 1,35 μm 1,4 – 1,8 μm 2 – 2,5 μm	1.55 – 1.75 μm : la riflessione della massa fogliare a queste lunghezze d'onda è fortemente dipendente dal suo contenuto di umidità; la banda è quindi utile per rilevare lo stress idrico della vegetazione legato alla turgidità fogliare. Utile anche alla discriminazione di suoli con diverso contenuto di umidità, condizioni di drenaggio e contenuto di sostanza organica. Risulta inoltre utile per la distinzione tra nuvole, che assorbono e appaiono scure, e il manto nevoso, che riflette e appare chiaro; 2.08 – 2.35 μm : banda scelta per la sua potenzialità nella differenziazione dei litotipi, in particolare in zone dove le rocce sono soggette ad alterazioni idrotermali.
Mid Wave InfraRed (MWIR)	3 – 4 μm 4,5 – 5 μm	Banda per studi del vapore d'acqua nel termico (questo intervallo è ancora molto influenzato dalla riflessione).
Thermal InfraRed (TIR)	8 – 9,5 μm 10 – 14 μm	Banda utilizzata per il calcolo dell'evapotraspirazione delle aree vegetate. Idonea allo studio di stress legati ad un aumento della temperatura della massa fogliare. Temperature.

Tabella 31 - Ambiti applicativi dei dati multispettrali

Esempi di comuni applicazioni sono: il monitoraggio di cambiamenti globali (comprensione dei processi ambientali su scale globali), l'analisi del rischio ambientale (valutazione del rischio di frana, valutazione del rischio di inondazioni, versamenti di idrocarburi, ecc.) e le analisi riguardanti l'uso del suolo e la pianificazione (mappatura delle diverse coperture del suolo, analisi dei pattern evolutivi del territorio attraverso l'utilizzo di serie storiche, analisi dei cambiamenti del territorio, ecc.).

In Tabella 31 sono evidenziati i principali campi di impiego dei dati acquisiti nelle diverse bande utilizzate nel telerilevamento passivo multispettrale.

Lo scopo dell'elaborazione e dell'utilizzo di immagini multispettrali telerilevate è la conoscenza del territorio. Il processo di deduzione di informazioni a partire da immagini telerilevate multispettrali genera sovente, come risultato finale dell'applicazione di opportune tecniche di trattamento ed elaborazione dei dati a disposizione (operazioni di fotointerpretazione e/o di classificazione), un'immagine tematica del territorio esaminato. Il prodotto finale che spesso si ottiene è cioè una cartografia tematica dell'area di interesse, che mostra la distribuzione spaziale di alcune caratteristiche della superficie terrestre considerate rilevanti ai fini di una particolare applicazione. Le carte tematiche più comuni descrivono la natura e i caratteri fisici del territorio (per esempio, ci sono carte che indicano le diverse coperture del suolo più o meno semplificate, fornendo così una generale o dettagliata descrizione di un'area) oppure analizzano fenomeni legati alla presenza antropica quali, ad esempio, la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, l'uso reale del suolo, ecc.

6.5 Elaborazione dei dati multispettrali

Generalmente lo schema tipico seguito per l'estrazione di informazioni (s'intende qui la produzione di cartografia tematica) da immagini multispettrali telerilevate prevede le fasi rappresentate dal diagramma di flusso in Figura 214.

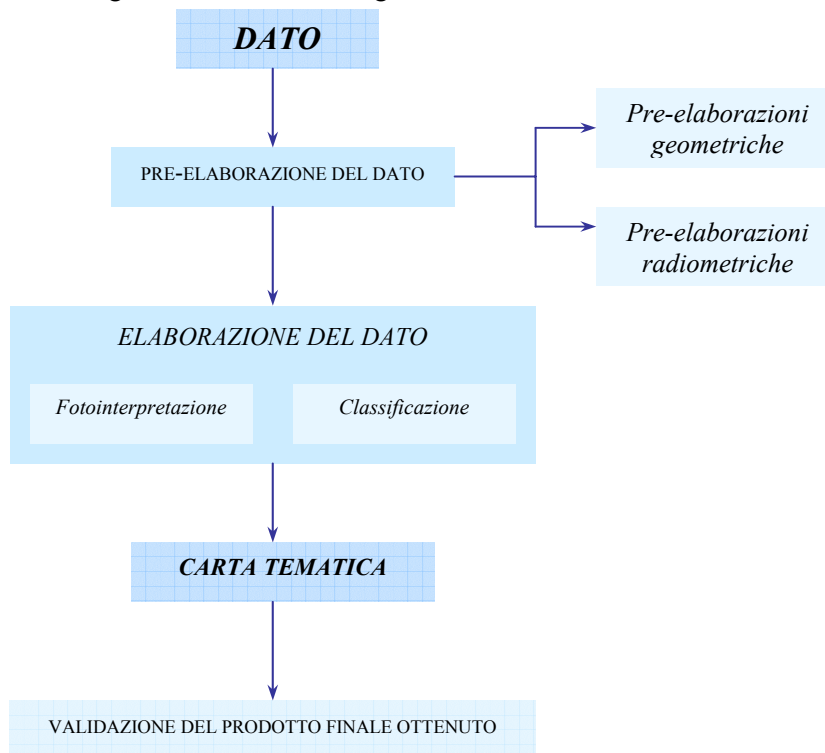


Figura 214 - Fasi dell'elaborazione delle immagini multispettrali

Le particolarità dei dati esaminati richiedono lo svolgimento di alcune operazioni di pre-processamento affinché questi risultino idonei a subire i trattamenti specificatamente dedicati all'estrazione delle informazioni. Tali trattamenti possono consistere in operazioni di fotointerpretazione o, più frequentemente, in operazioni di classificazione.

6.5.1 Pre-elaborazioni

I dati raccolti dai sensori necessitano, prima del loro utilizzo nelle applicazioni, di una serie di correzioni volte a eliminare o limitare i disturbi e le distorsioni introdotte durante l'acquisizione e la trasmissione dei dati. Questa fase di pre-elaborazione comprende due classi principali di correzioni: quelle che interessano il contenuto geometrico delle immagini e quelle che interessano il loro contenuto radiometrico. Verranno nel seguito descritte soltanto queste ultime, che risultano fondamentali per la corretta interpretazione del contenuto spettrale dei dati telerilevati.

6.5.1.1 Correzioni radiometriche

Servono a calibrare i sensori, eliminare gli errori dovuti al loro cattivo funzionamento e a ridurre l'influenza dello strato di atmosfera interposto tra sensore e superficie terrestre.

Di solito consistono in:

- calibrazione radiometrica;
- equalizzazione del sensore (*destriping*);
- ripristino di linee e pixel mancanti;
- correzione atmosferica.

6.5.1.2 Calibrazione

I dati telerilevati vengono generalmente forniti all'utenza in valori di **DN**, ossia in valori numerici proporzionali alla radiazione proveniente dalle superfici, oggetto del telerilevamento. Durante l'acquisizione, il sensore traduce, infatti, l'energia elettromagnetica incidente in formato digitale (**DN**) attraverso un processo caratterizzato da specifici parametri, tipici di ogni sensore.

È sempre necessario, prima di ogni elaborazione, effettuare preventivamente un'operazione di correzione radiometrica del dato satellitare, chiamata calibrazione. Questa correzione, che prevede la conoscenza dei parametri relativi al sensore in esame, permette di convertire i **DN** presenti nell'immagine nei valori di radianza originari registrati dal sensore. La funzione lineare utilizzata per la calibrazione in valori di radianza è del tipo:

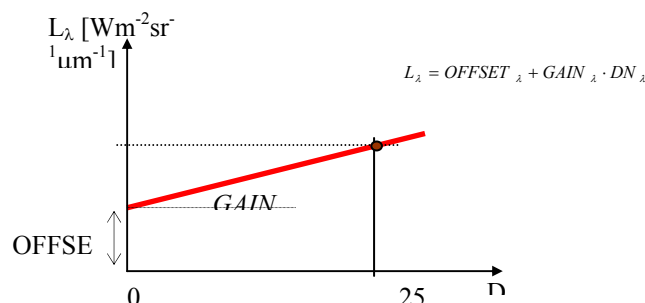


Figura 215 - Curva di calibrazione del sensore

I parametri da impiegare per la correzione sono differenti per i dati acquisiti nelle diverse bande di uno stesso sistema di acquisizione; la loro applicazione ai dati originali comporta, quindi, una sensibile modifica delle firme spettrali.

6.5.1.3 *Correzione atmosferica*

Per un corretto utilizzo dei dati telerilevati è necessario tenere in considerazione la presenza dell'atmosfera e dei suoi effetti sulla propagazione del segnale elettromagnetico schematizzati in Figura 216.

I gas atmosferici, gli aerosol ed i vapori contribuiscono ad assorbire, diffondere e rifrangere la radiazione solare diretta e riflessa dalla superficie terrestre, interferendo con la corretta stima delle caratteristiche dell'onda che porta informazione sull'oggetto osservato. L'influenza dell'atmosfera si esercita in due modi distinti: lo strato atmosferico agisce come barriera che, per fenomeni di assorbimento, smorza la propagazione dell'energia elettromagnetica e, a causa di fenomeni di diffusione (scattering), agisce come sorgente fittizia.

Esistono due tipi di diffusione: la diffusione di Mie, causata da particelle atmosferiche aventi diametro maggiore della lunghezza d'onda della radiazione, come per esempio il vapor d'acqua o la polvere, e la diffusione di Rayleigh o selettiva, il cui contributo tende a diminuire con l'aumentare della lunghezza d'onda della radiazione, producendo valori trascurabili già nell'infrarosso vicino. Questo tipo di diffusione è naturale, avviene sempre, anche in condizioni di cielo sereno e ha come effetto quello di distorcere i valori osservati dal sensore in modo dipendente dalla lunghezza d'onda del segnale rilevato.

In definitiva, l'energia misurata dal sensore e registrata nelle immagini che l'utente si trova a elaborare non coincide esattamente con la riflettività delle superfici terrestri osservate, ma contiene termini non trascurabili di disturbo dovuti agli effetti atmosferici.

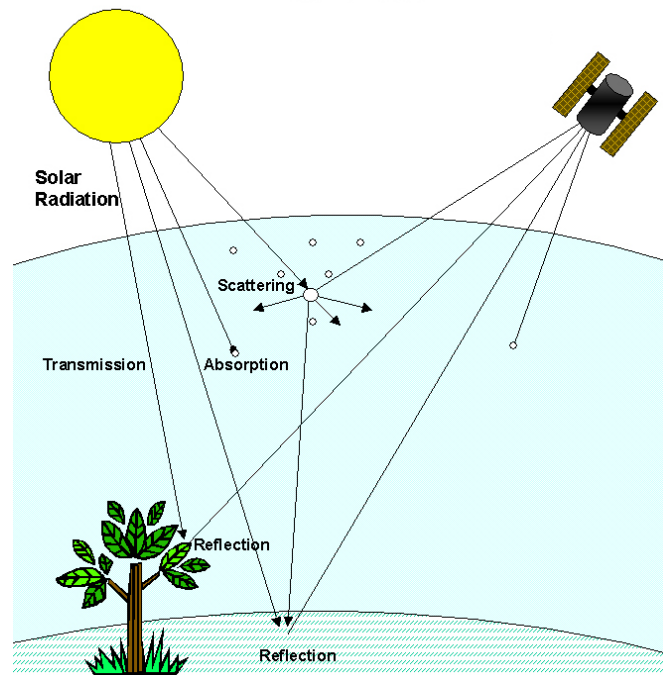


Figura 216 - Effetto dell'atmosfera sulla propagazione del segnale.

Per la riduzione degli effetti del disturbo atmosferico e per la determinazione dei valori corretti di riflettività degli oggetti, vengono eseguite apposite procedure di correzione radiome-

trica delle immagini. In generale, si tratta di risolvere la seguente equazione che consente di ricavare la riflettanza spettrale della superficie terrestre a livello del suolo:

$$\rho_s = \frac{E_{r\lambda}}{E_{i\lambda}} = \frac{k\pi L_{s\lambda}}{E_{g\lambda} \times \cos \theta_z} \quad (77)$$

in cui:

$L_{s\lambda}$ è la radianza a livello della superficie [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{r}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$]

$E_{g\lambda}$ è l'irradianza solare a livello della superficie [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$]

θ_z è l'angolo zenitale del Sole

k è un fattore che tiene conto del cambiamento della distanza Terra-Sole, dovuta all'eccentricità dell'orbita terrestre

Si risale alla radianza $L_{s\lambda}$ e all'irradianza $E_{g\lambda}$ a livello della superficie modellando il trasporto della radiazione solare attraverso l'atmosfera. I parametri significativi sono la trasmittanza (trasparenza) e la radianza dell'atmosfera. Entrambi questi parametri danno contributi parassiti alla radianza al sensore, il primo negativo ed il secondo positivo.

Per fare questo tipo di correzioni si possono seguire diverse procedure, in funzione della disponibilità di dati sulle caratteristiche dell'atmosfera all'epoca di acquisizione dell'immagine. Le metodologie più accurate (metodi rigorosi) sono quelle che ricorrono a modelli estesi all'intera colonna atmosferica e che, per essere calibrati, necessitano di alcuni dati sulle condizioni atmosferiche (temperatura dell'aria, umidità, visibilità, ecc.). Tra questi modelli, i più conosciuti sono i codici 6S, Lowtran e Modtran, che forniscono valori accurati della trasmittanza e della radianza atmosferica per calcolare $L_{s\lambda}$ ed $E_{g\lambda}$.

La difficoltà nella stima dei dati atmosferici e la natura approssimata dei modelli ad essi collegati portano ad adottare un approccio semplificato nel calcolo delle correzioni atmosferiche. Le metodologie semplificate di correzione sono volte alla determinazione e all'abbattimento unicamente della componente diffusiva del disturbo atmosferico sulla base di informazioni estratte dalle stesse immagini. Si tratta di metodi meno accurati, ma comunque molto diffusi in quanto non necessitano di dati sulle condizioni atmosferiche al tempo di acquisizione dell'immagine. Tra questi metodi, il più conosciuto è senz'altro quello denominato *Dark Subtraction*. In questo caso la correzione consiste nell'identificare il valore minimo in ogni banda dell'immagine e quindi nel sottrarre tale errore sistematico da tutti i **DN** delle celle, in modo da ottenere i valori corretti. Tale tecnica è basata sulla formulazione di tre ipotesi fondamentali: si assume che zone in ombra della superficie terrestre rilevata non debbano riflettere e che se riflettono tale valore sia da ascrivere unicamente agli effetti di scattering atmosferico e si ipotizza infine che le zone d'ombra coincidano con le zone dell'immagine in cui si registra il minimo di riflessione in ciascun banda.

Le firme spettrali ricavate dalle osservazioni del sensore corrette dagli effetti atmosferici sono idonee al loro impiego nelle operazioni di riconoscimento degli oggetti posti sulla superficie terrestre.

6.5.2 Fotointerpretazione delle immagini

Un approccio immediato, impiegato per l'estrazione di informazioni dalle immagini telerilevate, richiede la presenza della figura dell'operatore esperto, o fotointerprete, capace di derivare tali informazioni soltanto attraverso un'analisi visiva dell'immagine.

In questo caso, il fotointerprete deve essere in grado di localizzare ed identificare le caratteristiche necessarie alla corretta lettura del territorio utilizzando al meglio gli elementi spaziali, spettrali e temporali presenti all'interno dell'immagine. Proprietà spaziali delle immagini so-

no ad esempio forma, orientamento, dimensione e tessitura. Questo approccio è chiamato fotointerpretazione.

Le immagini possono essere visualizzate usando scale di grigi, ma molto più utile si rivela l'analisi delle immagini a colori o sintesi additive.

Una sintesi additiva è generata attraverso l'associazione di tre diverse immagini, ognuna delle quali acquisita in una differente banda spettrale, ai tre canali RGB della rappresentazione a video. Quando si ha a che fare con immagini multibanda ogni combinazione di tre bande può essere usata come ingresso per i canali RGB (Figura 217).

Le sintesi additive possono essere:

- a colori reali: quando ai canali RGB si riferiscono bande con lunghezze d'onda centrali vicine a quelle del rosso, del verde e del blu rispettivamente;
- a falsi colori: sono tutte le altre sintesi possibili. Una scelta abbastanza comune consiste nel collegare i canali RGB alle bande del vicino infrarosso, del rosso e del verde rispettivamente.

Ciascun operatore può comunque procedere alla costruzione di sintesi additive a lui più consono; ciò nonostante si è dimostrato che per studi vegetazionali la sintesi proposta è la migliore per l'occhio umano per discernere le variazioni di vegetazione in quanto esso distingue meglio diverse gradazioni di rosso rispetto a diverse gradazioni di altri colori.

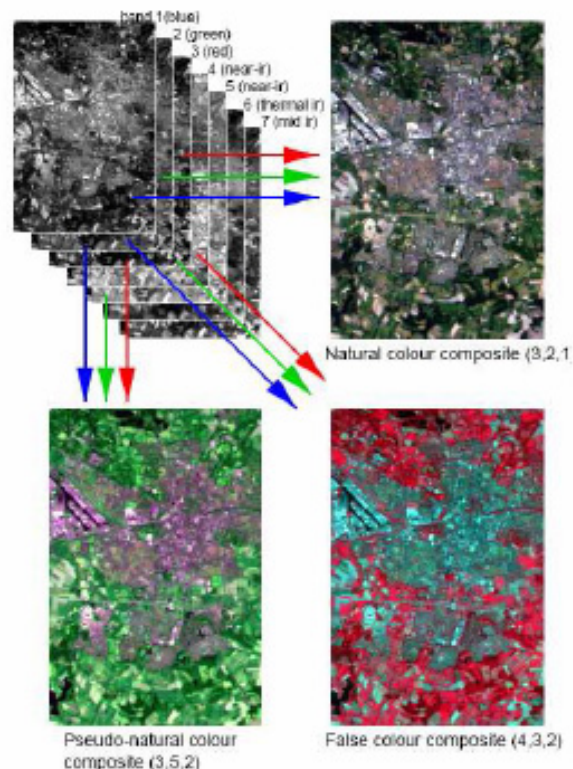


Figura 217 - Diverse composizioni delle bande di un'immagine multispettrale Landsat.

A seconda delle applicazioni, si possono usare diverse sintesi additive costituite da varie combinazioni di bande delle immagini multispettrali a disposizione, con l'intento di evidenziare al meglio le caratteristiche del territorio che risultano interessanti.

L'analisi delle immagini telerilevate condotta attraverso la fotointerpretazione, è utile per ottenere una valutazione complessiva delle proprietà geometriche delle immagini e della presenza dei diversi tipi di coperture del suolo, ma presenta due svantaggi. Ricorrendo a questa tecnica si possono infatti tenere in considerazione al massimo tre bande spettrali alla volta e,



inoltre, risulta praticamente impossibile realizzare applicazioni a livello delle singole celle, se non nel caso di aree piuttosto ristrette.

Al contrario, il ricorso a operazioni di classificazione delle immagini digitali permette, tramite l'uso di un computer, di lavorare a livello della singola cella e, soprattutto, di tenere conto dell'intero contenuto spettrale dei dati esaminati e della loro risoluzione radiometrica.

6.5.3 Classificazione delle immagini

Una classificazione è una operazione con la quale è possibile assegnare alle varie celle di un'immagine, sulla base del loro comportamento spettrale, una "etichetta" che indica l'appartenenza ad una determinata classe tematica, scelta tra un insieme predefinito per la specifica applicazione. Questo processo è implementato da un computer al quale vengono indicate in anticipo le proprietà che caratterizzano le varie classi da riconoscere nel processo di classificazione.

Attraverso questa tecnica è possibile distinguere all'interno delle immagini telerilevate aree della superficie terrestre che hanno caratteristiche fisiche simili attraverso il raggruppamento delle celle aventi il medesimo comportamento spettrale. Poiché, come visto, la riflettività delle diverse superfici nelle varie lunghezze d'onda dipende dalle loro caratteristiche specifiche, analizzando i valori delle celle nelle immagini multispettrali è possibile ricondurre ciascuna di esse, sulla base della firma spettrale che la caratterizza, ad una specifica superficie. La grandezza considerata nelle operazioni di classificazione è perciò la variabile multidimensionale, di dimensione pari al numero N delle bande dell'immagine multispettrale considerata, costituita dal vettore firma spettrale di ogni singola cella.

6.5.3.1 Spazio delle bande e firme spettrali

In un processo di classificazione si procede all'assegnazione delle celle da classificare alle varie classi tematiche considerate sulla base della firma spettrale (calibrata e corretta) che ciascuna di esse presenta e sulla base dei risultati ottenuti nella verifica di opportuni controlli di similarità scelti dall'utente. Per una migliore comprensione viene introdotta la nozione di spazio delle bande spettrali.

Come già osservato, ad ogni cella di un'immagine multispettrale è associata una serie di DN, uno per ogni banda spettrale a disposizione (la sua firma spettrale). Per rappresentare questa serie di misure, viene utilizzato uno spazio cartesiano multidimensionale, detto spazio multispettrale, in cui ogni asse rappresenta una delle bande spettrali dell'immagine. Ogni cella dell'immagine viene identificata in questo spazio da un punto, le cui coordinate sono i DN della cella, registrati nelle varie bande dell'immagine. Il suo vettore posizione è quindi il vettore firma spettrale \bar{F} già definito.

Tutte le celle di un'immagine possono venire rappresentate nello spazio delle bande scelte. Diversi tipi di superfici o coperture del suolo vengono identificati e separati in funzione della regione dello spazio multispettrale occupata dalle loro celle. Per le celle appartenenti ad una determinata classe tematica i processi radiativi determinano, infatti, osservazioni tra loro simili. Tuttavia, a causa delle inevitabili differenze tra elementi di una medesima classe ed a causa delle fluttuazioni e degli errori strumentali, l'osservazione \bar{F} , per la classe, varia aleatoriamente intorno ad un valore medio. Evidentemente la separabilità tra le classi tematiche cresce quanto più sono diversi i valori medi e quanto più piccole sono le varianze delle distribuzioni intorno a tali valori medi.

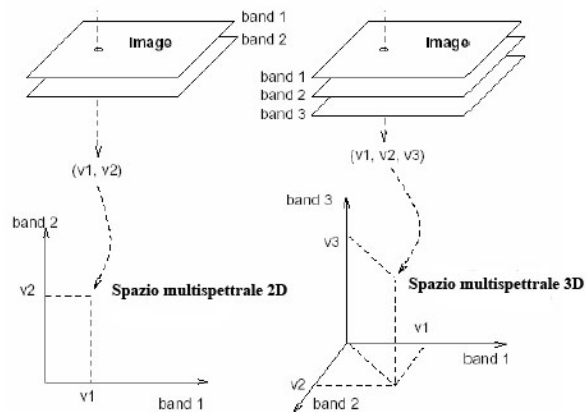


Figura 218 - Spazio multispettrale bi e tri-dimensionale.

Nella Figura 219 che segue viene proposta l'identificazione, nello spazio multispettrale a 2 dimensioni, di due gruppi di celle (detti anche *cluster*) relativi a due diverse classi tematiche.

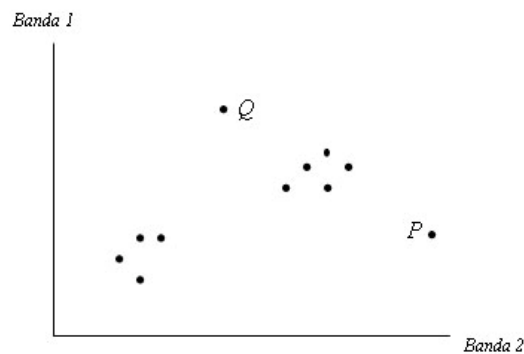


Figura 219 - Spazio multispettrale bidimensionale: sono distinguibili due gruppi distinti sulla base dei loro valori nelle due bande; i punti P e Q rappresentano, invece, due oggetti che non sembrano appartenere a nessuno dei due gruppi definiti.

Si osserva quindi che:

- la posizione di ciascuna classe nello spazio multispettrale è definita dal vettore dei DN medi della classe, calcolati per le diverse bande a disposizione. Tale vettore definisce la posizione del punto baricentrico o centroide della classe;
- la densità e la compattezza delle classi possono essere definite a partire dalla distanza media di ciascun punto rispetto al centroide della classe;
- il grado di separazione delle varie classi può essere definito come la distanza tra i centroidi delle varie classi.

6.5.3.2 Processo di classificazione e categorie di classificatori

Definita la posizione dei *cluster* delle classi tematiche di interesse nello spazio multispettrale scelto, ogni altra cella dell'immagine può poi essere classificata in base alla sua posizione in tale spazio, secondo opportuni criteri di vicinanza/appartenenza alle aree corrispondenti ai differenti *cluster* identificati. Ciò che caratterizza i diversi metodi di classificazione esistenti è la definizione del criterio di vicinanza/appartenenza (radiometrica) adottato e il modo in cui le regioni dello spazio multispettrale sono assegnate alle diverse classi di interesse.

Lo strumento software che realizza una classificazione è detto classificatore. Un classificatore è da considerarsi genericamente un modello matematico che, una volta ne siano stati sti-

mati i parametri, realizza la corrispondenza tra firma spettrale della singola cella e classe tematica di assegnazione.

È possibile suddividere i classificatori esistenti secondo vari criteri (vedi Figura 220).

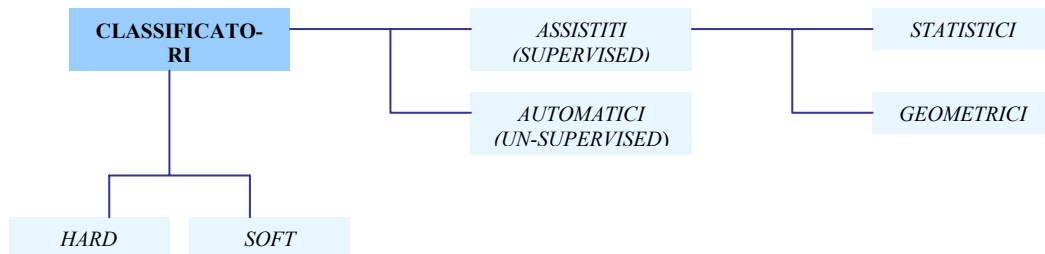


Figura 220 - Tipi di classificatori

6.5.3.3 Classificatori assistiti

Il ricorso a questo tipo di classificatori è condizionato dalla necessità di avere a disposizione informazioni riguardanti il territorio oggetto di studio. Nel caso dei classificatori assistiti i parametri di funzionamento del modello sono, infatti, stimati sulla base di campioni di addestramento che l'operatore deve preventivamente collezionare sulla scena e fornire al classificatore. Tali campioni sono costituiti da più insiemi di celle dell'immagine (training areas). Ciascuno di questi insiemi comprende un certo numero di celle che si possono ritenere con certezza rappresentative di una data classe di copertura del suolo; dai **DN** in esso contenuti verrà valutata la firma spettrale caratteristica della classe, cioè verrà definita l'area dello spazio multispettrale che essa occupa. I campioni formano il nucleo di aggregazione per la classificazione delle celle dell'immagine rimanenti.

I campioni possono essere collezionati direttamente sulla scena analizzata (via software) oppure, nel modo che sarebbe quello auspicabile e rigoroso, attraverso mirate campagne di misura al suolo (con strumentazione topografica tradizionale o GPS). L'identificazione delle aree campione costituisce sempre un fattore critico per il successo della classificazione per vari motivi. Le celle campione estratte devono essere in numero sufficiente per ogni classe e la loro assegnazione non deve essere ambigua. Ciò richiede una valutazione delle aree omogenee dell'immagine, per evitare la presenza di celle miste e, se il caso, per localizzare correttamente le celle sul terreno. È richiesta inoltre la verifica della significatività dei campioni definiti, ossia la verifica della loro capacità di caratterizzare radiometricamente le classi. Generalmente un campione è ritenuto significativo se la dispersione dei suoi valori attorno al valor medio (centroide nello spazio multispettrale) è contenuta.

Un classificatore assistito assegna le celle dell'immagine alle varie classi di interesse in base alla loro somiglianza (estesa a tutte le bande a disposizione) con le celle campione identificate dall'utente. Diverse misure di similarità (misure di vicinanza/appartenenza nello spazio multispettrale) generano specifici algoritmi di classificazione assistita, che differiscono fra loro per semplicità computazionale ed efficacia. In base ai criteri impiegati per la definizione della distanza nello spazio multispettrale, o in modo equivalente, per la definizione dei confini fra le regioni corrispondenti alle particolari classi di interesse, si possono distinguere metodi di classificazione assistita statistici e geometrici.

Classificatori geometrici comunemente impiegati sono:

il classificatore **MINIMA DISTANZA** (con e senza soglia);

il classificatore **PARALLELEPIPEDO**.

Il primo è basato sul calcolo di distanze euclidee, nello spazio multispettrale, tra il punto che rappresenta la singola cella da classificare in tale spazio e i centroidi delle distribuzioni o



cluster delle diverse classi tematiche definite dall'utente. Il criterio impiegato per l'assegnazione delle celle alle classi è in questo caso la minima distanza radiometrica. L'algoritmo prevede inoltre la possibilità di assegnare aree di accettabilità nello spazio multispettrale al fine di accertare che le celle classificate non si trovino troppo lontane dal centroide di assegnazione. Di solito, a questo fine, viene definita per ogni classe una soglia in termini di multipli del suo vettore delle deviazioni standard, stimato a partire dai dati campione forniti dall'utente.

Nel caso del classificatore Parallelepipedo vengono definiti degli iper-parallelepipedi nello spazio delle bande, con centri coincidenti con i centroidi delle distribuzioni delle diverse classi e estensione definita in termini di multipli del vettore delle deviazioni standard di ciascuna classe. Una cella viene assegnata ad una certa classe se, nello spazio delle bande, ricade all'interno del parallelepipedo di pertinenza. Entrambi questi classificatori, molto semplici, sono poco robusti e non sempre forniscono risultati efficaci.

Più utilizzato è invece il classificatore **SPECTRAL ANGLE MAPPER (SAM)**, anch'esso geometrico.

Si tratta di un classificatore spettrale che impiega un angolo n-dimensionale per confrontare le celle da classificare con degli spettri di riflettività di riferimento. In questo caso si confronta l'angolo tra il vettore relativo allo spettro di riferimento e il vettore di ogni cella in uno spazio n-dimensionale. Angoli piccoli corrispondono a punti più vicini allo spettro di riferimento. Le celle che superano un valore di soglia specificato per l'angolo massimo (in radianti) non vengono classificate. Gli spettri usati dal classificatore SAM possono provenire da file ASCII, da librerie spettrali, o possono essere estratti dall'utente direttamente dalle immagini

Questa tecnica, se usata su dati di riflettanza calibrati, è relativamente insensibile agli effetti dovuti all'illuminazione.

Un altro classificatore piuttosto diffuso ed efficace è il classificatore statistico **MAXIMUM LIKELIHOOD** (Massima Verosimiglianza, **ML**). Il processo di classificazione avviene, in questo caso, secondo criteri probabilistici e non geometrici. Ipotizzando per ogni classe tematica di interesse una distribuzione normale multivariata (gaussiana n-dimensionale, con n = numero di bande dell'immagine), si procede al calcolo dei due parametri vettoriali del modello (media e deviazione standard) per ogni classe rappresentata dai campioni forniti dall'utente. Questi sono necessari per descrivere analiticamente la distribuzione normale di ogni classe. La conoscenza di queste distribuzioni permette di stimare, per ciascuna cella da classificare, la probabilità di assegnazione ad ognuna delle classi considerate. La classe di assegnazione risulta quella cui compete la probabilità più elevata.

6.5.3.4 *Classificatori automatici*

I classificatori automatici utilizzano informazioni intrinseche ai dati (immagini) per raggruppare le celle in gruppi o *cluster* omogenei per firma spettrale. Questi classificatori non richiedono quindi la disponibilità di informazioni esterne o l'estrazione di campioni per l'assegnazione delle celle alle diverse classi tematiche. Non richiedono inoltre di conoscere a priori né la natura delle classi né il loro numero esatto.

In tale situazione l'unico approccio possibile è quello di formare *cluster* di celle in base a un criterio di prossimità reciproca. L'obiettivo della "clusterizzazione" consiste nella definizione di un numero (ignoto a priori) di gruppi, in modo che essi risultino internamente compatti e reciprocamente disgiunti. Tale obiettivo può essere raggiunto con diversi livelli di difficoltà e di successo, in base alla posizione delle celle dell'immagine. Se la loro densità nello spazio multispettrale non è omogenea e presenta zone di massimo, i *cluster* possono facilmente essere costruiti in prossimità dei punti di massima densità locale; se viceversa la loro

densità è pressoché costante, la “clusterizzazione” può essere condotta unicamente secondo un principio più o meno arbitrario di separazione dello spazio multispettrale in sottoregioni.

Il riconoscimento del tipo di classe tematica corrispondente a ognuno dei *cluster* identificati durante il processo di classificazione automatica richiede infine un'analisi sul campo, condotta per campioni di celle rappresentative. Questo approccio alla classificazione è per sua natura legato a metodi di tipo iterativo e prevede comunque, per l'operatore, la possibilità di definire preliminarmente alcuni parametri. I più comuni classificatori appartenenti a questa categoria sono l'**ISODATA** e il **K-MEANS**. Tutti i classificatori di cui si è parlato rientrano nella categoria di classificatori hard in quanto realizzano una classificazione univoca tale per cui ad ogni cella compete una ed una sola classe di assegnazione. I classificatori soft realizzano invece una classificazione di tipo *fuzzy* tale per cui, per ogni cella, è data la sua probabilità di appartenenza ad ogni classe. Il risultato di tali classificazioni, facilmente convertibili in un risultato di tipo hard, è un insieme di immagini tematiche (una per ogni classe) ognuna delle quali è costituita da **DN** che rappresentano la probabilità della cella di appartenere alla classe cui l'immagine si riferisce.

6.5.3.5 *Problematiche connesse alla classificazione*

L'efficacia di una classificazione è basata sulla effettiva possibilità di distinguere differenti tipi di materiali unicamente sulla base delle differenze che essi presentano nelle loro firme spettrali. In pratica, se le classi non presentano insiemi ben distinti nello spazio delle bande, la classificazione non fornisce risultati attendibili. Nella realtà non sempre è possibile una caratterizzazione spettrale netta delle superfici considerate per diversi fattori:

la firma spettrale di una superficie non può essere determinata in termini assoluti a partire dalle immagini satellitari: ciò per due ragioni. Innanzitutto, una tipologia di copertura del suolo (o classe tematica) difficilmente può essere univocamente definita in quanto, a sua volta, include tipologie simili ma differenti di materiali, caratterizzati da firma spettrale simile, ma non identica. Inoltre, anche riuscendo a definire classi costituite da un singolo tipo di materiale, permangono variazioni interne di firma spettrale, spesso dovute alla coesistenza di diversi stadi e stati del medesimo materiale. Quanto detto è causa della variazione osservabile della firma spettrale tra celle che vengono considerate appartenenti alla medesima classe. Infine, va osservata la presenza, nelle immagini, di celle miste (*mixed pixel*) con firma spettrale complessa, poiché media di firme relative a due o più classi. Si osservi che la percentuale di celle miste riscontrabile all'interno delle immagini è legata alla variabilità spaziale delle classi, che diminuisce al crescere della risoluzione geometrica delle immagini considerate. Per questo è necessario, in ogni specifica applicazione, usare dati con risoluzione spaziale appropriata;

gli attuali sensori multispettrali impiegano solo un numero limitato di bande dello spettro elettromagnetico. A partire dalle immagini da essi ottenute non è quindi possibile ricavare una firma spettrale completa, ma solo una sua versione discreta. Per ottenere firme spettrali che maggiormente approssimino delle funzioni continue (come sono le firme ottenute in laboratorio) è necessario ricorrere a sistemi che garantiscano un numero sufficientemente ampio di bande di acquisizione (sistemi iperspettrali), arrivando a coprire senza interruzioni tutte le parti dello spettro elettromagnetico significative per gli scopi della classificazione.

6.5.3.6 *Verifica dei risultati*

L'ultima fase del processo di estrazione di informazioni dai dati telerilevati consiste nel controllo dei risultati di classificazione ottenuti e nella loro validazione. Tale fase è necessaria per garantire che il prodotto finale elaborato, in genere una carta tematica, soddisfi i requisiti imposti dall'utente. Il risultato del processo di classificazione è un'immagine, geometrica-

mente uguale a quella originale impiegata, che contiene in ogni sua cella l'indice numerico che indica l'appartenenza di tale cella ad una determinata classe. Da questa immagine è possibile valutare l'estensione delle aree che appartengono alle diverse classi di interesse.

Come detto, è necessario inoltre valutare il grado di errore prodotto dal processo di classificazione. Le celle che sono state riconosciute in maniera non corretta rappresentano i possibili errori della classificazione.

Si può procedere alla valutazione dei risultati su due livelli:

quello che stabilisce se l'addestramento del classificatore risulta buono e quindi in grado di generalizzare. In questo caso viene considerata la prestazione di classificazione sull'insieme delle celle che costituiscono i campioni forniti dall'utente. E' cioè valutato come le celle assegnate in fase di addestramento ai campioni siano poi state classificate nella fase di applicazione del modello addestrato;

quello che stabilisce se le classi definite ed identificate sulla scena hanno una reale rispondenza al suolo. Si verifica, ad esempio, che ciò che è stato riconosciuto come "bosco" sia effettivamente "bosco". Questo livello prevede l'effettuazione di campagne di verità al suolo.

Il metodo più utilizzato per rappresentare il grado d'accuratezza di una classificazione è la costruzione della matrice di confusione (o matrice d'errore). Si tratta di una matrice $K \times K$, se K è il numero di classi, costruita, nel caso più semplice, facendo riferimento alle celle che costituiscono le aree campione estratte per il processo di classificazione. La Tabella 32 che segue mostra l'aspetto di una di queste matrici, relativa ad un caso generico, con $K=3$. Gli elementi della i -esima colonna della matrice forniscono il numero delle celle campione che appartengono alla classe i e che sono state assegnate alle classi da 1 a K dalla procedura di classificazione. Gli elementi posti lungo la diagonale forniscono il numero delle celle appartenenti all'area campione della classe i che sono state assegnate, durante la classificazione, a tale classe, cioè contiene il numero delle celle classificate correttamente. Gli altri elementi della i -esima colonna contengono quindi il numero delle celle campione che non sono state riconosciute correttamente.

Campioni	Campione 1	Campione 2	Campione 3	Totali
Classificazione				
Non classificato	nc1	nc2	nc3	$m = \sum nc_i$
Classe 1	a11	a12	a13	$m_1 = \sum a_{1i}$
Classe 2	a21	a22	a23	$m_2 = \sum a_{2i}$
Classe 3	a31	a32	a33	$m_3 = \sum a_{3i}$
Totali	$n_1 = \sum a_{i1}$	$n_2 = \sum a_{i2}$	$n_3 = \sum a_{i3}$	Ntot

Tabella 32 - Matrice di confusione per un caso generico di classificazione in 3 classi . (Ntot = numero complessivo di celle appartenenti ai campioni forniti per la classificazione).

Dalla matrice di confusione così costruita è possibile ottenere informazioni riguardo la natura degli errori compiuti, per una data classe, dal processo di classificazione. Innanzitutto, se il metodo di classificazione scelto permette l'assegnazione di un indice particolare (di solito '0') alle celle che al termine del processo risultano non classificate, allora il numero di queste celle può rappresentare un'indicazione riguardo alla significatività delle celle campione delle varie classi utilizzate per la classificazione. Un alto numero di celle non classificate può infatti far pensare che i campioni estratti effettivamente non rappresentino adeguatamente il comportamento delle classi esaminate.

Si definiscono inoltre:

Overall accuracy	$\frac{\sum_{i=1}^3 a_{ii}}{N_{tot}}$	indica quante celle dei campioni complessivamente sono state correttamente assegnate;
Class accuracy	$\frac{a_{ii}}{n_i}$	indica quante celle del campione i-esimo sono state correttamente assegnate alla classe i-esima;
Class commission	$\frac{\sum_{j=1, j \neq i}^3 a_{ij}}{m_i}$	indica quante celle di altri campioni diversi da quello i-esimo sono state assegnate alla classe i-esima;
Class omission	$\frac{\sum_{j=1, j \neq i}^3 a_{ji} +}{n_i}$	indica quante celle del campione i-esimo sono state assegnate ad altre classi o nel non-classificato

A volte viene anche utilizzata un'altra misura per sintetizzare i valori contenuti nella matrice di confusione. Si tratta di un coefficiente, detto **K**, che si calcola nella seguente maniera:

$$K = \frac{N_{tot} \sum_{i=1}^3 a_{ii} - \sum_{i=1}^3 a_{+i} a_{i+}}{N_{tot}^2 - \sum_{i=1}^3 a_{+i} a_{i+}} \quad (78)$$

dove a_{ii} sono gli elementi della diagonale della matrice di confusione, mentre a_{+i} , a_{-i} indicano, rispettivamente, la somma della riga i e la somma della colonna j della stessa matrice. N_{tot} è il numero totale delle celle utilizzato per la costruzione della matrice.

Si osservi che i risultati forniti dalla matrice di confusione dipendono dai dati utilizzati come riferimento per costruirla. Nel caso presentato, in cui la matrice d'errore è stata costruita facendo riferimento ai campioni impiegati per la classificazione, essa consente di determinare la bontà degli stessi campioni e la loro separabilità nello spazio delle bande.

Come già anticipato, affinché l'accuratezza stimata attraverso la definizione di questa matrice possa essere utilizzata come indice di qualità globale della classificazione, qualità che dipende dai riconoscimenti che questa comporta in tutte le aree dell'immagine in esame, è necessario impiegare dati provenienti da campionamenti "in situ" e relativi a campagne di verità al suolo. La scelta degli elementi di controllo dovrebbe essere effettuata in modo casuale, ma la difficoltà nel riportare a terra la giusta posizione degli elementi stessi, impone di sceglierli in posizioni facilmente rintracciabili (per esempio vicino a punti facilmente distinguibili sulla carta tematica prodotta e nella realtà); inoltre, questi punti devono essere scelti per tutte le classi indagate ed in numero statisticamente accettabile.

L'accuratezza ottenuta, che ovviamente dipende dai tematismi creati e dalla zona indagata, non dovrebbe mai scendere sotto il 70% ($K > 0.70$); se ciò non fosse si può intervenire ridefinendo le firme spettrali delle classi per cui l'accuratezza è risultata inferiore a tale soglia, in una procedura iterativa che prevede ri-classificazioni successive.

6.6 Elaborazione di dati iperspettrali

I sensori multispettrali in grado di acquisire dati con risoluzione spettrale dell'ordine delle decine e centinaia di bande vengono definiti iperspettrali. L'elevata risoluzione spettrale che caratterizza tali sensori garantisce una registrazione dettagliata della firma spettrale di ciascuna cella dell'immagine acquisita, pur con le distorsioni dovute agli effetti di assorbimento e diffusione atmosferica. La differenza principale che caratterizza un sensore iperspettrale

rispetto ad uno multispettrale non è tanto nella tecnologia del sensore, ma piuttosto nei metodi impiegati per il processamento dei dati che esso fornisce. Le immagini iperspettrali richiedono il ricorso a specifiche tecniche di analisi finalizzate alla riduzione dei dati (*data reduction*) e all'estrazione di informazione.

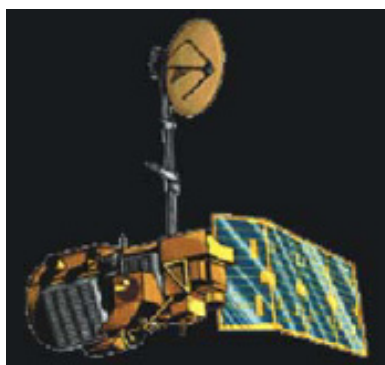
Non vengono qui approfondite tali tecniche, per le quali si rimanda alla bibliografia di settore, tuttavia si riportano alcune considerazioni inerenti il problema della classificazione delle immagini telerilevate iperspettrali. Il problema della classificazione di queste immagini richiede, infatti, un approccio diverso da quello precedentemente proposto: in questo caso i metodi di classificazione più frequentemente utilizzati consistono in una operazione di confronto dei valori delle firme osservate per le celle da classificare con una libreria di firme spettrali. Si noti inoltre che è anche possibile adottare un approccio di classificazione assistita del tipo precedentemente descritto: il classificatore assistito **SAM** è stato infatti originariamente sviluppato proprio per il trattamento dei dati multispettrali. Tuttavia l'impiego degli altri classificatori assistiti proposti, seppure possibile in linea di principio, si rivela spesso inefficace.

Per quanto riguarda la tecnica di acquisizione, si osservi come la maggior parte dei sensori iperspettrali sia alloggiata su aereo, anche se esistono sensori iperspettrali per satellite. Alcuni di questi sistemi saranno presentati nel paragrafo successivo. Il principale svantaggio è costituito dal loro costo, poiché l'utilizzo dei dati rimane ristretto a un numero limitato di utenti; viceversa i dati ottenuti da satellite sono indirizzati a una comunità di utenti diffusa nel mondo ed eterogenea. Un altro svantaggio, di natura tecnica, è legato alla presenza di distorsioni delle immagini acquisite, dovuta all'instabilità della piattaforma durante il volo. Inoltre, per ottenere uno *swath* ragionevole alle quote di volo relativamente basse di un aereo, è necessario che i sensori siano caratterizzati da un **IFOV** molto elevato: ciò implica un fenomeno di dilatazione delle celle lontane dalla direzione nadirale. La risoluzione spaziale dipende dall'**IFOV**, fissato, e dalla quota di volo, variabile. Quote di volo più basse permettono di ottenere celle più di piccole dimensioni e quindi maggiore risoluzione spaziale; però, nel contempo, implicano valori minori per lo **swath** e quindi missioni di volo più lunghe, ovvero costi maggiori, per coprire la stessa area.

D'altra parte, il vantaggio delle acquisizioni con sensore aviotrasportato consiste nella possibilità di produrre dati che si adattano bene a esigenze specifiche, consentendo con facilità il reperimento di informazioni ad elevata risoluzione temporale riguardanti eventi improvvisi.

6.7 Principali sistemi multi e iperspettrali

6.7.1 Landsat 5-7



Satellite	Launched	Decommissioned	Sensors
Landsat 1	July 23, 1972	January 6, 1978	MSS/RBV
Landsat 2	January 22, 1975	February 25, 1982	MSS/RBV
Landsat 3	March 5, 1978	March 31, 1983	MSS/TM
Landsat 4	July 16, 1982	June 15, 2001	MSS/TM
Landsat 5	March 1, 1984	Operational	MSS/TM
Landsat 6	October 5, 1993	Did not achieve orbit	ETM
Landsat 7	April 15, 1999	Operational	ETM+

Figura 221 - Dati caratteristici delle missioni LANDSAT

La serie Landsat ha segnato la storia del telerilevamento, soprattutto nel campo del monitoraggio ambientale e degli studi relativi alla superficie terrestre.

Il progetto Landsat nasce da un'iniziativa congiunta dell'U.S. Geological Survey (USGS) e della NASA. Quest'ultima ha sviluppato e lanciato i satelliti, mentre l'USGS si occupa della gestione di tutte le operazioni riguardanti l'acquisizione dei dati, il loro trattamento, l'archiviazione e la distribuzione.

Attualmente sono in orbita quasi polare eliosincrona i satelliti 5 e 7.

La piattaforma Landsat 5 trasporta due sensori: il MSS (Multispectral Scanner) e il TM (Thematic Mapper). Le acquisizioni del sensore MSS sono state sospese nel 1992.

	Landsat 5	λ (μm)	Risoluzione (m)
Thematic Mapper (TM)	Band 1	0.45-0.52	30
	Band 2	0.52-0.60	30
	Band 3	0.63-0.69	30
	Band 4	0.76-0.90	30
	Band 5	1.55-1.75	30
	Band 6	10.40-12.50	120
	Band 7	2.08-2.35	30

Tabella 33 - Caratteristiche principali del sensore TM di LANDSAT

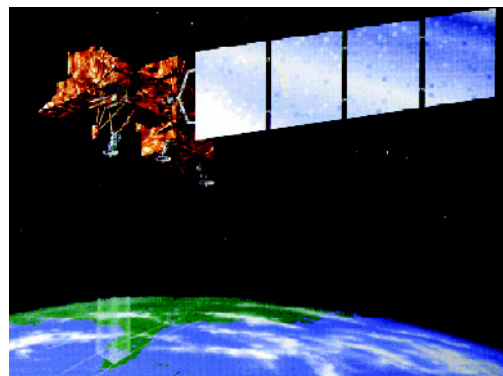


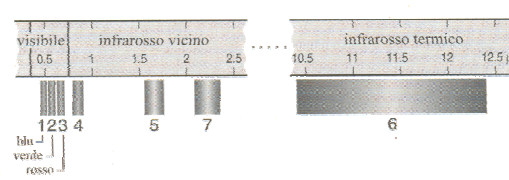
Figura 222 - Sensore ETM+ di LANDSAT 7

Il sensore TM è un sensore multispettrale in grado di registrare immagini in 7 bande nel visibile, nel NIR e SWIR e nell'infrarosso termico. La risoluzione geometrica dei dati acquisiti è pari a 30 m per le bande 1÷5 e 7 e 120 m per la banda 6 (ricampionata a 30 m). Il TM è un *whiskbroom scanner* a specchio oscillante dotato di più rilevatori per banda (16 per le bande V, NIR e SWIR; 4 per il TIR). I dati acquisiti hanno *swath* pari a 185 km.

Il sensore ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper +*) è un sensore multispettrale montato a bordo della piattaforma satellitare Landsat 7. Dal 31 maggio 2003 non è più in funzione lo *Scan Line Corrector* (SLC) del Landsat 7 e per questo motivo dal 14 luglio 2003 l'ETM+ acquisisce in modalità "SLC-off".

L'ETM+ estende le capacità di acquisizione del TM: è stata infatti aggiunta una banda di acquisizione pancromatica (banda 8) con risoluzione geometrica di 15 m e la risoluzione geometrica del canale TIR è stata elevata a 60 m. La piattaforma è stata inoltre dotata di un sistema di calibrazione a bordo.

Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	λ (μm)	Risoluzione (m)
	Band 1	0.45-0.52	30
	Band 2	0.53-0.61	30
	Band 3	0.63-0.69	30
	Band 4	0.78-0.90	30
	Band 5	1.55-1.75	30
	Band 6	10.40-12.50	60
	Band 7	2.09-2.35	30
	Band 8	0.52-0.90	15



The diagram shows the spectral response of the ETM+ sensor. It is divided into three regions: 'visibile' (0.4-0.7 μm), 'infrarosso vicino' (0.7-2.5 μm), and 'infrarosso termico' (10.4-12.5 μm). Bands 1, 2, 3, 4, 5, and 7 are located in the visible and near-infrared regions. Band 6 is in the thermal infrared region. Band 8 is in the near-infrared region. The diagram also shows the spectral response of the human eye, with 'blu', 'verde', and 'rosso' labels.

Tabella 34 - Caratteristiche principali del sensore ETM+ di LANDSAT 7

Il sistema Landsat 7 acquisisce dati in accordo con il sistema globale *World Wide Reference System 2*, che suddivide la superficie terrestre in 57784 scene, di estensione ciascuna pari a 183 km x 170 km. Questo sistema globale, definito per i dati Landsat, consente all'utente di ricercare i dati satellitari relativi alla porzione del globo desiderata in maniera semplice, specificando il centro della scena (*nominal scene center*) attraverso la definizione di **PATH** e **ROW**.



Figura 223 - Centri delle scene di LANDSAT

Le immagini acquisite sono distribuite direttamente dalle stazioni a terra, tra cui quella italiana di Fucino, da altri distributori ufficiali come *Eurimage*, *ImageNet*, *USGS Earth Explorer*, altrimenti è possibile scegliere on line la scena da acquistare, attraverso il portale *Observing System Data Gateway* (EOS DG). Nella Tabella 35 sono sintetizzate le principali caratteristiche delle piattaforme satellitari Landsat 5 e 7.



	LANDSAT 5	LANDSAT 7
Altitudine dell'orbita	705 km	705 km
Orbita	Polare eliosincrona (inclinazione 98.2°)	Polare eliosincrona (inclinazione 98.2°)
Sensore	MSS non attivo TM operativo (7 bande)	ETM+ in modalità "SLC-off" (7 bande)
Swath (nadir)	185 km	185 km
Dimensione scena	185 km x 170 km	185 km x 170 km
Risoluzione geometrica pancromatico	-	15 m
Risoluzione geometrica mutispettrale	30 m (120 m TIR)	30 m (60 m TIR)
Risoluzione radiometrica	8 bit per pixel	8 bit per pixel
Angolo max di off-nadir		
Periodo di rivisitazione	16 giorni	16 giorni
Produttore	NASA - USGS	NASA - USGS

Tabella 35 - Caratteristiche principali di LANDSAT 5 e 7

6.7.2 Terra ASTER

Questo sistema è già stato descritto in precedenza. In questa sede si riportano soltanto le specifiche inerenti i canali di acquisizione che caratterizzano i tre telescopi che compongono il sistema di acquisizione:

	Terra/Aqua	λ (μm)	Risoluzione (m)
Aster VNIR	Band 1	0.52-0.60 Nadir looking	15
	Band 2	0.63-0.69 Nadir looking	15
	Band 3	0.76-0.86 Nadir looking	15
	Band 3	0.76-0.86 Backward looking	15
Aster SWIR	Band 4	1.600-1.700	30
	Band 5	2.145-2.185	30
	Band 6	2.185-2.225	30
	Band 7	2.235-2.285	30
	Band 8	2.295-2.365	30
	Band 9	2.360-2.430	30
Aster TIR	Band 10	8.125-8.475	90
	Band 11	8.475-8.825	90
	Band 12	8.925-9.275	90
	Band 13	10.25-10.95	90
	Band 14	10.95-11.65	90

Tabella 36 - Canali di Acquisizione di Terra ASTER

6.7.3 SPOT 5

Anche questo sistema è già stato descritto in dettaglio nel capitolo riguardante la fotogrammetria. In questa sede si riportano soltanto le specifiche inerenti i canali di acquisizione che caratterizzano i sensori trasportati:

	SPOT-5	λ (μm)	Risoluzione (m)
High Resolution Stereo- scopic (HRS)	PA-1	0.49-0.69	5 (onboard) 2.5-3 m (supermode)
	PA-2	0.49-0.69	5 (onboard) 2.5-3 m (supermode)
High Resolution Geome- tric (HRG)	Band 1	0.49-0.61	10
	Band 2	0.61-0.68	10
	Band 3	0.78-0.89	10
	Band 4	1.58-1.75	10
Vegetation	Band 0	0.43-0.47	1.15 km (nadir)

Tabella 37 - Canali di acquisizione di SPOT 5

6.7.4 FORMOSAT-2

Si riportano in questa sede soltanto le specifiche inerenti i canali di acquisizione che caratterizzano il sensore RSI (*Remote Sensing Instrument*) montato a bordo della piattaforma.

	Formosat-2	λ (μm)	Risoluzione (m)
<i>Remote Sen- sing Instru- ment (RSI)</i>	Band 1	0.45-0.52	8
	Band 2	0.52-0.60	8
	Band 3	0.63-0.69	8
	Band 4	0.76-0.90	8
	Band 5	0.45-0.90	2

Tabella 38 - Canali di acquisizione di FORMOSAT 2

6.7.5 SISTEMA EO-1



Il satellite EO-1, di proprietà della NASA, è stato lanciato il 21 novembre 2000 con l'intento di realizzare una missione dimostrativa della durata complessiva di 1 anno (*EO-1 Technology Mission*). La piattaforma, in orbita polare eliosincrona (705 km di altitudine), montava a bordo tre sensori: l'*Advanced Land Imager (ALI)*, l'*Hyperion* e il *Linear Etalon Imaging Spectrometer Array (LEISA) Atmospheric Corrector (LAC)*.

Lo scopo principale del sensore ALI era di validare e testare nuove tecnologie che sarebbero poi state impiegate per consentire il miglioramento delle future missioni Landsat. L'*Hyperion* costituiva invece uno strumento iperspettrale satellitare da impiegarsi per una migliore descrizione delle caratteristiche della superficie terrestre. Al termine della missione, conclusasi nel novembre

del 2001, la comunità scientifica ha espresso un tale interesse nei confronti dei dati forniti dai sensori ALI e Hyperion, che si è pensato di prolungare la missione. Nel dicembre del 2001 un accordo tra la NASA e l'USGS (U.S. *Geological Survey*) ha sancito il proseguimento della missione, tuttora operativa (EO-1 *Extended Mission*), terminando però le acquisizioni del sensore LEISA.

6.7.5.1 *Advanced Land Imager (ALI)*

L'ALI è uno strumento in grado di fornire dati multispettrali e pancromatici comparabili a quelli forniti dall'ETM+. Il sensore acquisisce, oltre che in alcune bande del tutto simili a quelle Landsat, anche in tre bande addizionali che coprono gli intervalli 0.433-0.453, 0.845-0.890, e 1.20-1.30 μm . Lo strumento non acquisisce nel TIR. I dati multispettrali acquisiti hanno una risoluzione geometrica pari a 30 m, mentre quelli pancromatici pari a 10 m.



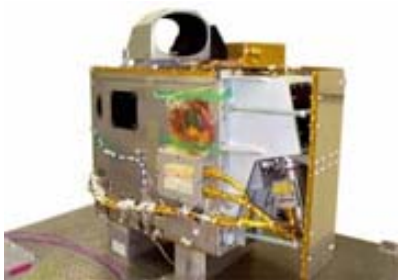
La tecnica di scansione è di tipo *pushbroom*. Lo *swath* è pari a 37 km, mentre la dimensione della scena in direzione *along-track* è variabile (solitamente è pari a 42 o 185 km).

Advanced Land Imager (ALI)	Earth Observing-1	λ (μm)	Risoluzione (m)
	Band 1	0.48-0.69	10
	Band 2	0.433-0.453	30
	Band 3	0.45-0.515	30
	Band 4	0.525-0.605	30
	Band 5	0.63-0.69	30
	Band 6	0.775-0.805	30
	Band 7	0.845-0.89	30
	Band 8	1.2-1.3	30
	Band 9	1.55-1.75	30
	Band 10	2.08-2.35	30

Tabella 39 - Canali di acquisizione di EO-1

I prodotti ALI distribuiti dall'USGS EROS Data Center (EDC) sono di due tipi: dati radiometricamente corretti (Level 1R) e dati radiometricamente e geometricamente corretti e georeferiti (Level 1Gs). Il formato dei dati è l'HDF o il GeoTIFF.

6.7.5.2 *Hyperion*



Si tratta del primo strumento iperspettrale civile montato a bordo di una piattaforma satellitare.

Hyperion acquisisce dati in 242 bande spettrali (da 0.4 a 2.5 μm) con risoluzione geometrica pari a 30 m. I dati sono acquisiti da due sensori di tipo *pushbroom* separati (VNIR e SWIR). Ogni scena fornita dal sistema si estende all'incirca per 7.7 km in direzione *cross-track* e 42 o 185 km in direzione *along-track*.



	Earth Observing-1	λ (μm)
Hyperion VNIR	1 - 7	356 - 417nm
	8 - 55	426 - 895 nm
	56 - 57	913 - 926 nm
	58 - 70	936 - 1058 nm
Hyperion SWIR	71 - 76	852 - 902 nm
	77 - 78	912 - 923 nm
	79 - 224	933 - 2396 nm
	225 - 242	2406 - 2578 nm

Tabella 40 - Canali di acquisizione Hyperion

I dati sono distribuiti dall'USGS EROS Data Center (EDC) radiometricamente corretti (Level 1R). I dati Hyperion forniti contengono 242 bande, delle quali 44 non sono calibrate. Il formato dei dati è l'HDF.

Nella tabella che segue sono sintetizzate e messe a confronto le caratteristiche degli attuali sensori NASA che acquisiscono nelle bande V/NIR/SWIR/MWIR/TIR attualmente disponibili per studi ambientali.

Spacecraft/Instrument	Landsat-7 / ETM+	EO-1/ALI	Terra/ASTER	EO-1/Hyperion
Spectral Range	0.4-2.4 10.7-12.7 microns	0.4-2.4 microns	0.5-0.9 1.6-2.4 8.1-11.7 microns	0.4-2.5 microns
Panchromatic Bands	1	1	0	0
Visible Bands	3	6	2	35
Near Infrared Bands	1	2	2 (stereo)	35
Short Wave Infrared	1	1	1	172
Middle Infrared Bands	1	1	5	0
Thermal Band	1	0	5	0
Spatial Resolution	15, 30, 60 m	10, 30 m	15, 30, 60 m	30 m
Swath Width	185 km	37 km	60 km	7.5 km
Spectral Coverage	Discrete	Discrete	Discrete	Continuous
Pan Band Resolution	15 m	10 m	N/A	N/A
Stereo	no	no	yes	no
Number of Bands	7	10	14	220
Number of Spacecraft	1	1	1	1
Temporal Resolution	16 days (8 days with Landsat-5)	16 days	16 days	200 days
Source: NASA EO-1 briefing materials				

Tabella 41 - Caratteristiche dei sensori NASA per applicazioni ambientali

6.7.6 ROSIS e DAIS

Si tratta di due sensori progettati per essere trasportati su aereo e sviluppati in collaborazione dal *Dornier Satellite System* (DSS), dal *GKSS Research Centre* e dal Centro Aerospaziale Tedesco (DLR, *Institute of Optoelectronics*).

6.7.6.1 Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS 7915)

Il sensore iperspettrale aviotrasportato DAIS 7915 (79 bande, 15 bit) copre con quattro spettrometri la gamma spettrale che si estende dal visibile alle lunghezze d'onda dell'infrarosso



termico. La risoluzione spaziale dei dati acquisiti è variabile dai 3 m ai 20 m, secondo l'altezza di volo del velivolo.

Il sensore DAIS 7915 viene usato dal 1995 per applicazioni legate al monitoraggio ambientale degli ecosistemi terrestri e marini. Sei canali di acquisizione sono stati studiati apposta per lo studio della temperatura e dell'emissività degli oggetti posti sulla superficie terrestre.

La scansione è di tipo meccanico, a specchio rotante.

Spettrometro	Numero bande	Intervallo ampiezza (nm)	Ampiezza bande (nm)
I	32	400-1000	15-30
II	8	1500-1800	45
III	32	2000-2500	20
	1	3000-5000	2.0
IV	6	8000-12600	0.9
IFOV: 3.3 mrad GIFOV: dipendente dall'altezza di volo (5-20 m) Pixel per linea: 512			

Tabella 42 - Caratteristiche DAIS 7915

6.7.6.2 *Reflective Optics System Imaging Spectrometer (ROSIS)*

Il sensore ROSIS è adatto principalmente allo studio delle acque costiere. Questo ne ha condizionato la scelta del range spettrale di ampiezza delle bande. La risoluzione geometrica arriva sino ad 1 m a terra.

Questo sistema può operare in due modalità distinte secondo le necessità dell'utente: *imaging mode* e *spectral mode*.

Nella prima modalità vengono registrati dati acquisiti in 32 bande spettrali, comprese tra 450 e 480 nm con risoluzione geometrica, per quota di volo di 10 m, pari a 5.6 m. Vengono inoltre acquisiti 500 pixel per linea di scansione. Questa modalità viene utilizzata soprattutto per applicazioni finalizzate alla produzione di classificazioni del territorio.

Nella seconda modalità vengono registrati dati acquisiti in 84 bande spettrali, mentre il numero di pixel in direzione cross-track è ridotto a 167.

I dati necessari alla correzione geometrica delle distorsioni legate alle instabilità della piattaforma aerea vengono registrati direttamente insieme alle immagini.

<i>Reflective Optics System Imaging Spectrometer (ROSIS)</i>	Sistema	pushbroom
	FOV	16°
	IFOV 2.)	0.56 mrad
	Max. scan frequency	88 Hz
	Rilevatori	500 (imaging mode)
	Range spettrale	430 - 850 nm
	Max. numero di canali (imaging mode)	32
	Max. numero di canali (spectral mode)	84
	Risoluzione radiometrica	14 bit

Tabella 43 - Caratteristiche del sensore ROSIS

Con una quota di volo di 10 km la risoluzione geometrica è pari a 5.6 m. Lo *swath* è pari a 2.8 km..

6.7.7 Lo scanner iperspettrale MIVIS

Viene riservato un capitolo specifico a parte per il dato MIVIS in quanto la RAVA dispone di un volo a copertura regionale. Si ritiene pertanto utile definirne le caratteristiche e le problematiche connesse in modo approfondito.

6.7.7.1 Il sensore

Di proprietà del CNR-LARA (Laboratorio Aereo per Riprese Ambientali) e costruito in unico esemplare dalla società americana *Deadalus Enterprise* (oggi *SenSyTech*), lo scanner iperspettrale MIVIS (*Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer*) è uno strumento modulare costituito da quattro spettrometri che misurano simultaneamente la radiazione elettromagnetica proveniente dalla superficie terrestre nel visibile (20 bande tra 0.43 μm e 0.83 μm), nell'infrarosso vicino (8 bande tra 1.15 μm e 1.55 μm), nell'infrarosso medio (64 bande tra 2.00 μm e 2.50 μm) e nell'infrarosso termico (10 bande tra 8.20 μm e 12.70 μm), per un totale di 102 bande spettrali (vedi Tabella 1 e Tabella 2 per un elenco dettagliato di tutte le 102 bande).

La grandezza fisica misurata dai primi tre spettrometri è la radianza al livello del sensore, mentre la quantità misurata dal quarto spettrometro (infrarosso termico) è la temperatura al sensore ottenuta per interpolazione lineare tra le temperature di due corpi neri di riferimento (-15° C e +45° C).

SPETTROMETRO	REGIONE DELLO SPETTRO	NUMERO BANDE	INTERVALLO SPETTRALE (μm)	AMPIEZZA BANDE* (μm)
1	visibile	20	0.431 ÷ 0.833	0.020
2	infrarosso vicino	8	1.15 ÷ 1.55	0.05
3	infrarosso medio	64	1.985 ÷ 2.479	0.009
4	infrarosso termico	10	8.21 ÷ 12.70	0.35

Tabella 44 - I quattro spettrometri del MIVIS e loro caratteristiche (fonte: CNR-LARA).

* non costante per tutte le bande del singolo spettrometro (vedi Tabella 45).

Le bande spettrali sono state scelte per soddisfare le necessità della ricerca per applicazioni avanzate in discipline scientifiche coinvolte in studi di telerilevamento ambientale, come l'agronomia, l'archeologia, la botanica, la geologia, l'idrologia, l'oceanografia, la pedologia, le scienze atmosferiche, l'urbanistica ed altre.



Figura 224 - Dettaglio della copertura spettrale dei 4 spettrometri del sensore MIVIS (fonte: CNR-LARA).

La ripresa simultanea di un alto numero di canali con un'elevata risoluzione spettrale e spaziale ha richiesto l'utilizzo di una tecnologia molto avanzata per le ottiche, i sensori, il processamento elettronico e la registrazione di una grande quantità di dati.

La combinazione di un'alta risoluzione nella regione spettrale dell'infrarosso medio con una buona sensibilità nella regione dell'infrarosso termico ha richiesto la soluzione di diversi problemi in fase di progettazione dell'intero sistema. La soluzione adottata è stata quella di un sistema ottico a scansione meccanica (*whiskbroom*) con un sensore per ogni banda spettrale che utilizza un *Field Stop* comune per tutti i canali.

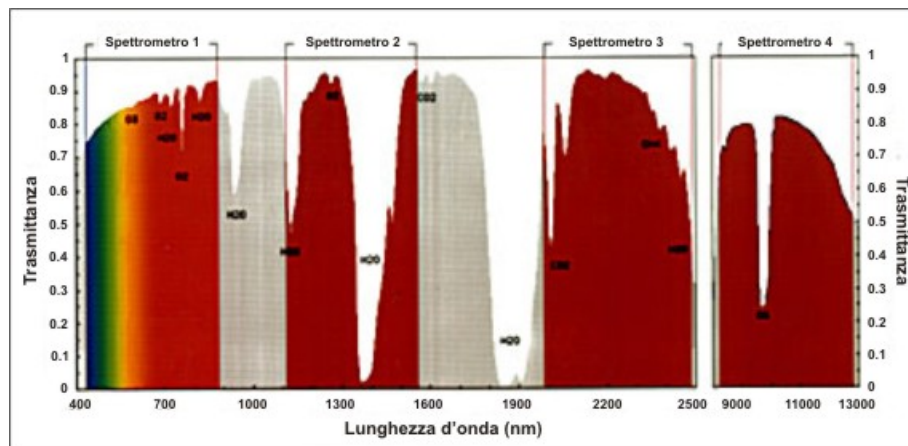


Figura 225 - Copertura spettrale dei quattro spettrometri del sensore MIVIS rapportata alla curva di trasmittanza dell'atmosfera (essa rappresenta le regioni dello spettro elettromagnetico, riportate in ascissa come lunghezze d'onda, che presentano la massima trasmissione e la minima attenuazione nell'atmosfera) (fonte: CNR-LARA)

6.7.7.2 *Le componenti del sistema MIVIS*

L'intero sistema MIVIS può essere suddiviso in cinque componenti principali, come mostrato dalla seguente figura e descritto in dettaglio nel seguito.

Ai sottosistemi illustrati in figura vanno aggiunti due computer che controllano le operazioni per le quali sono responsabili i sottosistemi e gestiscono il flusso dei dati all'interno del sistema, inviando comandi ed informazioni attraverso una rete di comunicazione locale *ethernet*.

L'intero sistema viene installato su una piattaforma aerea, la quale deve essere dotata di apposita botola ove alloggiare la testa di scansione. Essa deve essere inoltre abbastanza spaziosa per ospitare le restanti componenti elettroniche e il personale tecnico a bordo e deve infine avere particolari caratteristiche di stabilità in volo, tali da non inficiare le operazioni di acquisizione dati.

6.7.7.2.1 Il Moving Window Display

Il *Moving Window Display* contiene un monitor CRT, un oscilloscopio digitale ed un invertitore di potenza DC/AC che fornisce 115 Volt a 60 Hz al monitor CRT e al registratore VLDS. Il monitor riceve le immagini video dal Digitalizzatore per il monitoraggio contemporaneo di due canali selezionabili durante le operazioni di ripresa. L'oscilloscopio è utilizzato dall'operatore per il controllo funzionale delle operazioni di ripresa e rappresenta uno degli strumenti per il mantenimento del sistema. Le funzioni del *Moving Window Display* sono controllate attraverso un menu di selezione a disposizione dell'operatore su un *Touch Screen Display* posto nel sottosistema Digitalizzatore.



SPETTROMETRO 1		SPETTROMETRO 3				SPETTROMETRO 4	
#CH	AMPIEZZA (μm)	#C H	AMPIEZZA (μm)	#CH	AMPIEZZA (μm)	#CH	AMPIEZZA (μm)
1	0.431 ÷ 0.452	29	1.985 ÷ 1.995	61	2.248 ÷ 2.257	93	8.21 ÷ 8.56
2	0.452 ÷ 0.471	30	1.994 ÷ 2.003	62	2.256 ÷ 2.265	94	8.61 ÷ 8.96
3	0.471 ÷ 0.490	31	2.002 ÷ 2.011	63	2.264 ÷ 2.272	95	9.05 ÷ 9.39
4	0.490 ÷ 0.512	32	2.010 ÷ 2.019	64	2.270 ÷ 2.279	96	9.41 ÷ 9.77
5	0.510 ÷ 0.530	33	2.019 ÷ 2.028	65	2.277 ÷ 2.286	97	9.86 ÷ 10.18
6	0.530 ÷ 0.550	34	2.027 ÷ 2.036	66	2.284 ÷ 2.293	98	10.21 ÷ 10.67
7	0.551 ÷ 0.573	35	2.035 ÷ 2.044	67	2.292 ÷ 2.301	99	10.74 ÷ 11.12
8	0.573 ÷ 0.592	36	2.044 ÷ 2.053	68	2.300 ÷ 2.309	100	11.24 ÷ 11.66
9	0.592 ÷ 0.611	37	2.053 ÷ 2.063	69	2.307 ÷ 2.316	101	11.74 ÷ 12.15
10	0.611 ÷ 0.634	38	2.061 ÷ 2.070	70	2.314 ÷ 2.323	102	12.24 ÷ 12.70
11	0.634 ÷ 0.653	39	2.069 ÷ 2.078	71	2.322 ÷ 2.331		
12	0.653 ÷ 0.672	40	2.078 ÷ 2.087	72	2.329 ÷ 2.338		
13	0.671 ÷ 0.694	41	2.087 ÷ 2.096	73	2.336 ÷ 2.345		
14	0.693 ÷ 0.713	42	2.095 ÷ 2.104	74	2.343 ÷ 2.352		
15	0.713 ÷ 0.733	43	2.103 ÷ 2.112	75	2.351 ÷ 2.360		
16	0.733 ÷ 0.753	44	2.111 ÷ 2.120	76	2.359 ÷ 2.368		
17	0.753 ÷ 0.773	45	2.119 ÷ 2.129	77	2.366 ÷ 2.375		
18	0.772 ÷ 0.792	46	2.128 ÷ 2.137	78	2.373 ÷ 2.382		
19	0.791 ÷ 0.811	47	2.136 ÷ 2.145	79	2.380 ÷ 2.389		
20	0.811 ÷ 0.833	48	2.144 ÷ 2.153	80	2.387 ÷ 2.396		
		49	2.152 ÷ 2.161	81	2.394 ÷ 2.403		
		50	2.160 ÷ 2.169	82	2.401 ÷ 2.410		
		51	2.168 ÷ 2.177	83	2.408 ÷ 2.417		
		52	2.175 ÷ 2.184	84	2.415 ÷ 2.424		
		53	2.183 ÷ 2.194	85	2.422 ÷ 2.431		
		54	2.192 ÷ 2.201	86	2.429 ÷ 2.438		
		55	2.200 ÷ 2.209	87	2.436 ÷ 2.445		
		56	2.208 ÷ 2.217	88	2.442 ÷ 2.451		
		57	2.216 ÷ 2.225	89	2.449 ÷ 2.458		
		58	2.224 ÷ 2.233	90	2.456 ÷ 2.465		
		59	2.232 ÷ 2.241	91	2.463 ÷ 2.471		
		60	2.239 ÷ 2.248	92	2.468 ÷ 2.479		
SPETTROMETRO 2							
#CH	AMPIEZZA (μm)						
21	1.15 ÷ 1.20						
22	1.20 ÷ 1.25						
23	1.25 ÷ 1.30						
24	1.30 ÷ 1.35						
25	1.35 ÷ 1.40						
26	1.40 ÷ 1.45						
27	1.45 ÷ 1.50						
28	1.50 ÷ 1.55						

Tabella 45 - I 102 canali (CH) registrati dai quattro spettrometri dallo scanner iperspettrale MIVIS (fonte: SenSyTech)



Figura 226 -Il sistema MIVIS e le sue componenti principali.

6.7.7.2.2 Il Digitalizzatore

Il Digitalizzatore converte i 102 segnali analogici, provenienti dallo Spettrometro, in forma digitale a 12 bit, li formatta e li invia al supporto magnetico VLDS per la registrazione. Questo processo è sincronizzato con la rotazione dello specchio di scansione per mezzo di segnali inviati dal contatore ottico installato nel motore di rotazione dello specchio.

Ulteriori funzioni comprendono la raccolta delle informazioni ausiliarie relative ad ogni linea di scansione e il loro inserimento nella sequenza di registrazione dati, la formattazione di dati selezionati dall'operatore per l'invio, durante le riprese, di immagini video di uno o due canali verso il *Moving Window Display*.

Il Digitalizzatore controlla il sistema GPS e PAS (*Position and Attitude Sensor*) e gestisce quindi i dati di posizione ed assetto per il loro inserimento sincronizzato nei dati. Utilizza le informazioni provenienti dal PAS per la correzione in tempo reale degli errori sui dati dovuti a perturbazioni della piattaforma aerea intorno all'asse di rollio di $\pm 10^\circ$. Le informazioni GPS e PAS consentano la rimozione successiva di distorsioni nella scena ripresa causate dal movimento della piattaforma aerea intorno agli assi di beccheggio e rollio.

Tutte le funzioni del Digitalizzatore sono gestite da una CPU inserita nel sottosistema stesso e da un software di gestione.

6.7.7.2.3 Il Registratore Magnetico VLDS

È un registratore su nastro magnetico VLDS (*Very Large Data Store*) capace di registrare ad alta velocità grandi quantità di dati. La versione utilizzata da MIVIS è provvista di un buffer che permette, attraverso memorie interne, il trasferimento di dati ripresi a diverse velocità di scansione. Il supporto magnetico utilizzato è una cassetta tipo T-120 VHS capace di registrare fino a 10.4 Gbyte.

6.7.7.2.4 Il Distributore di Alimentazione

Il Distributore di Alimentazione rappresenta l'interfaccia tra l'alimentazione dell'aereo su cui il sistema viene montato ed i restanti sottosistemi del MIVIS operanti anche con differenti voltaggi l'uno dall'altro. L'isolamento delle funzioni del Distributore di Alimentazione da quelle degli altri sottosistemi è essenziale per evitare l'induzione di disturbi che potrebbero riguardare i dati registrati. Infatti questo sottosistema, oltre a svolgere funzioni di conversione di potenza, comprende anche i circuiti di controllo del motore di scansione e delle sor-

genti di riferimento (i corpi neri). Le funzioni del Distributore di Alimentazione sono gestite da una CPU inserita nel sottosistema stesso.

6.7.7.2.5 La Testa di Scansione e lo Spettrometro

La testa di scansione è costituita da elementi ottici che comprendono il telescopio collimatore primario ed uno specchio rotante di scansione (posto a 45° rispetto all'asse di rotazione), dal motore-contatore che controlla la frequenza di scansione, da due corpi neri di riferimento termico e da una struttura di acciaio Invar e alluminio che contiene tutte queste componenti. La struttura in acciaio ha la funzione di schermare la radiazione ottica dispersa.

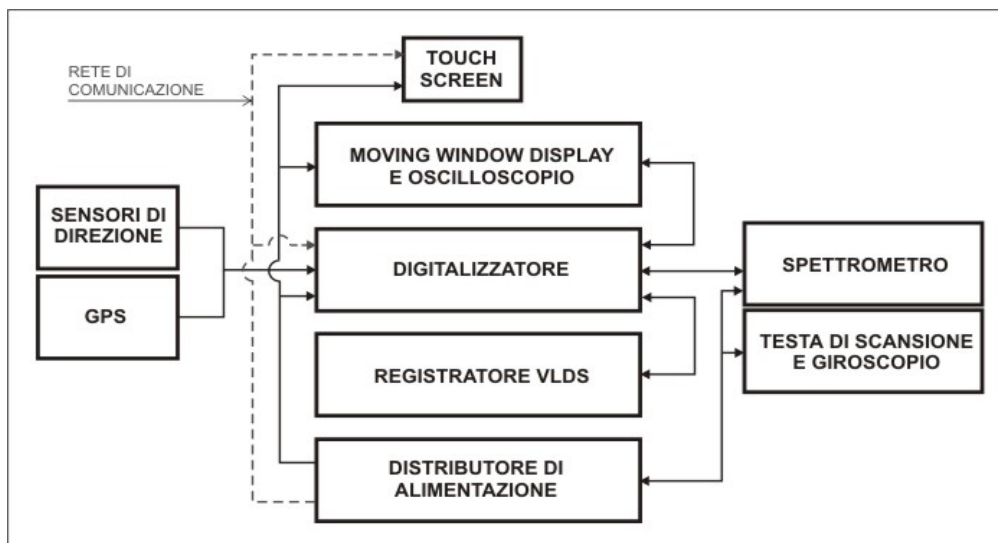


Figura 227 - Schema a blocchi delle funzioni dei componenti del sistema MIVIS (fonte: CNR-LARA)

L'energia proveniente dalla scena inquadrata al suolo e raccolta dallo specchio di scansione viene focalizzata e diretta dentro l'apertura *Field Stop* da un paraboloide e quindi collimata e riflessa fuori dalla testa di scansione verso lo spettrometro. Ognuno dei due corpi neri di riferimento viene visto una volta per ogni rotazione dello specchio di scansione. Il sensore riceve l'energia collimata dalla testa di scansione e la suddivide tramite filtri diecrici all'interno di quattro spettrometri. Ogni spettrometro contiene un reticolo di diffrazione, lenti ottiche, un *array* di sensori e l'elettronica di preamplificazione del segnale. Sono stati utilizzati materiali ottici, materiali di ricopertura e sensori ottimizzati per operare nelle regioni di lunghezza d'onda specifiche di ogni spettrometro. Inoltre, è stato implementato un sistema per la selezione di guadagni elettronici e/o attenuatori ottici per massimizzare il rapporto segnale/rumore in un ampio intervallo di valori di radianza. Tale sistema permette di registrare temperature al suolo fino a 1200° C senza pericolo di saturazione del segnale.

6.7.7.3 *Le caratteristiche tecniche del sistema MIVIS*

Le principali caratteristiche tecniche del sistema MIVIS sono riportate in

Tabella 46.

La risoluzione geometrica non è, trattandosi di un sensore aviotrasportato, una caratteristica intrinseca del MIVIS, ma dipende dalla quota di volo della piattaforma aerea. Ciò che, invece, rimane costante ed indipendente dalla quota è l'angolo diedro di visibilità del sensore, cioè il cosiddetto IFOV (vedi Figura 5). Noto l'IFOV e la quota relativa di volo Q è possibile ricavare, almeno per la posizione nadirale o sub-nadirale, la risoluzione geometrica applicando la seguente formula:



$$\text{risoluzione geometrica (m)} = Q \text{ (m)} \cdot \text{IFOV (rad)} \quad (79)$$

102 bande spettrali simultaneamente registrate e digitalizzate	
due corpi neri di riferimento selezionabili a meno di 15°C e a più di 45°C rispetto alla temperatura ambiente	
registrazione spaziale di tutte le bande attraverso un comune Field Stop ottico	
frequenza di rotazione dello specchio	25, 16.7, 12.5, 8.3, 6.25 Hz
componenti ottico-meccaniche compensate termicamente	
sistema computerizzato per il controllo in <i>real-time</i> della qualità del dato per tutti i 102 canali	
massima temperatura nella scena senza saturazione del segnale	1200°C
sistema PAS (Position and Attitude Sensor) costituito da: ricevitore GPS per la determinazione della posizione (accuratezza 15 ÷ 40 m) e velocità (accuratezza 0.05 ÷ 0.20 m/sec) della piattaforma aerea; giroscopio per la determinazione del rollio e del beccheggio (accuratezza 0.2°) della piattaforma aerea; correzione sui dati in <i>real-time</i> del rollio ± 10°; Flux Gate Compass per la determinazione delle variazioni della piattaforma aerea intorno all'asse di imbardata (accuratezza 0.56°).	
interfaccia operatore attraverso un Touch Screen Display con menu operativi	
Moving Window Display tipo CRT ed oscilloscopio digitale per il monitoraggio contemporaneo di 2 canali MIVIS selezionabili durante le operazioni di ripresa	
registrazione dati su supporto magnetico VLDS da 10.4 Gbyte	
peso testa di scansione	100 Kg
peso intero sistema	209 Kg
dimensioni testa di scansione	67cm x 52cm x 71cm
dimensioni componenti elettronici	102cm x 48.3cm x 61cm
IFOV (Istantaneous Field Of View)	2 mrad
FOV (Field Of View) digitalizzato	71.059° (1.24 rad)*
celle per linea di scansione	755
risoluzione radiometrica	12 bits (4096 valori)
risoluzione geometrica	funzione della quota di volo
risoluzione spettrale**	spettrometro 1: 0.020 μm spettrometro 2: 0.05 μm spettrometro 3: 0.009 μm spettrometro 4: 0.35 μm
swath	funzione della quota di volo
tipo di scansione	whisk-broom

Tabella 46 - Caratteristiche tecniche del sistema MIVIS (fonte: SenSyTech e CNR-LARA).

*valore approssimato; ** valori non costanti per le bande del singolo spettrometro

Per ottenere, quindi, immagini con una buona risoluzione geometrica (dell'ordine di pochi metri) è necessario, per il MIVIS, acquisire ad una quota di volo che non superi i 2000-2500 m (vedi Tabella 47).

Lo stesso discorso si può fare per lo *swath*, che rappresenta, come noto, la larghezza al suolo della strisciata acquisita dal sensore (vedi Figura 228). Anch'esso, per il MIVIS, è funzione della quota di volo e può essere calcolato ricorrendo alla formula:

$$swath = 2 \cdot \left(Q(m) \cdot \tan \frac{FOV(rad)}{2} \right) \quad (80)$$

Quota di volo (m)	IFOV (rad)	Risoluzione geometrica	FOV* (rad)	Swath* (m)
1000	0.002	2 m × 2 m	1.24	1400
1500		3 m × 3 m		2200
2000		4 m × 4 m		2900
2500		5 m × 5 m		3600

Tabella 47 -Alcuni esempi di risoluzione geometrica e swath del dato MIVIS al variare della quota di volo. *valori approssimati

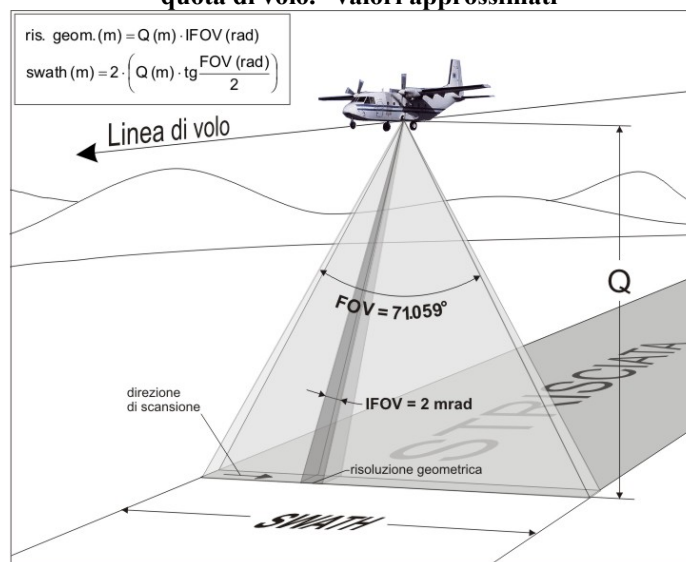


Figura 228 - Schema di acquisizione del sensore MIVIS.

6.7.7.4 Applicazioni del dato

Le tecniche di telerilevamento hanno uno sviluppo atipico rispetto a quelle che caratterizzano altre discipline. La messa in orbita di un satellite o la realizzazione di un nuovo sensore, generano un balzo che determina una potenziale capacità di acquisizione di dati territoriali ed ambientali spesso quantitativamente e qualitativamente tale da rivoluzionare le procedure impiegate fino a quel momento. Così è stato anche per il MIVIS.

La possibilità di registrare tutti i fenomeni elettromagnetici che si manifestano sulla superficie terrestre in un ampio intervallo di lunghezze d'onda (dai 0.4 μm ai 12 μm), suddiviso in 102 bande di ampiezza variabile (64 canali dei quali con ampiezza di soli 0.009 μm), ha permesso di ampliare notevolmente i metodi e i campi di indagine, di solito più limitati in risoluzione spaziale e spettrale (vedi

Tabella 48 per un elenco dei possibili campi di applicazione).

Il periodo di studio delle caratteristiche tecniche dello strumento, di individuazione dei possibili campi applicativi e di sperimentazione vera e propria è stato necessariamente lungo soprattutto per il fatto che non esisteva al mondo una letteratura specifica, essendo il MIVIS un prototipo, costruito in unico esemplare.



Sono comunque passati più di dieci anni da quando il CNR, nell'ambito del progetto LARA, ha acquisito lo strumento MIVIS. Le missioni finora svolte a seguito di richieste da parte di istituzioni nazionali ed internazionali hanno portato alla registrazione di una notevole quantità di dati in svariati campi applicativi. Tra essi si ricordano: inquinamento da idrocarburi su terra e in mare, cartografia geologica ed osservazione dei fenomeni vulcanici attivi, dinamica e caratteristiche fisiche delle correnti marine, inquinamento costiero, valutazione della qualità di ambienti lagunari, discariche, archeologia, dinamica dei dissesti franosi, parchi naturali, contaminazione ambientale (vedi

Tabella 49).

SPETTROMETRO	CANALE	Ampiezza (micron)	Settori di Applicazione
1	1	0.431-0.452	clorofilla in acqua
	2	0.452-0.471	sostanza gialla in acqua
	3	0.471-0.490	controllo inquinamento in acqua
	4	0.490-0.512	mappe geologiche
	5	0.510-0.530	sedimenti sospesi in acqua
	6	0.530-0.550	processi costieri
	7	0.551-0.573	sostanza organica nel terreno
	8	0.573-0.592	inventario forestale: studi sul fitoplancton
	9	0.592-0.611	mappe sull'uso del suolo: clorofilla in acqua
	10	0.611-0.634	studi di mineralogia
	11	0.634-0.653	studi di mineralogia
	12	0.653-0.672	mappe geologiche
	13	0.671-0.694	tettonica: produttività del suolo
	14	0.693-0.713	studi sulle piogge acide
	15	0.713-0.733	erosione del suolo
	16	0.733-0.753	sedimenti sospesi in acqua
	17	0.753-0.773	mappe geologiche
	18	0.772-0.792	inventario forestale
	19	0.791-0.811	struttura interna delle foglie
	20	0.811-0.833	struttura interna delle foglie
2	21	1.150-1.200	contenuto ferroso del terreno
	22	1.200-1.250	contenuto ferroso del terreno
	23	1.250-1.300	caratteristiche dell'assorbimento dell'ossigeno
	24	1.300-1.350	caratteristiche dell'assorbimento dell'ossigeno
	25	1.350-1.400	identificazione del suolo
	26	1.400-1.450	umidità del suolo
	27	1.450-1.500	umidità del suolo
	28	1.500-1.550	umidità del suolo
3	⋮	64 canali	mappe geologiche mineralogia umidità del suolo
3	92	ampiezza pari a 0.009μm	studi sulla desertificazione
4	93	8.210-8.560	controllo inquinamento termico



	94	8.610-9.960	clorofilla in acqua
	95	9.050-9.390	controllo incendi/mappe
	96	9.410-9.770	mappe geologiche
	97	9.860-10.180	umidità del terreno
	98	10.210-10.670	sedimenti sospesi in acqua
	99	10.740-11.120	vapore acqueo atmosferico: temperatura acqua
	100	11.240-11.660	ricerche sullo spargimento di olio/mappe
	101	11.740-12.150	litologia
	102	12.240-12.700	piogge acide

Tabella 48 - Possibili settori di applicazione del sensore iperspettrale MIVIS (fonte: CNR-LARA).

SITO	ISTITUZIONE/I	OBIETTIVI SCIENTIFICI
Lago di Garda (Italia)	CNR/LARA (Roma) CNR/IRRS (Milano)	MIVIS test area, inquinamento delle acque
Isola d'Elba (Italia)	CNR/LARA (Roma)	MIVIS test area
Mt. Etna, Vulcano, Stromboli (Italia)	JPL (Pasadena, CA USA), CNR/IIV (Catania), CNR/GNV (Roma), CNR/CSGDSA (Pisa), ING (Roma), OGUM (Modena), Università di Roma, Università di Palermo	Mappatura geologica e misura dei fenomeni vulcanici attivi
Stretto di Messina (Italia)	CNR/CST (Messina)	Dinamica e caratteristiche fisiche delle correnti marine
Gela (Italia)	CNR/IROE (Firenze), Università di Catania	Inquinamento costiero
SITO	ISTITUZIONE/I	OBIETTIVI SCIENTIFICI
Laguna di Marsala (Italia)	Università di Palermo	Studio sviluppo algale
Acireale, Taormina (Italia)	Università di Catania, CNR/IRRS (Milano)	Inquinamento costiero, discariche e studi archeologici
Selinunte, Alesia (Italia)	CNR/Comitato Nazionale Scienza e Tecnologia dei Beni Culturali (Roma), Università di Palermo	Studi archeologici
Lagune di Venezia ed Orbetello (Italia)	CNR/ISDGM (Venezia), Università di Roma	Valutazione della qualità dell'ambiente lagunare
Hohenfels (Germania)	ANL (Chicago, IL USA)	Studi di impatto ambientale
Crau-Camargue (Francia)	CNES (Parigi), INRA Bioclimatologie (Avignone)	Previsione della produzione agricola

Tabella 49 - I principali progetti scientifici intrapresi dal LARA utilizzando il sistema MIVIS.

Tutti gli studi sinteticamente elencati dimostrano le potenzialità dei sensori iperspettrali in generale, e del sistema MIVIS in particolare. Mentre infatti l'utilizzo di sensori multispettrali deve spesso confrontarsi con le difficoltà legate alla loro bassa risoluzione spettrale, il telerilevamento iperspettrale ha il grande vantaggio di consentire la comparazione dei dati con esso acquisiti con le misure fatte sul campo ed in laboratorio. Ciò permette, per esempio, oltre alla realizzazione di carte tematiche molto dettagliate, di mettere a punto metodologie per l'individuazione automatica sul territorio di tipologie di superficie a comportamento radiometrico noto, siano esse di origine naturale o antropica. La velocità con cui è oggi possibile elaborare le immagini al computer consentirebbe di raggiungere l'obiettivo con un notevole risparmio di tempo e denaro rispetto al tradizionale rilevamento diretto.

6.7.7.5 Il volo MIVIS della Regione Autonoma Valle d'Aosta

I dati che seguono fanno riferimento all'incarico specifico assegnato al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino da parte della RAVA per la correzione geometrica (ortoproiezione) del volo MIVIS di cui la RAVA dispone. La stretta e continuata collaborazione tra il DITAG del Politecnico di Torino e il Dipartimento di Scienze della Terra, anche nel corso di tale esperienza, consente di attingere, per questo lavoro, al materiale relativo a tale incarico.

Nell'estate del 1999 è stato eseguito, ad opera della Compagnia Generale Ripreseeree (CGR), il rilievo aereo della regione Valle d'Aosta con lo scanner iperspettrale MIVIS.

L'intero territorio regionale è stato acquisito realizzando un totale di 70 strisciate (vedi Figura 229), le cui caratteristiche tecniche sono sinteticamente riportate in Tabella 50.

Ad esclusione di quelle di bordo (numero 1÷10) e di quelle di fondovalle (numero 65, 66, 67, 68, 69, 70), le strisciate con numerazione dispari sono state acquisite volando da Nord a Sud, mentre quelle con numerazione pari volando da Sud a Nord.

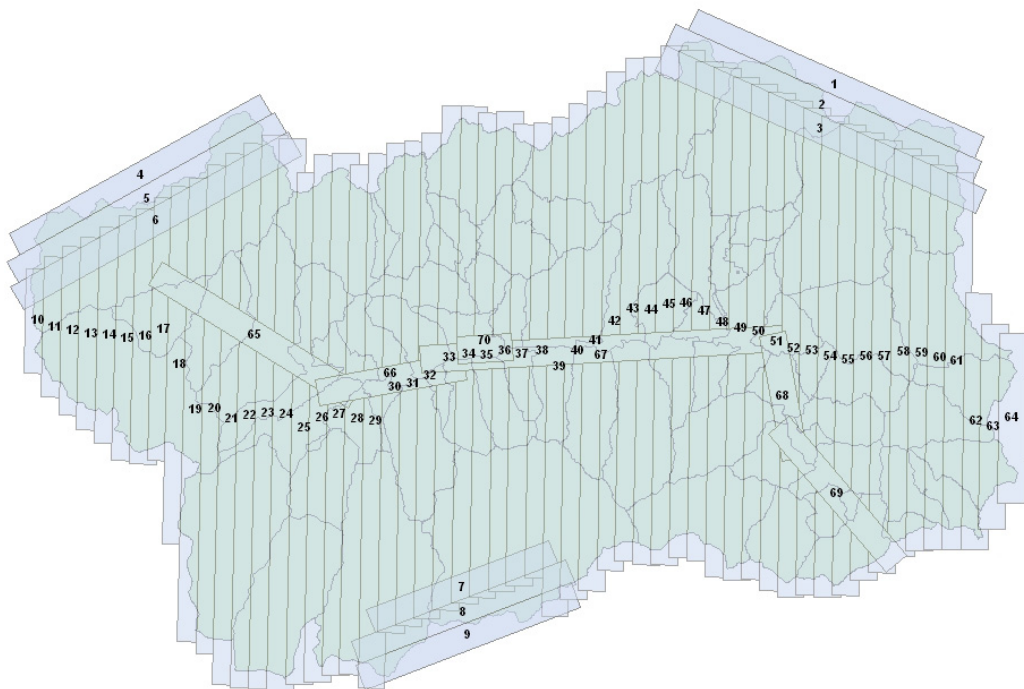


Figura 229 - Schema della 70 strisciate MIVIS realizzate per la copertura dell'intero territorio della regione Valle d'Aosta.

Data acquisizione	Estate 1999
Quota di volo	circa 5000 m s.l.m.
Numero righe	Max 16954 Min 2669
Numero colonne	755
Risoluzione radiometrica	12 bit
Risoluzione spettrale	102 bande
Risoluzione geometrica	3 – 8 m

Tabella 50 - Principali caratteristiche tecniche delle immagini MIVIS della regione Valle d'Aosta.

*** ad eccezione delle strisciate di fondovalle n. 65, 66, 67, 68, 69, 70 che sono state acquisite con una quota assoluta di circa 3000 m.**

6.7.7.5.1 Correzione geometrica delle immagini

Le caratteristiche del sensore iperspettrale MIVIS (registrazione simultanea, ad alta risoluzione geometrica, di 102 bande nel visibile e nell'infrarosso vicino, medio e termico) rendono, come già in precedenza sottolineato, le immagini con esso acquisite uno strumento dalle elevate potenzialità per studi tematici di tipo qualitativo e quantitativo in molteplici campi.

La presenza di forti deformazioni geometriche, indotte principalmente dalla particolare geometria di presa del sensore, dall'instabilità della piattaforma aerea e dalla variabilità altimetrica del territorio indagato, rende però spesso problematico l'uso del dato grezzo. Il corretto utilizzo delle immagini MIVIS presuppone quindi l'applicazione preliminare di procedure adeguate al fine di eliminare, o quanto meno ridurre efficacemente, le distorsioni geometriche presenti, per renderle compatibili con la cartografia a scale e proiezioni opportune (Figura 230, Figura 231, Figura 232).

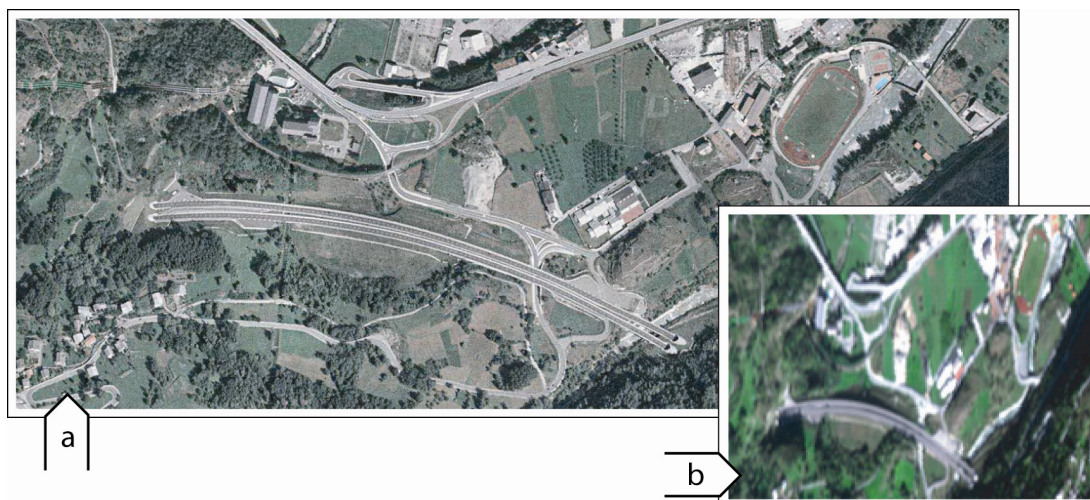


Figura 230 - Stessa zona di territorio inquadrata da una ortofoto (a) e da una immagine MIVIS "grezza" (b): da un confronto delle due (a parte la diversa risoluzione geometrica) è evidente come l'immagine MIVIS non riproduca correttamente la reale geometria della superficie inquadrata e necessiti quindi di correzioni geometriche per poter essere sovrapposta all'ortofoto, considerabile quale base di riferimento.

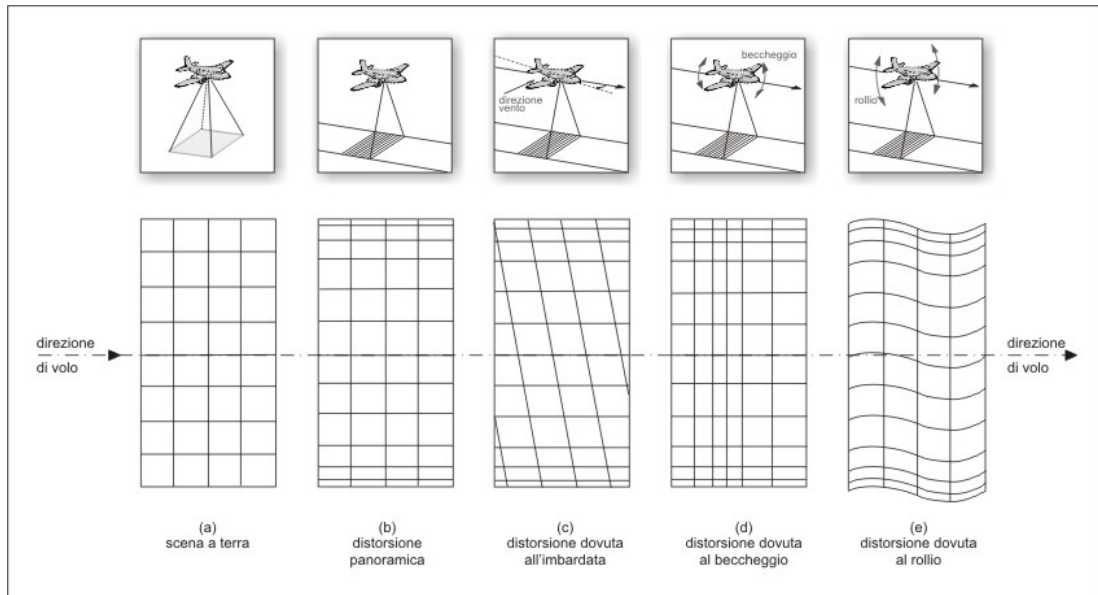


Figura 231 - Le distorsioni causate dai movimenti dell'aereo sull'intera immagine acquisita.

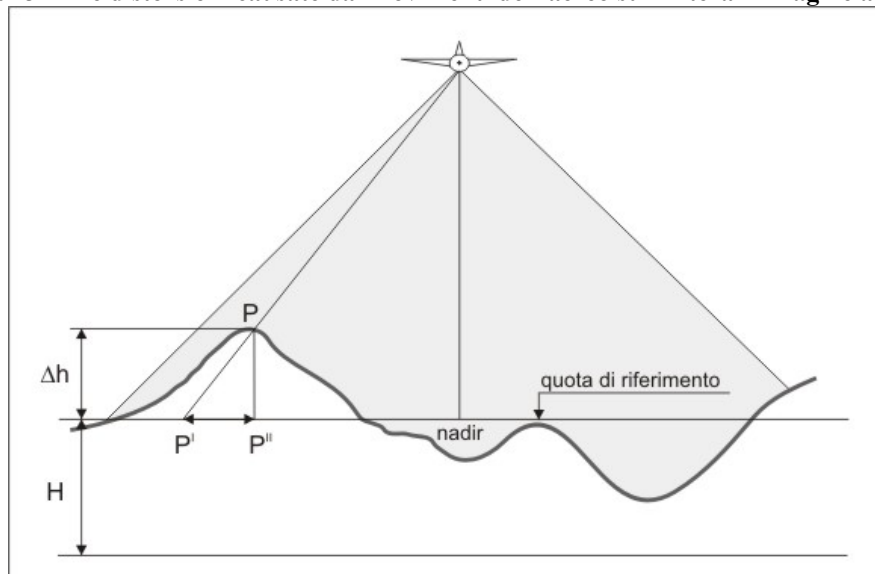


Figura 232 - Relief displacement. A causa della prospettiva centrale tutti i punti a terra, ad eccezione di quelli nadirali, che hanno una elevazione maggiore o minore di quella di riferimento H risultano spostati nell'immagine rispetto alla loro reale posizione. Per esempio il punto P verrà rappresentato in P' anziché in P'' .

I metodi di correzione geometrica utilizzabili dipendono dalla tipologia del dato immagine e dalle informazioni ausiliarie disponibili (dati di assetto, posizione, cartografia ecc.). Per lo specifico caso delle immagini MIVIS relative al territorio valdostano si è proceduto alla verifica delle prestazioni ottenibili con diversi metodi di correzione geometrica, i cui risultati vengono esposti di seguito.

6.7.7.5.2 Dati ausiliari a disposizione

I dati ausiliari necessari alle operazioni di correzione geometrica sono i seguenti:

informazioni di assetto (rollio, beccheggio, imbardata) e posizione (GPS) del velivolo su cui è montato il sensore MIVIS relativamente a ogni singola linea di scansione dell'immagine (vedi Figura 233);

DEM (Digital Elevation Model): modello digitale dell'intero territorio della regione Valle d'Aosta, con passo di 10 m; originariamente fornito in formato ASCII XYZ è stato trasformato in formato raster Geotiff per facilitarne il successivo utilizzo (Figura 234);

Basi cartografiche in formato raster e vettoriale: Carta Tecnica Regionale (CTR) e Ortofoto alla scala nominale 1:10000, le quali verranno utilizzate nella fase di acquisizione di punti di controllo a terra (GCP – Ground Control Point), necessari per le operazioni di correzione geometrica, e nella fase di controllo qualitativo dei risultati ottenuti.

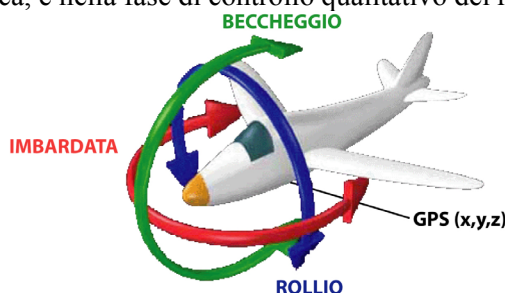


Figura 233 - I movimenti di rollio, beccheggio e imbardata a cui è soggetto un velivolo e che vengono registrati, insieme ai dati di posizione GPS relativamente alla singola linea, durante l'acquisizione di una immagine MIVIS.

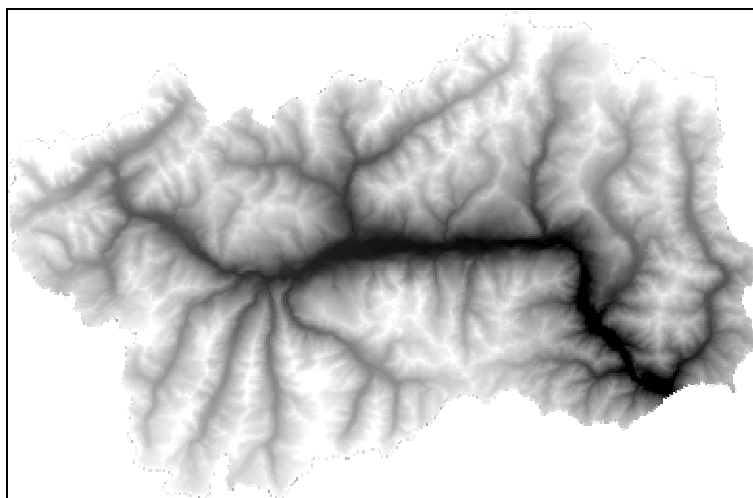


Figura 234 - DEM della regione Valle d'Aosta in formato raster.

6.7.7.5.3 Metodi di correzione geometrica validati

Prima di procedere alle operazioni di correzione è necessario effettuare una valutazione qualitativa delle strisciate a disposizione (70 nel caso della copertura RAVA). E' preferibile, al fine dell'ottimizzazione delle operazioni di processamento e per garantire migliore continuità tra le ortofoto mosaicare le porzioni di strisciata fornite. Il dato MIVIS infatti viene acquisito per strisciate continue di lunghezza necessaria a coprire l'area di interesse; per problemi connessi alle gestione del dato, la singola strisciata viene poi spezzata in tronchi di dimensione contenuta e fornita all'utenza. Per le ragioni sopra espresse conviene dunque, preventivamente procedere ad una loro mosaicatura per ricomporre la strisciata originale (compatibilmente con la potenza di calcolo a disposizione) utilizzando una procedura denominata "pixel based".



Tre diversi metodi di correzione geometrica (selezionati tra quelli riportati in letteratura) sono stati applicati per la correzione di una strisciata campione (strisciata n. 29, dimensioni 15306 righe 755 colonne) tra le 70 a disposizione, al fine di individuare quello in grado di garantire il migliore risultato in termini di accuratezza di posizionamento planimetrico.

I tre metodi selezionati e validati sono i seguenti:

RFM (Rational Function Model);

TPS (Thin Plate Spline);

PARGE (PARAMetric GEocoding).

I primi due metodi (RFM e TPS), disponibili nella maggior parte dei software commerciali per il trattamento di immagini telerilevate, appartengono alla categoria dei cosiddetti “metodi non-parametrici”; essi utilizzano, per la ricostruzione della corretta geometria della scena a terra, particolari funzioni di trasformazione calibrate sulla base di un elevato numero di punti di controllo a terra (GCP). Il metodo RFM, a differenza di quello TPS, utilizza anche il DEM e per questo è considerato un metodo “tridimensionale”.

Il software PARGE, sviluppato presso il Remote Sensing Laboratories (RSL) dell'Università di Zurigo, ricorre invece un approccio di tipo “parametrico” in quanto è in grado di ricostruire la geometria di scansione per ogni singolo pixel dell'immagine utilizzando i dati di posizione ed assetto, contenuti nei file ausiliari descritti in precedenza, ed il dato di quota prelevato dal DEM.

Per compensare eventuali errori presenti nei dati ausiliari è preferibile, anche con questo metodo, utilizzare dei punti di appoggio (GCPs), la cui individuazione può essere quindi considerata come operazione comune e preliminare all'utilizzo di tutti e tre i metodi considerati.

6.7.7.5.4 Individuazione dei punti di appoggio a terra (Ground Control Points, GCPs)

I punti di appoggio, come già ricordato, sono punti noti sia in termini di coordinate immagine (colonna, riga), sia in coordinate terreno (X, Y, Z) necessari per la determinazione dei parametri del modello di correzione. Essi devono possibilmente coincidere con entità stabili nel tempo quali, per esempio, incroci di strade, cigli di edifici, ponti, e non bordi di campi o meandri fluviali la cui posizione può variare di molto in pochi anni.

Dell'intero processo di correzione geometrica di una immagine telerilevata, la fase di acquisizione dei GCPs può essere considerata a buon ragione quella più gravosa e dispendiosa in termini di tempo. Il compito è reso ulteriormente difficoltoso se, come nel caso in oggetto, si deve operare su immagini caratterizzate da forti distorsioni e relative ad aree ad elevata copertura boschiva, con roccia nuda o coperte dalla neve.

Per cercare quindi di limitare al massimo il tempo dedicato alla fase di acquisizione dei GCPs occorre determinare, se possibile, quale sia la loro configurazione (numero minimo e distribuzione spaziale) ottimale.

A questo scopo i tre diversi metodi di correzione geometrica sopra elencati sono stati applicati all'immagine campione con diverse configurazioni di GCPs, (riportate nello schema Figura 235).

6.7.7.5.5 Analisi risultati delle prove di correzione geometrica

La valutazione dei risultati ottenuti dalla correzione di alcune strisciate campione (i risultati si riferiscono alla numero 29) mediante applicazione dei tre diversi metodi sopra elencati ed al variare delle configurazioni dei GCPs è stata effettuata mediante una analisi di tipo qualitativo (verifica della corrispondenza con la cartografia di riferimento alla scala 1:10000 mediante sovrapposizione) e quantitativo (valutazione degli errori di posizionamento planimetrico sui GCP e su alcuni punti di controllo, CP – Check Point).



I risultati mostrano:

Metodo RFM: l'analisi di tipo qualitativo dell'immagine risultante dall'applicazione di tale metodo ha evidenziato che, sebbene esso riesca a ricostruire la geometria globale della scena, sono presenti delle anomalie (buchi, asintoti) dovute molto probabilmente a problemi di instabilità numerica; tali gravi anomalie fanno considerare inutilizzabile il metodo RFM ed hanno reso superflue le previste analisi quantitative;

Metodo TPS: dal punto di vista qualitativo si è evidenziata in questo caso, come prevedibile vista la natura del metodo, una elevata sensibilità alla distribuzione dei punti di controllo a terra: l'errore aumenta allontanandosi dai GCPs con valori non omogenei sull'intera scena (vedi Figura 236), il che potrebbe rendere particolarmente difficoltosa l'eventuale operazione di mosaicatura di strisciate adiacenti. Come riportato in Tabella 51, gli errori sui punti di controllo (CPs) diminuiscono all'aumentare del numero di appoggio raggiungendo il valore di circa 4 pixel in corrispondenza di 150 GCPs (distribuzione tipo 30abcde);

- Metodo PARGE: le analisi quantitative e qualitative evidenziano in questo caso il raggiungimento di buoni ed omogenei livelli di accuratezza (vedi Figura 236 e

Tabella 52); in riferimento alle prove eseguite al variare della numero e della distribuzione dei GCPs va ricordato che essi servono in questo caso per correggere eventuali errori nei dati di assetto e posizione: in teoria quindi la loro distribuzione ottimale è quella "off-nadir" (corrispondente alle configurazioni di punti nei settori dell'immagine denominati a ed e, Figura 235) ed il loro numero può essere limitato a poche decine; ma la riscontrata necessità di operare anche operazioni di interpolazione dei dati porta a concludere che i risultati migliori si ottengono anche in questo caso con una distribuzione tipo 30abcde (150 GCPs omogeneamente distribuiti sull'intera immagine).

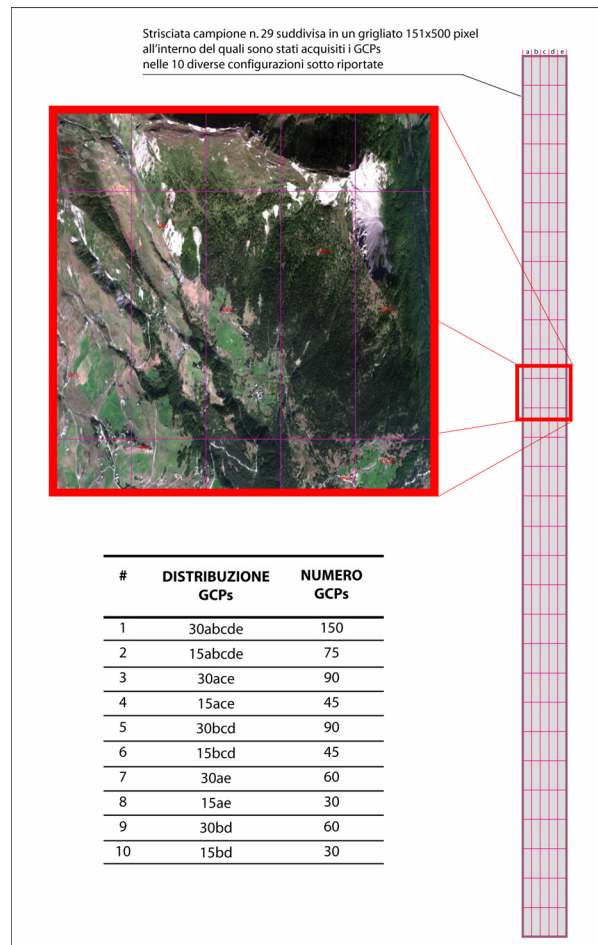


Figura 235 - Schema delle diverse configurazioni di GCPs utilizzate (la configurazione 1 denominata 30abcde significa, per esempio, che sono stati acquisiti 30 punti per ognuna delle 5 fasce verticali abcde, per un totale quindi di 150 GCPs, e lo stesso per le altre).

GCPs		CPs RMS (pixels)		
Distribuzione	Numero Tot	X	Y	TOT
30abcde	150	2,82	2,60	3,84
15abcde	75	8,36	5,07	9,78
30ace	90	10,22	3,69	10,87
15ace	45	13,92	6,20	15,24
30bcd	90	12,95	2,62	13,21
15bcd	45	15,62	4,76	16,33
30ae	60	19,95	13,89	24,31
15ae	30	20,89	11,36	23,78
30bd	60	14,05	6,35	15,42
15bd	30	17,56	7,86	19,24

Tabella 51 - Errori (RMS – Root Mean Square) sui punti di controllo (CPs) ottenuti applicando il metodo TPS alla strisciata campione numero 29 con diverso numero e distribuzione spaziale dei GCPs.

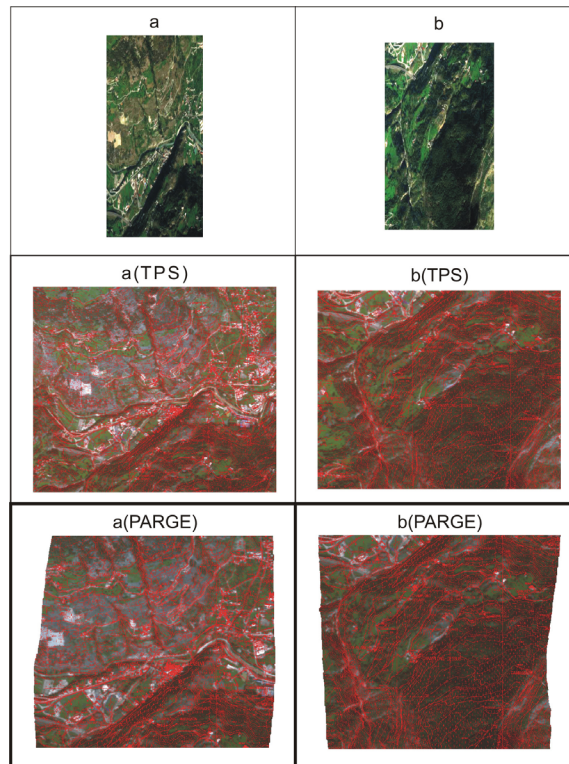


Figura 236 - (a) e (b): due particolari della strisciata numero 29 “grezza” e (a(TPS) e b(TPS)) le stesse porzioni di territorio così come risultano dalla correzione mediante metodi TPS e (a(PARGE) e b(PARGE)) mediante metodo PARGE. Come si può notare tale metodo consente di raggiungere livelli di accuratezza maggiore e più omogenea.

# Prova	Numero GCPs	Configurazione GCPs	"Correzioni"	GCPs RMS (m)			GCPs Heading Correlation	GCPs RMS (m)			GCPs Z Correlation
				Roll	Pitch	Total		X	Y	Total	
1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	150	30 abcde	no offset	32,80	41,95	53,25	0,61	39,16	38,88	55,18	0,16
			offset	3,26	4,42	5,49	0,03	3,71	4,71	6,00	0,00
			- 7 GCPs (143)	4,63	2,53	5,28	0,04	5,36	2,70	6,00	0,61
			- 12 GCPs (131)	3,73	1,87	4,17	0,03	4,50	2,09	4,96	0,54
3	75	15 abcde	no offset	32,06	43,21	53,80	0,65	37,96	40,57	55,56	0,22
			offset	2,50	5,71	6,23	0,07	2,91	5,67	6,37	0,16
			- 6 GCPs (69)	4,11	2,26	4,69	0,11	4,68	2,29	5,21	0,51
			- 5 GCPs (64)	1,97	1,03	2,22	0,10	2,38	1,14	2,64	0,43
4	90	30 ace	no offset	31,35	43,92	53,96	0,61	39,99	40,73	57,08	0,21
			offset	2,67	6,13	6,69	0,05	3,06	5,91	6,66	0,17
			- 9 GCPs (81)	3,18	1,53	3,53	0,20	3,76	1,67	4,11	0,54
			- 3 GCPs (78)	3,15	1,02	3,31	0,22	3,96	1,25	4,15	0,45
5	45	15 ace	no offset	30,17	46,09	55,09	0,67	38,10	43,06	57,50	0,26
			offset	2,19	5,28	5,72	0,12	2,32	4,65	5,20	0,17
			- 4 GCPs (41)	1,43	1,31	1,94	0,24	1,79	1,39	2,27	0,42
6	90	30 bed	no offset	34,05	38,29	51,24	0,58	36,49	35,41	50,85	0,11
			offset	2,22	3,44	4,09	0,11	2,35	3,75	4,43	0,22
			- 3 GCPs (87)	2,49	1,95	3,16	0,17	2,58	2,14	3,35	0,43
7	45	15 bed	no offset	32,75	38,51	50,55	0,60	35,19	36,32	50,57	0,16
			offset	1,75	3,51	3,92	0,02	1,75	3,84	4,22	0,31



			- 2 GCPs (43)	2,66	1,86	3,25	0,13	2,48	1,68	3,00	0,52
8	60	30 ae	no offset	30,93	46,49	55,84	0,61	42,86	43,58	61,12	0,23
			offset	2,55	5,08	5,68	0,02	3,05	5,10	5,94	0,22
			- 4 GCPs (56)	2,07	0,74	2,20	0,21	2,74	0,88	2,88	0,51
			no offset	31,02	49,13	58,10	0,67	41,77	46,22	62,30	0,29
9	30	15 ae	offset	2,21	4,33	4,86	0,09	2,32	4,03	4,65	0,13
			- 2 GCPs (28)	1,22	0,27	1,25	0,21	1,61	0,44	1,67	0,51
			no offset	34,84	38,84	52,18	0,59	37,90	35,94	52,23	0,10
10	60	30 bd	offset	1,42	3,50	3,78	0,09	1,65	3,95	4,28	0,12
			- 2 GCPs (58)	2,56	1,79	3,12	0,18	2,61	2,03	3,31	0,63
			no offset	34,56	36,68	50,40	0,62	37,74	36,52	52,52	0,16
11	30	15 bd	offset	1,53	3,76	4,06	0,02	1,59	4,23	4,52	0,40
			- 2 GCPs (28)	2,77	1,43	3,12	0,15	2,66	0,93	2,82	0,51

Tabella 52 - Errori (RMS sui GCPs ottenuti applicando il metodo PARGE alla strisciata campione numero 29 con diverso numero e distribuzione spaziale dei GCPs stessi.

In base a quanto esposto si può concludere quindi che:

il metodo che sembra garantire i migliori risultati di correzione geometrica (errori minori in termini assoluti e loro distribuzione omogenea sull'intera scena) è quello parametrico PARGE; esso verrà quindi utilizzato per la correzione geometrica dell'intero set di immagini MIVIS a disposizione;

la configurazione dei GCPs che sembra condurre ai migliori risultati è quella che prevede una loro distribuzione omogenea sull'intera immagine ed un numero, in riferimento all'immagine campione considerata, pari a 150 (ciò equivale ad acquisire circa 1 GCPs ogni 100 linee);

i valori di errore di posizionamento planimetrico ottenuti portano a ritenere il dato MIVIS corretto idoneo a una scala cartografica comunque non superiore a 1:25000.

6.7.7.5.6 Aspetti radiometrici del processo di correzione geometrica

Data la natura prevalentemente tematica delle applicazioni per le quali il sensore MIVIS è stato progettato, particolare attenzione va posta al problema del mantenimento della radiometria orifginaria del dato.

Questa risulta una caratteristica condizionata da due parametri del processo di correzione:

risoluzione geometrica dell'ortofoto finale;
metodo di ricampionamento adottato.

Per quanto riguarda la risoluzione geometrica del dato iniziale, questa deve essere fissata ad un valore prossimo alla risoluzione geometrica nominale del dato grezzo, che risulta dall'abbracciamento dell'IFOV (Instantaneous Field of View) e che, dunque, dipende dalla quota di volo. Si ricorda che, per un sistema di scansione whiskbroom, la risoluzione al suolo è variabile dal centro alla periferia della scena. L'effetto del rilievo, in ambito montano, aggrava ulteriormente questa disomogeneità geometrica del dato originale. Qualora si propenda per un'ortofoto di risoluzione costante intermedia tra quelle estreme, è necessario:

procedere ad operazioni di interpolazione dei toni radiometrici nelle zone dell'immagine corrispondenti alle aree più basse in termini di quota (lontane dal sensore) che risultano prive di informazione radiometrica;

procedere ad operazioni di sintesi/agggregazione degli stessi nelle zone dell'immagine corrispondenti alle aree più elevate (più vicine al sensore).

L'adozione di un metodo di ricampionamento radiometrico conservativo, quale il Nearest Neighbour, limita l'alterazione della radiometria originaria, ma abbassa la fruibilità visiva del prodotto finale.



Un buon compromesso di cui dispone PARGE è quello del ricampionamento Nearest Bilinear. Tale metodo combina due interpolazioni lineari nelle direzioni x e y dell'immagine con un ricampionamento nearest neighbor classico. L'interpolazione lineare viene cioè operata solo nelle zone dell'immagine caratterizzate da quote più basse, cioè dove manca informazione radiometrica nel corso dell'ortoproiezione. Solo se la dimensione di tali aree eccede i due pixel procede con l'interpolazione lineare altrimenti si utilizza il nearest neighbour.



[pagina lasciata intenzionalmente vuota]

7 TECNICHE RADAR

La tecnica RADAR si basa sull'emissione di onde Elettro-Magnetiche (EM) e sulla rilevazione delle relative diffusionsi. Dalle caratteristiche del segnale di ritorno si estraggono informazioni sulle caratteristiche e sulla posizione dell'oggetto osservato. L'interpretazione delle immagini RADAR (Radio Detection And Ranging) è meno intuitiva rispetto all'interpretazione delle immagini ottiche e le interazioni tra energia e materia alle frequenze delle microonde seguono modalità diverse rispetto al caso ottico.

L'equazione fondamentale del RADAR relaziona la potenza del segnale ricevuto all'antenna con le grandezze che ne condizionano il percorso

$$P_r = \frac{G^2 \lambda^2 P_t \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (81)$$

dove:

P_r : energia ricevuta dall'antenna;

P_t : energia trasmessa dall'antenna;

λ : lunghezza d'onda di lavoro;

σ : "sezione radar" dell'oggetto osservato ("bersaglio")

R : distanza tra il sensore e l'oggetto ($T_X \equiv R_X$)

G : guadagno dell'antenna ($T_X \equiv R_X$)

Il RADAR più conosciuto è il così detto "radar di scoperta ed inseguimento", progettato per rilevare la presenza di bersagli, seguirne la posizione, rilevarne le caratteristiche. Qualora, come nel presente documento, si faccia riferimento a tale tecnica per il rilevamento del territorio, il radar ha invece la finalità di rilevare le caratteristiche della superficie terrestre osservata. In questo contesto il "bersaglio" coincide con il punto (o area) della superficie terrestre che si sta osservando.

7.1 Componenti strumentali di un sistema RADAR

Un sistema RADAR è composto da:

un trasmettitore che genera l'onda EM e la fornisce all'antenna;

un'antenna che emette l'onda verso il bersaglio (nel caso di immagini telerilevate di solito è la superficie terrestre o marina, a volte l'atmosfera), e registra il segnale da questo retrodiffuso;

un ricevitore che riceve l'onda retrodiffusa, la amplifica e la elabora in modo da migliorarne la qualità ed infine invia il risultato al registratore;

un registratore che memorizza il segnale ricevuto per rappresentarlo e renderlo disponibile per ulteriori elaborazioni.

7.2 Grandezze misurabili con la tecnica RADAR

Ogni impulso diretto verso la superficie terrestre genera una serie di ritorni dovuti alla retrodiffusione da parte del bersaglio. L'analisi di tali ritorni (segnale riflesso) consente di misurare:

la distanza dell'oggetto che ha generato il ritorno. Essa viene determinata rilevando il tempo che è trascorso dall'emissione alla registrazione dell'impulso;

l'intensità del ritorno radar.

7.2.1 Misura di distanza

A diversi punti sul terreno corrispondono diversi cammini d'onda e quindi diversi ritardi di andata e ritorno come da Figura 237.

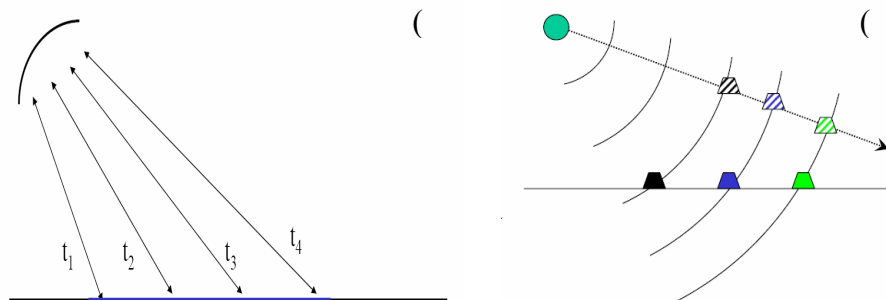


Figura 237 - Dipendenza delle distanze dei bersagli dal tempo di volo del segnale e curve di isodistanza (isocrone).

I ritorni di segnale sono quindi collocati sulla superficie terrestre (supposta piatta in prima approssimazione) all'intersezione tra le linee isodistanza (o isocrone) e la linea che rappresenta la superficie terrestre. Ciò comporta due conseguenze:

le immagini RADAR risultano affette da forti distorsioni geometriche;
la scena può essere illuminata dal segnale solo lateralmente.

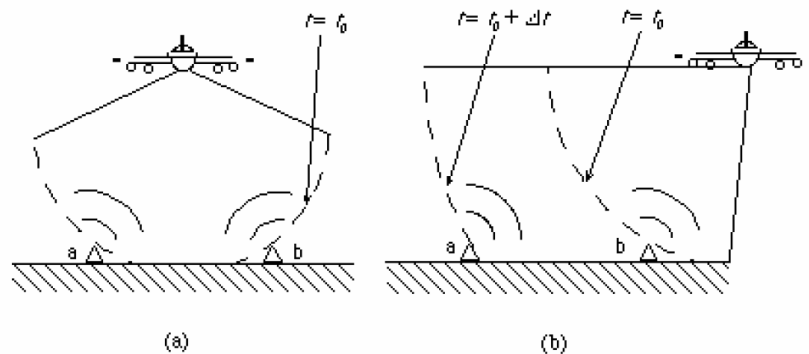


Figura 238 - Ambiguità nella collocazione dei bersagli in caso di acquisizioni nadirali (non laterali).

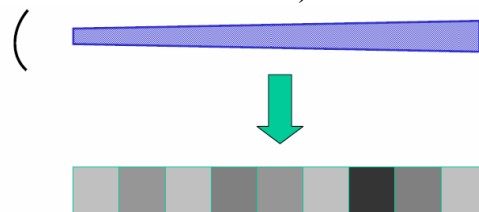


Figura 239 - Ad ogni impulso radar corrisponde una sequenza di ritorni ordinati per distanze crescenti dei bersagli, ciascuno caratterizzato da una propria intensità e fase.

Un singolo impulso radar è quindi in grado di rilevare una sequenza lineare di ritorni dal terreno corrispondenti ad altrettanti bersagli intercettati dal fascio di segnale emesso. Ciascun elemento rappresenta una porzione di territorio di dimensione differente. Se il RADAR è montato a bordo di un aeromobile o di un satellite, la sequenza di ritorni registrati rappresenta una porzione di territorio descrivibile come riga della matrice immagine RADAR.

Le successive righe della matrice vengono generate sfruttando il movimento della piattaforma e sincronizzando con questa l'emissione degli impulsi. Il risultato della scansione è dunque una immagine RADAR, le cui celle possono essere posizionate al suolo poiché:

dal ritardo nel ritorno dell'impulso è possibile determinare la distanza del bersaglio dal trasmettitore;

dalla posizione del trasmettitore (piattaforma) è possibile determinare la posizione del bersaglio nella direzione perpendicolare al fascio a microonde.

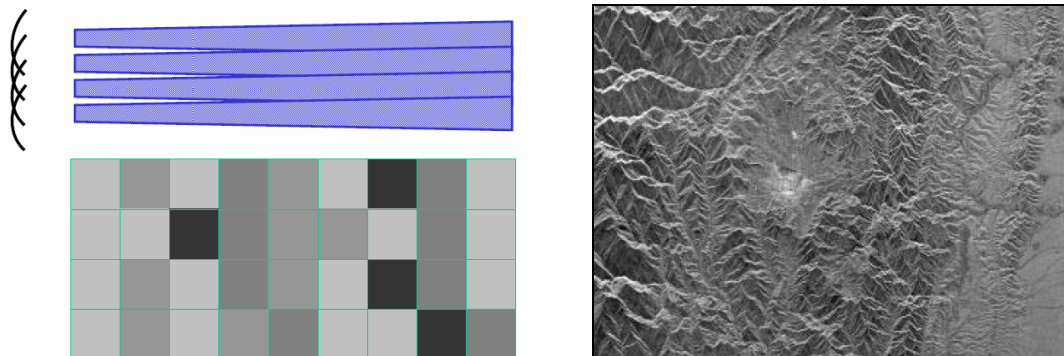


Figura 240 - Generazione delle diverse righe dell'immagine RADAR sfruttando il movimento della piattaforma (sinistra) ed esempio di immagine RADAR (intensità del segnale).

7.2.2 Intervallo spettrale del radar

Come per l'ottico, anche il radar può funzionare su diverse lunghezze d'onda (tra 0,5 e 75 cm circa), alle quali le risposte dei vari bersagli sono generalmente differenti. Sono stati assegnati nomi convenzionali ai diversi intervalli di lunghezze d'onda.

La Tabella 53 seguente riassume i principali:

Nome	Lunghezza d'onda (cm)	Applicazioni
Banda X	2,4 - 3,75 cm (12,5 - 8 GHz)	Utilizzato in campo militare per la scoperta e il riconoscimento. In campo commerciale per analisi del terreno
Banda C	3,75 - 7,5 cm (8 - 4 GHz)	Utilizzato in molti sistemi SAR satellitari, quali ERS-1 e RADARSAT.
Banda S	7,5 - 15 cm (4 - 2 GHz)	Utilizzato da Almaz
Banda L	15 - 30 cm (2 - 1 GHz)	Utilizzato sui satelliti SEASAT e JERS-1
Banda P	30 - 100 cm (1 - 0,3 GHz)	Utilizzato sull'AIRSAR di NASA/JPL

Tabella 53 - Principali bande spettrali utilizzate dai sistemi RADAR.

7.2.3 Proprietà delle diverse bande

La capacità di attraversare le idrometeore e di penetrare le superfici aumenta all'aumentare della lunghezza d'onda. In particolare i radar che funzionano con $\lambda > 2$ cm sono poco disturbati dalle nuvole; la pioggia, però, diventa rilevante per $\lambda < 4$ cm. In generale si deve accordare λ con l'ordine di grandezza delle caratteristiche da discriminare. In particolare:

- per lo studio dei ghiacci risulta idonea la banda X;
- per l'osservazione geologica la banda L;
- per la penetrazione nelle chiome degli alberi la banda P.

Ma è in generale la banda C che fornisce un buon compromesso per le diverse applicazioni.



Figura 241 - Immagini radar di intensità relative agli stessi bersagli acquisite in diverse bande spettrali.

7.3 Fattori di sistema

La tipologia di sistema RADAR dipende dalle frequenze del segnale che si intendono adottare. In particolare un segnale a più bassa frequenza presenta le seguenti caratteristiche:

- richiede una elaborazione più complessa;
- necessita di antenne ed alimentatori più grandi;
- ma l'elettronica che lo riguarda è più semplice.

Un segnale a più alta frequenza presenta invece le seguenti caratteristiche:

- richiede più potenza;
- è più difficile gestire le compatibilità elettromagnetiche;
- l'elettronica che lo riguarda risulta più complessa.

Nonostante questa differenza, molti sistemi SAR destinati a scopo di ricerca sono in grado di funzionare su più bande (es. AIRSAR del JPL, SIR-C, Convair-580).

7.4 Geometria di presa dei sistemi radar

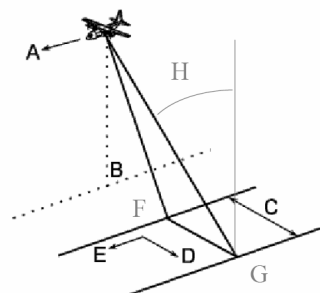


Figura 242 - Grandezze lineari descrittive delle geometrie RADAR.

Con riferimento alla Figura 242 si definiscono le seguenti grandezze lineari descrittive della geometria della presa:

- A: direzione di volo (aerei) oppure orbita (satelliti)
- B: nadir della piattaforma
- C: strisciata
- D: direzione della distanza a terra
- E: direzione della scansione along-track a terra (azimut)
- F: portata prossima (near range)

G: portata lunga (far range)

H: angolo d'incidenza.

Per quanto invece riguarda gli angoli in gioco, questi possono essere variati entro certi limiti mantenendo, comunque, obliqua l'acquisizione del bersaglio.

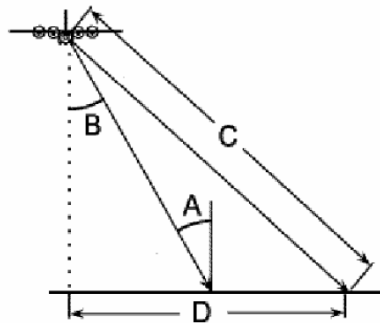


Figura 243 - Angoli coinvolti nella geometria di acquisizione RADAR

Con riferimento alla Figura 243 vengono definiti:

A: angolo d'incidenza (in questo caso coincide con l'angolo d'incidenza locale, vedi succ.)

B: angolo di osservazione (look angle, il suo complementare è l'angolo di depressione)

C: asse della portata (slant range)

D: asse della distanza a terra (ground range)

Considerando invece le grandezze descrittive del segnale in rapporto allo specifico bersaglio possono essere definite le grandezze di Figura 244.

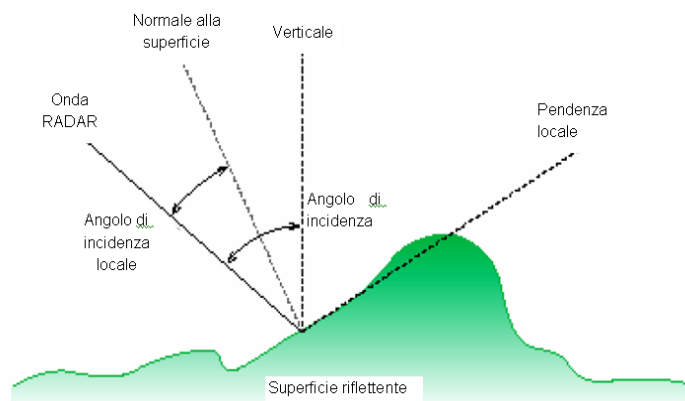


Figura 244 - Grandezze geometriche relative al bersaglio RADAR.

7.4.1 Risoluzione in distanza

Tale grandezza è relazionata alla capacità di discernimento da parte del RADAR di due bersagli contigui. E' definita come la minima distanza che deve intercorrere tra due oggetti che generano un ritorno (diffusori o scatterers) affinché il ritorno del segnale dal primo sia cessato prima che cominci il ritorno dal secondo. La risoluzione in distanza è pari alla metà del percorso dell'onda nella durata di un impulso e cioè:

$$\delta r = \frac{cT}{2} \quad (82)$$

dove:

c = velocità della luce (m/s)

T = tempo di durata di un impulso RADAR (s)

Se due diffusori distano meno della risoluzione in distanza del sistema allora genereranno ritorni parzialmente sovrapposti e quindi non facilmente distinguibili (a meno di pesanti elaborazioni, Figura 245). Diffusori “troppo vicini” sono causa della comparsa del rumore speckle nelle immagini SAR: l'entità del ritorno è data dalla somma coerente dei vettori che definiscono i ritorni di ognuno dei diffusori.



Figura 245 - Problemi di sovrapposizione dei ritorni di oggetti troppo vicini

La considerazione fatta sulla distinguibilità di due diffusori non dipende dalla loro distanza dal trasmettitore ed è facile dimostrare che la risoluzione in distanza di un sistema radar è costante nella direzione della distanza stessa (slant range). Sfortunatamente, però, la risoluzione a terra non è altrettanto costante, ma migliora all'aumentare della distanza secondo lo schema di Figura 246.

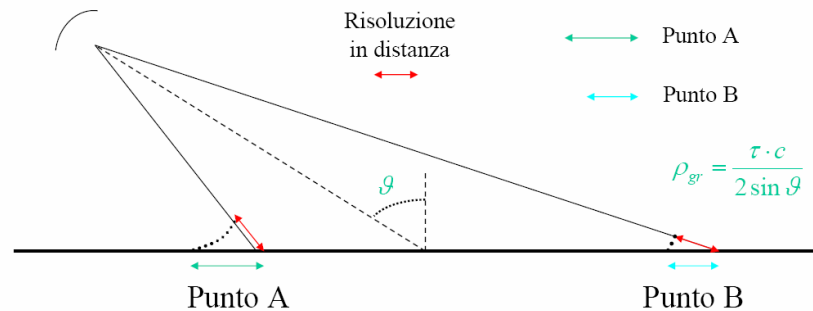


Figura 246 - Risoluzione a terra e risoluzione in distanza.

La risoluzione geometrica lungo la direzione di propagazione è determinata dalla lunghezza dell'impulso radar (τ) emesso dall'antenna che può essere calcolato conoscendo la durata dell'impulso stesso, ovvero:

$$\tau = T \cdot c \quad (83)$$

dove:

T è la durata dell'impulso [μs]

c è la velocità della luce.

Per determinare la risoluzione a terra, come si nota dalla Figura 247, sarà necessario applicare la seguente relazione:

$$R_{terra} = \frac{\tau}{2 \cos \beta} \quad (84)$$

E' importante notare che il coefficiente “2” posto a denominatore si riferisce alla possibilità che l'eco proveniente da due oggetti separati si sovrapponga; ciò avviene solamente se, lungo la linea di propagazione gli oggetti sono separati da una distanza maggiore della risoluzione in distanza.

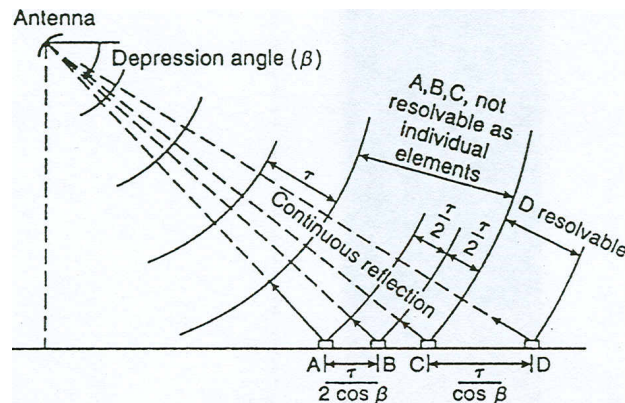


Figura 247 - Risoluzione a terra nella direzione across-track

Ne consegue che:

la risoluzione dipende dall'angolo di depressione β (è quindi maggiore nel near range);
la risoluzione aumenta al diminuire della lunghezza dell'impulso.

La risoluzione in distanza può teoricamente essere migliorata riducendo la durata dell'impulso, ma questo significherebbe:

ridurre l'energia dell'impulso, a pari ampiezza, e quindi peggiorare il rapporto segnale/rumore (S/N);
dover compensare la riduzione di durata con un corrispondente aumento dell'ampiezza, e quindi dimensionare il trasmettitore di conseguenza, con maggiori costi.

Tecniche di compressione dell'impulso e l'adozione di filtri opportuni al ricevitore consentono di raggiungere un valido compromesso.

7.4.2 Risoluzione in azimuth (longitudinale)

Per studiare la risoluzione in azimuth (cioè lungo la traccia di volo) possiamo approssimare l'antenna con un dipolo disposto lungo la direzione di moto (vedi Figura 248).

La risoluzione longitudinale o "in azimuth" è determinata dalla larghezza del fascio, e peggiora con la distanza dal sensore (e con l'altezza del sensore). L'apertura del fascio dipende dalle dimensioni dell'antenna rispetto alla lunghezza d'onda: più grande è l'antenna, più stretto è il fascio, migliore è la risoluzione. La risoluzione in azimuth può essere calcolata come segue:

$$R_{terra} = \frac{0.7 \lambda R_s}{D_a} \quad (85)$$

dove:

R_s è la distanza tra l'oggetto e l'antenna misurata lungo la direzione di propagazione
 D_a è la lunghezza dell'antenna.

Ne consegue che la risoluzione in azimuth:

migliora nel near range;
può essere migliorata diminuendo la lunghezza d'onda dell'impulso generato;
può essere migliorata aumentando le dimensioni dell'antenna.

In realtà si è fortemente limitati dal fatto che è difficile costruire e rendere stabili antenne lunghe più di 5 m, e che la capacità di attraversare la coltre nuvolosa è fortemente ridotta per lunghezze d'onda inferiori ai 3 cm.

Senza l'uso di artifici, dunque, la risoluzione raggiungibile da un sistema RADAR dipende da limitazioni tecniche piuttosto restrittive.

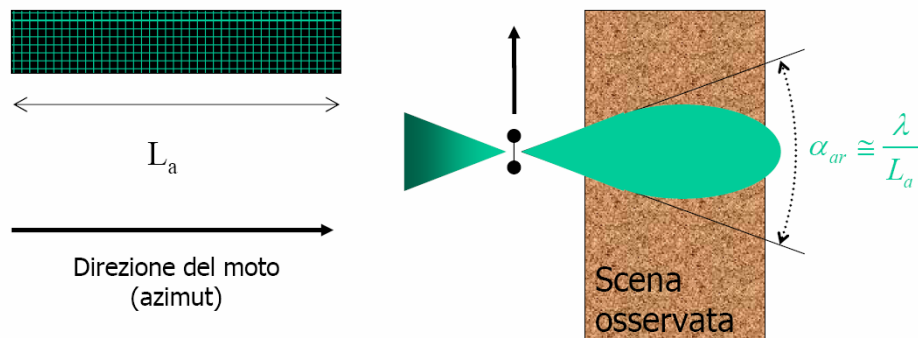


Figura 248 - Risoluzione in azimut

7.5 SAR (Synthetic Aperture RADAR)

Una soluzione per migliorare la risoluzione in azimut è ricorrere alla così detta apertura sintetica. Secondo tale tecnica il bersaglio A viene illuminato per un tempo variabile tanto maggiore quanto più è lontano dal sensore. La disponibilità di un'eco più lunga controbilancia la perdita di risoluzione dovuta alla distanza. In pratica è come disporre di un'antenna di lunghezza "B" (Figura 249).

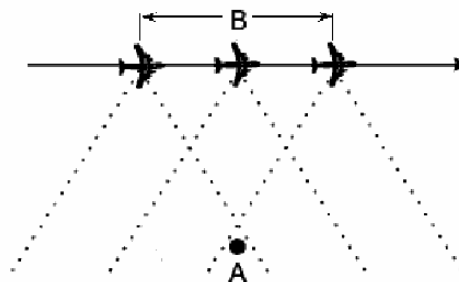


Figura 249 - Geometria SAR.

Il RADAR che sfrutta questa modalità operativa è detto SAR o Synthetic Aperture Radar. La risoluzione in azimut è teoricamente pari a metà della lunghezza dell'antenna in azimut (B). Questo è l'unico sistema per ottenere alte risoluzioni nei sistemi satellitari, ma è prevalente anche nei sistemi aviotrasportati.

Il SAR è, dunque, uno strumento costituito da un radar di tipo convenzionale (SLAR, Side Looking Airborne RADAR) montato su una piattaforma mobile (un aeroplano o un satellite). L'antenna del radar è puntata verso terra ortogonalmente alla direzione di moto della piattaforma con un angolo (laterale) compreso tra 20 e 80 gradi rispetto alla direzione di Nadir (detto di off-nadir).

Gli svantaggi principali riguardano questo tipo di tecnologia sono principalmente connessi alle pesanti elaborazioni del segnale che essa richiede, proibendo di avere un risultato immediatamente disponibile. Inoltre gli oggetti in movimento inquadrati risultano spostati.

I sistemi SAR hanno diversi possibili modi di funzionamento. I principali sono:

STRIPMAP

SCANSAR

SPOTSAR o semplicemente SPOT

7.5.1 STRIPMAP

E' il modo di funzionamento standard, utilizzato quando non servono particolari caratteristiche dei dati. Lo schema di funzionamento è quello di Figura 250.

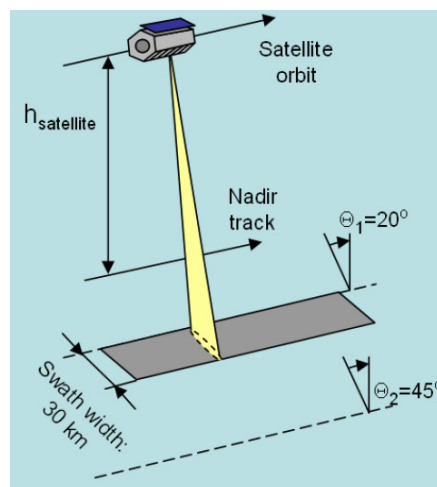


Figura 250 - Schema di acquisizione SAR STRIPMAP

7.5.2 SCANSAR

In questa modalità la larghezza della strisciata complessiva risulta scomposta in diverse sottostrisciate che vengono scandite a turno. E' utilizzata qualora necessiti una strisciata particolarmente larga, che non riuscirebbe a soddisfare i vincoli sul periodo di ripetizione degli impulsi

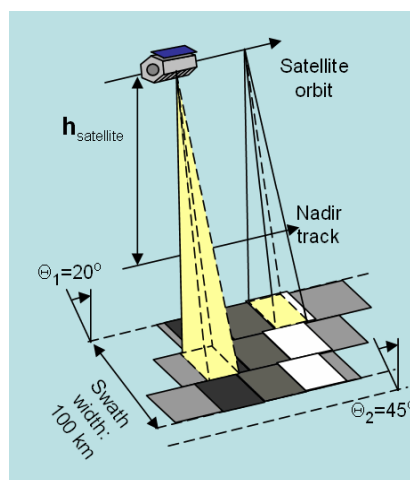


Figura 251 - Schema di acquisizione SAR SCANSAR.

7.5.3 SPOTSAR

In questa modalità, per un certo tratto dell'orbita, l'antenna punta sempre verso la stessa area della superficie terrestre. E' utilizzata quando serve una risoluzione particolarmente elevata rispetto allo standard del sistema.

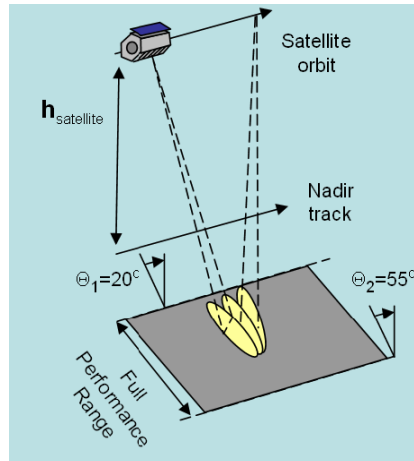


Figura 252 - Schema di acquisizione SAR SPOTSAR.

7.6 Immagini SAR

I vantaggi del SAR rispetto ai consueti sistemi ottici sono legati alla capacità di operare di notte e in presenza di nuvole (ci sono aree della terra di cui non esistono immagini ottiche da satellite a causa della copertura nuvolosa perenne); inoltre, il SAR può fornire immagini coerenti e cioè immagini contenenti sia l'informazione di intensità (relazionabile alla riflettività degli oggetti) che l'informazione di fase (relazionabile alla distanza tra bersaglio e radar). Una immagine SAR è dunque una matrice numerica i cui elementi sono numeri complessi rappresentativi dall'ampiezza e della fase del segnale retrodiffuso dalle superfici.

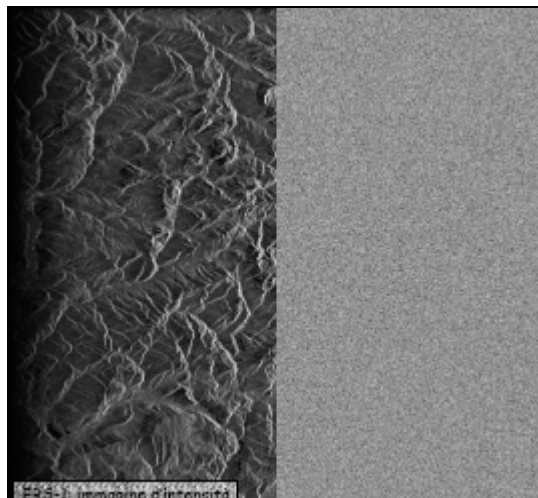


Figura 253 - Visualizzazione di una immagine radar nelle sue due componenti di ampiezza (sinistra) e fase del segnale retrodiffuso dalle superfici.

La coerenza del sistema SAR consente alcune applicazioni di grande interesse pratico, ma a causa del cosiddetto fenomeno di "speckle" visibile come una variazione casuale dell'intensità dell'immagine intorno al valor medio della retrodiffusione (lo stesso effetto di granulosità che si osserva puntando un laser su una parete non perfettamente liscia). Questa variazione è dovuta, come già precedentemente osservato, alla ricombinazione casuale dei ritorni radar dai vari retrodiffusori contenuti nella stessa cella che distano fra loro di una distanza inferiore alla risoluzione in distanza. Un esempio della differenza visibile tra un'immagine ottica e una SAR è mostrato in Figura 254.

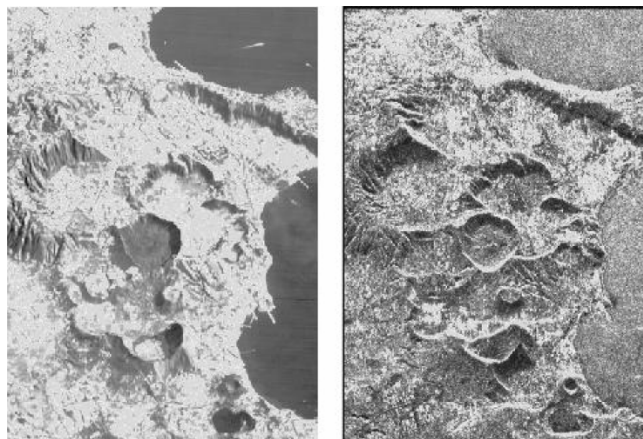


Figura 254 - Differenza tra un'immagine pancromatica ottica ed una acquisizione radar (intensità) relative alla stessa zona.

7.6.1 Deformazioni geometriche delle immagini SAR

Le due dimensioni spaziali dell'immagine SAR sono legate alla distanza degli oggetti dal sensore ("slant range") e alla posizione della piattaforma lungo la direzione di moto ("azimuth"). A causa di questa rappresentazione l'immagine SAR è affetta da deformazioni geometriche eguali a quelle di un sistema ottico che osserva la superficie terrestre con angolo di vista complementare. Gli oggetti disposti su un terreno con pendenza pari all'angolo di off-nadir (cioè parallela all'antenna del radar) risultano essere tutti alla stessa distanza dal radar e quindi rappresentati nella stessa cella (non c'è possibilità di discriminare oggetti anche molto distanti tra loro se contenuti nel piano con questa pendenza). Queste zone vengono dette di "foreshortening" (raccorciamento).

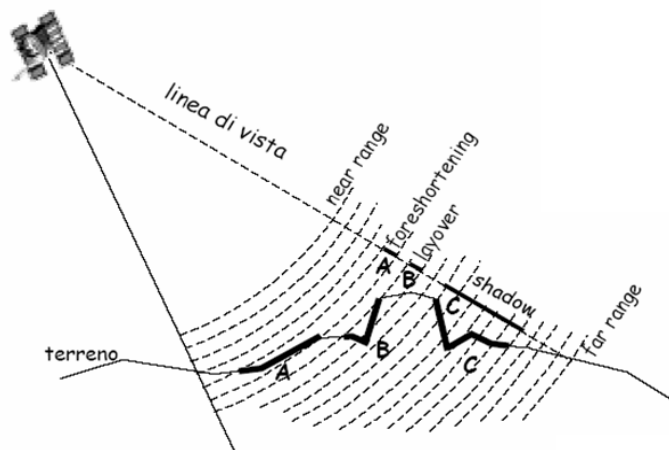


Figura 255 – Deformazioni geometriche delle immagini SAR.



Nel caso ottico, al contrario, questa disposizione consente la miglior risoluzione spaziale. Esattamente l'opposto accade per terreni con pendenza opposta dove il SAR consente la miglior risoluzione e il sistema ottico ``comprime`` tutti gli oggetti in un solo punto dell'immagine (come in una cartolina vista di profilo).

In riferimento a Figura 255 è possibile individuare le condizioni che realizzano le maggiori distorsioni da cui è affetta l'immagine radar di intensità (ampiezza).

FORESHORTENING : si verifica su quei versanti orientati verso il sensore che presentano valore dell'angolo di inclinazione del pendio inferiore al valore dell'angolo di off-nadir del satellite. L'effetto visivo è quello di una compressione delle forme che per i versanti si traduce in un loro scorciamento.

LAYOVER (inversione): si verifica su quei versanti orientati verso il sensore, ma con valore d'inclinazione del pendio superiore al valore dell'angolo di off-nadir del satellite. L'effetto sull'immagine è quello di un ribaltamento dei versanti stessi dovuto al fatto che l'eco della sommità giunge all'antenna prima di quello delle pendici.

SHADOW (mascheramento): sono le zone d'ombra cioè quelle nascoste da altri versanti alla vista del satellite. Appaiono come zone prive di informazione sull'immagine.

7.6.2 La focalizzazione

Durante il moto della piattaforma il radar emette impulsi di breve durata ad intervalli regolari. Come già precedentemente definito, la risoluzione spaziale in distanza (r , slant range) è proporzionale alla durata degli impulsi trasmessi (T). Quindi per ottenere risoluzioni in distanza inferiori a 10 metri è necessario trasmettere impulsi di durata inferiore a 66 ns o, in modo equivalente, utilizzare una banda maggiore di 15MHz. In pratica si trasmettono impulsi modulati linearmente in frequenza di durata molto maggiore che poi vengono compressi con un filtro adattato nell'elaborazione numerica dei dati. Per quanto riguarda invece la direzione di azimut, si sfrutta il moto della piattaforma rispetto agli oggetti a terra per "sintetizzare" tramite calcolatore un'antenna di dimensioni molto maggiori rispetto a quella fisica. Infatti per avere una risoluzione di 10 metri alla frequenza di 1GHz e alla distanza di 800 km (la quota delle orbite generalmente utilizzate per il SAR da satellite) sarebbe necessaria un'antenna lunga più di 10km, ovviamente non realizzabile praticamente. Il trattamento dei dati "grezzi" che consente di comprimere gli impulsi e di sintetizzare l'antenna viene indicata con il termine di "focalizzazione" SAR.

In particolare, tale operazione tiene in conto alcuni fattori operativi quali:

- le caratteristiche dell'antenna;
- il ritardo del segnale;
- il sistema trasmittente/ricevente;
- lo spostamento del sensore durante la registrazione del segnale in distanza e in azimut;
- la variazione della distanza radar-suolo;
- la presenza eventuale di linee mancanti.

La nuova immagine che ne risulta viene denominata immagine SAR SLC (Single Look Complex).

Si tratta di una matrice numerica di numeri complessi

7.6.3 Fattori che influenzano l'eco

La potenza dell'eco registrato dall'antenna dipende da proprietà delle superfici quali l'orientamento dell'oggetto inquadrato (angolo di incidenza locale), la geometria dell'oggetto, la rugosità e la costante dielettrica e da proprietà del sistema stesso di acquisizione quali la lunghezza d'onda, l'angolo di depressione, la polarizzazione e la "look direction".

L'angolo di incidenza locale condiziona la potenza del segnale ricevuto in riflessione al sensore.

Più una superficie è normale alla direzione di propagazione del segnale (angolo di incidenza elevato), maggiore è l'energia che la superficie rinvia verso il sensore. Le superfici che "guardano" in direzione nadirale il sensore appaiono più chiare delle altre all'interno di una immagine radar. Strutture che presentano una prevalenza di orientamento delle superfici avranno un aspetto differente a seconda della direzione di osservazione. Nelle scene urbane si osserva il così detto "effetto punti cardinali".

In riferimento all'orografia del terreno la differenza tra segnali provenienti da versanti illuminati e in parziale ombra radar, determina un'enfatizzazione dell'effetto orografico, permettendo nel contempo una buona interpretabilità dell'immagine.

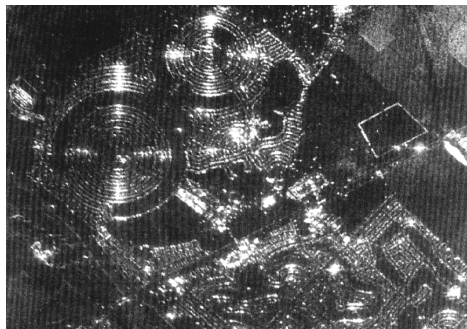


Figura 256 – Effetto "Punti cardinali" su un'immagine RADAR.

Il fenomeno di doppia riflessione si manifesta quando un'onda già riflessa da un bersaglio viene intercettata da un altro bersaglio e riflessa di nuovo verso il sensore. Se le riflessioni avvengono su superfici piane si parla di riflessione a spigolo, e l'effetto è un'onda di ritorno particolarmente forte.

La riflessione a spigolo è tipica degli ambienti urbani, e causa la comparsa di caratteristiche tessiture sull'immagine. A volte la riflessione a spigolo è causata di proposito per scopi di taratura degli strumenti (compresa la georeferenziazione delle immagini), utilizzando tetraedri aperti ("corner cube").

La rugosità delle superfici, è governata dal principio di Rayleigh che per le microonde può essere così modificato:

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin \beta} = \frac{\lambda}{8 \sin \theta} \quad (86)$$

dove:

h è l'altezza media del microrilievo;

λ è la lunghezza d'onda del segnale;

β è l'angolo di depressione;

θ è il "look angle".



Figura 257 – A destra: principio di riflessione a spigolo. A sinistra un esempio di “corner cube” e la sua rappresentazione all’interno dell’immagine radar.

Una superficie può essere considerata liscia se:

$$h < \frac{\lambda}{25 \sin \beta} = \frac{\lambda}{25 \sin \theta} \quad (87)$$

Mentre una superficie può essere considerata rugosa se:

$$h > \frac{\lambda}{4.4 \sin \beta} = \frac{\lambda}{4.4 \sin \theta} \quad (88)$$

La costante dielettrica (ϵ) dipende dalle caratteristiche elettriche del materiale e ne misura la capacità di condurre energia elettromagnetica nella banda delle microonde; cresce con la conducibilità della superficie riducendo la capacità di penetrazione del segnale.

In generale, la costante dielettrica aumenta con l'aumentare del contenuto d'acqua della superficie.

La polarizzazione è una caratteristica di fondamentale importanza per quanto riguarda l'intensità dell'eco. La polarizzazione di un segnale elettromagnetico dipende dalla posizione dei due piani che contengono la componente magnetica e quella elettrica del segnale. Il vantaggio dei sistemi attivi è quello di potere modulare il segnale e di inviarlo con una determinata polarizzazione (orizzontale - H, o verticale - V); osservando il ritorno registrato e valutandone la polarizzazione è possibile dedurre informazioni circa le caratteristiche della superficie colpita dal segnale (sia dal punto di vista geometrico che di ruvidità).

Il segnale può quindi essere modulato e ricevuto con diverse polarizzazioni, ovvero:

- A**, modulato orizzontalmente e ricevuto orizzontalmente
- B**, modulato verticalmente e ricevuto verticalmente;
- C**, **HV**, modulato orizzontalmente e ricevuto verticalmente
- D**, **VH**, modulato verticalmente e ricevuto orizzontalmente

L'intensità dell'eco in sistemi a polarizzazione **HH** o **VV** è tanto maggiore quando le superfici presentano lo stesso orientamento dell'onda e.m. polarizzata. Per esempio, nel caso di coperture vegetali, la polarizzazione verticale è molto sensibile ai tronchi delle superfici alberate a causa della loro verticalità, mentre la polarizzazione orizzontale registra un'eco più intenso dalla copertura fogliare.

La "look direction" determina, come già mostrato, l'angolo ϕ , con intensità massima dell'eco quando $\phi = 90^\circ$ minimizzandosi per $\phi = 0^\circ$.

La penetrazione atmosferica e delle superfici dipende fortemente dalla lunghezza d'onda. Per quanto riguarda la penetrazione delle superfici, si può affermare che:

la penetrazione aumenta con λ ;

la penetrazione diminuisce con l'aumentare di ε (incremento dell'umidità).

L'effetto di diffusione del volume è collegato ai processi di diffusione multipla all'interno di un mezzo, quale la chioma degli alberi di una foresta; può avere luogo anche in strati di suolo molto asciutto, sabbia o ghiaccio. In tal caso il radar riceve il ritorno sia dalle superfici sia dai volumi, dunque occorre tenere conto di quest'ultima componente. L'intensità della diffusione dal volume dipende dalle proprietà fisiche del mezzo (variazioni della costante dielettrica) e dalle caratteristiche del sistema radar (lunghezza d'onda, polarizzazione ed angolo d'incidenza).

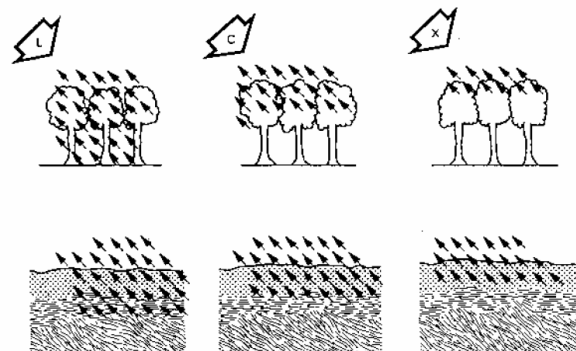


Figura 258 – Effetto di diffusione del volume.

7.7 Tecniche di elaborazione dei dati SAR

Sulla base delle misure di ampiezza e fase del segnale retrodiffuso dalle superfici e registrate sotto forma di numeri complessi all'interno delle matrici immagine, le applicazioni territoriali dei dati SAR da satellite e/o aereo possono essere suddivise in due categorie:

quelle di identificazione e studio delle superfici;
quelle di misura delle superfici.

Le prime affrontano problemi di classificazione del territorio, sfruttando come discriminanti l'intensità del segnale registrato e le sue eventuali polarizzazioni.

Le seconde si occupano invece di misurare le superfici, dandone descrizione tridimensionale attraverso misure di distanza condotte attraverso l'analisi delle fasi.

In entrambi i casi, ruolo fondamentale ed ancora discusso, è quello assegnato alla correzione geometrica del dato, la cui natura originale risulta, come visto, fortemente compromessa.

7.7.1 Interferometria SAR

L'interferometria SAR utilizza due immagini SAR relative alla stessa scena acquisite da posizioni leggermente diverse. Le acquisizioni possono riferirsi anche a periodi diversi.

Il primo caso è tipicamente quello degli interferometri fisici (doppia antenna) montati a bordo di piattaforme aeree e sulla missione SRTM Shuttle della NASA.

La tecnica interferometrica a doppia (o multipla) passata è quella, invece, più comunemente utilizzata con sensori SAR satellitari (a singola antenna), in cui è possibile sfruttare l'acqui-

sizione a tempo differito sul lungo periodo, per ottenere informazioni sulla dinamica della superficie. La tecnica interferometrica consente di ottenere la descrizione tridimensionale della scena osservata, con un grado di accuratezza che dipende dalla lunghezza d'onda radar utilizzata e dalla linea di base (distanza) tra le due posizioni di presa, e di seguirne l'evoluzione temporale con una sensibilità agli spostamenti coerenti del suolo dell'ordine della mezza lunghezza d'onda.

7.7.1.1 Interferometria SAR per la generazione di DEM

L'Interferometria SAR rende possibile la generazione e l'aggiornamento di modelli digitali del terreno (**DEM**) con risoluzioni planimetriche che dipendono dalle caratteristiche dello strumento utilizzato (tipicamente intorno ai 20 m) e precisioni assolute, nella determinazione delle quote, dell'ordine di qualche metro. Operativamente, tale operazione consiste nel calcolare la differenza di fase pixel a pixel tra due immagini SAR di una stessa scena, acquisite in condizioni geometriche analoghe. L'interferogramma è l'immagine che rappresenta le differenze di fase di ogni pixel tra i due passaggi (Figura 261).

Se le caratteristiche di retrodiffusione della superficie sono rimaste invariate nelle due immagini (elevata coerenza), la fase di ogni pixel dell'immagine SAR contiene l'informazione relativa alla distanza (R) tra il sensore e la superficie terrestre in quel punto: $\phi = 4\pi R/\tilde{\lambda}$

Dette R_1 ed R_2 le distanze tra due satelliti e un punto a terra (Figura 259), i segnali ricevuti hanno le seguenti espressioni:

$$S_1 = A_1 e^{-j4\pi R_1/\tilde{\lambda}} \quad S_2 = A_2 e^{-j4\pi R_2/\tilde{\lambda}} \quad (89)$$



Figura 259 –Schema di acquisizione interferometrica SAR e grandezze coinvolte (da www.smfn.unical.it).

Si definisce fase interferometrica o interferogramma la mappa delle differenze di fase pixel a pixel tra i segnali in S_1 ed S_2 , ovvero:

$$S_1 S_2^* = A_1 A_2 e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2)} \quad (90)$$

La fase contiene l'informazione della distanza trasmettitore-oggetto (target), essendo proporzionale ad essa secondo l'espressione:

$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (91)$$

Il prodotto espresso dalla (90) permette quindi di isolare la fase del segnale radar e di estrarre l'informazione relativa alla distanza misurata dal segnale stesso.

Per determinare la quota corrispondente alla cella esaminata è sufficiente conoscere la distanza tra i due satelliti (*baseline* geometrica) al momento dell'acquisizione della stessa porzione di territorio. La distanza tra i due satelliti risulta proporzionale alla differenza di quota che corrisponde ad una variazione di fase pari a 2π . Al crescere della *baseline*, quindi, si riduce la variazione di quota corrispondente ad un ciclo di fase.

7.7.1.2 Fase topografica

Ciascun ciclo di fase (in figura è un ciclo di colori) è simile ad una isoipsa, denominata franja interferometrica. Si tratta di curve di livello di fase. Calcolato il valore della fase stessa lungo tale curva si ottiene il corrispondente valore di quota.

La variazione di quota, per ciascun ciclo di fase, si riduce al crescere della *baseline* (B), ovvero della distanza tra i due satelliti al momento in cui acquisiscono l'immagine SAR.

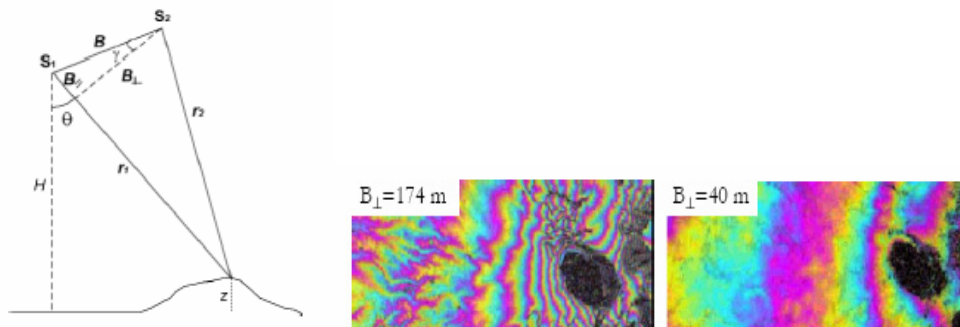


Figura 260 – Geometria della presa interferometrica per la determinazione della quota (sinistra) ed effetto della baseline geometrica sulle franje interferometriche (destra).

7.7.1.3 Interferometria Differenziale SAR (DInSAR, Differential SAR Interferometry)

Come già ricordato un'immagine SAR è definita da numeri complessi rappresentativi dall'ampiezza e della fase del segnale retro-diffuso dalle superfici. Ciascun valore corrisponde ad un punto al suolo: l'ampiezza individua la quantità di campo elettromagnetico retro-diffusa verso il satellite, mentre la fase dipende da diversi fattori, tra cui la distanza sensore-bersaglio.

L'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) è una tecnica interferometrica che può essere efficacemente impiegata per misurare e mappare gli spostamenti superficiali legati a dinamiche idrogeologiche. Infatti la fase interferometrica risulta da due contributi: la topografia della scena osservata, e l'eventuale deformazione del terreno incorsa nell'intervallo di tempo che separa le due acquisizioni. Sottraendo la componente topografica (utilizzando un DEM esterno o derivato per interferometria classica) è possibile stimare la componente dovuta allo spostamento.

Purtroppo le misure sono affette da una serie di fattori che rappresentano contributi aggiuntivi (disturbanti) al valore di fase interferometrica registrato (componenti atmosferiche, imprecisione dei dati orbitali, decorrelazione); questi possono ridurre fortemente la precisione e l'applicabilità della tecnica. La decorrelazione temporale è dovuta alle variazioni delle caratteristiche della diffusione delle onde elettromagnetiche (scattering). In particolare, nelle aree montane, caratterizzate da una vegetazione bassa, le immagini SAR mostrano una coerenza relativamente alta solo durante la stagione estiva, con copertura nevosa nulla. Ma anche per le aree urbanizzate a quote medio-alte (circa 1.000 m s.l.m.) una copertura di neve umida può causare una decorrelazione di fase.

La decorrelazione spaziale impedisce l'interpretazione delle fasi interferometriche di oggetti molto estesi in coppie d'immagini caratterizzate da baseline geometriche lunghe (definite distanza fra le due orbite percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini).

Altre limitazioni sono legate alle distorsioni geometriche (shadow e layover) dovute alla particolare geometria di acquisizione del sensore, che possono falsare la topografia della scena osservata soprattutto nelle aree montuose.

Al contrario, la tecnica di analisi interferometrica per l'individuazione e quantificazione degli spostamenti trova una miglior applicazione su quei pendii orientati perpendicolarmente alla direzione di osservazione del SAR. Queste problematiche rendono quindi possibile ed efficace l'applicazione delle tecniche SAR solo in aree delimitate ed in determinati periodi dell'anno. Al fine di limitare gli effetti negativi della decorrelazione spaziale e temporale occorre utilizzare coppie differenziali con baseline corta (pari a circa 100 m) e scegliere le immagini fra quelle acquisite in assenza di copertura nevosa, riducendo, in questo modo, il numero di immagini disponibili per lo studio. Un passo critico della catena di elaborazione dell'interferometria SAR è il cosiddetto srotolamento (phase unwrapping) della fase degli interferogrammi. Questo passo è necessario per ottenere misure quantitative degli spostamenti, ed è reso particolarmente difficile dalla presenza di terreni accidentati. In ultima analisi, dunque, l'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili ad altri disturbi, ovvero stimare accuratamente la differenza di cammino ottico dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retro-diffusa dal medesimo bersaglio a terra. Sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra, viene prodotto un interferogramma (Figura 261). Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio e quindi da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore).

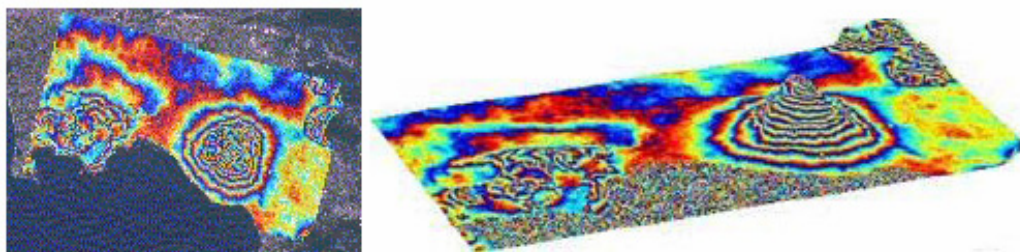


Figura 261 - Napoli e il Vesuvio: interferogrammi di fase; a destra immagine 3D (da <http://www.treuropa.com/>).

7.7.1.4 Limiti dell'approccio interferometrico differenziale tradizionale

L'analisi DInSAR non è diventata uno strumento operativo di analisi e monitoraggio molto diffuso per i diversi effetti che ne riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati.



In primo luogo, i fenomeni di decorrelazione temporale che sono causati dalla variazione delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar nel tempo: in questo caso l'ipotesi che il contributo di riflettività si elida, generando l'interferogramma, non è più verificata. Questi fenomeni risultano più marcati al crescere dell'intervallo di tempo (baseline temporale) tra le due acquisizioni utilizzate. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo (cambiamenti possono essere causati anche da altri eventi atmosferici quali pioggia o neve).

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini; si parla in questo caso di baseline normale o geometrico. Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto del baseline, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo tipo di disturbo prende il nome di decorrelazione geometrica. L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni, tradotta in un ulteriore termine di fase difficile da discriminare dal contributo relativo a eventuali fenomeni di movimento.

Un'attenta analisi bibliografica porta comunque alla conclusione che, con l'interferometria SAR tradizionale, si è in grado di stimare movimenti dell'ordine del centimetro, ma in genere non è possibile effettuare stime puntuali, solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in essere (estensione $> 0.2 \text{ km}^2$)¹⁹.

7.7.1.5 *Tecnica interferometrica PS*

La tecnica dei Diffusori Permanenti (Permanent Scatterers, PS) costituisce oggi uno strumento alternativo per il monitoraggio di fenomeni di deformazione lenta della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari. Essa permette di superare i limiti legati agli approcci più convenzionali dell'interferometria SAR, utilizzati per l'identificazione delle deformazioni superficiali.

L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti (Permanent Scatterers, PS o Punti di Misura Permanente, PMP), risulta praticamente immune agli effetti di decorrelazione. Essi mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando quindi l'informazione di fase del segnale nel tempo. Questa proprietà dei PS consente di superare gran parte delle limitazioni legate all'analisi DInSAR convenzionale. I PS sono tipicamente rappresentati da parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, e comunque da elementi già presenti al suolo, per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione. Tale comportamento non è per esempio proprio della vegetazione, soggetta a continue variazioni.

La procedura di elaborazione si basa sull'analisi statistica della serie di immagini relative ad una data area, intesa alla selezione, sulle stesse, dei PS che, dunque, coincidono con specifiche celle delle immagini analizzate.

In corrispondenza dei PS infatti è possibile stimare sia l'entità del disturbo dovuto all'atmosfera terrestre, sia le possibili deformazioni superficiali della zona in esame. Specifici algoritmi si occupano della rimozione del disturbo atmosferico dai dati e della successiva misura degli spostamenti relativi ai PS.

¹⁹ Da <http://www.treuropa.com/>



Si può immaginare l'insieme dei PS come una rete di stazioni GPS (Global Positioning System) naturali intese al monitoraggio di vaste aree di interesse con una frequenza di aggiornamento del dato mensile e con una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata (in aree urbane 100-300 PS/km²).

Benché altre istituzioni e aziende posseggano competenza in tale settore ed abbiano sviluppato algoritmi di elaborazione personalizzati, dal punto di vista strettamente legale, la tecnica PS risulta in concessione di licenza esclusiva (dal 2000) della T.R.E. S.r.l (Milano, Italia). Gli algoritmi sono stati sviluppati e brevettati presso il Politecnico di Milano.

In riferimento ad altri fornitori della tecnica è possibile sentir parlare di IPTA (Interferometric Point Target Analysis) in sostituzione di PS. Il cuore del brevetto della Tecnica PS risiede nella capacità di stimare correttamente e compensare il disturbo atmosferico che limita le applicazioni interferometriche, svolgendo un'analisi dettagliata solo sul sottoinsieme di PS accuratamente selezionati secondo valutazioni statistiche. Stimato il contributo atmosferico è possibile individuare tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminare i termini spuri e isolare il termine che descrive la variazione di cammino ottico dell'onda elettromagnetica nelle varie acquisizioni, cioè descrivere i movimenti che ha subito il bersaglio nell'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile. Per eseguire stime accurate dei disturbi atmosferici è necessario che la densità spaziale di PS sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 PS/km²), vincolo sempre verificato in aree urbane avvalendosi di dataset consistenti in almeno 25-30 immagini ERS. In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale di PS raggiunge valori molto alti: 100 – 400 PS/km².

I PS vengono correttamente posizionati nella cella di risoluzione al suolo e in corrispondenza di ciascuno si effettua una misura di deformazione per ogni acquisizione disponibile, con accuratezza sino a 1-2 mm su ogni singola misura (per i punti migliori). Si è quindi in grado di ricostruire il trend medio di deformazione annua, con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno. L'accuratezza è funzione del numero di immagini e della "qualità" del PS stesso, cioè di quanto l'informazione di fase disponibile presso il PS è immune ai fenomeni di disturbo. Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (LOS, Line of Sight), e sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra di coordinate note e supposti fermi o espressamente indicati ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica. Nel caso di totale assenza di bersagli radar con caratteristiche di PS, è possibile installare (come già precedentemente accennato) degli specifici riflettori artificiali che, per caratteristiche costruttive, si comportano da capisaldi radar. Si tratta in genere di manufatti in metallo passivo. Non richiedono particolare manutenzione e, successivamente al periodo dell'installazione, sono identificabili e monitorabili da satellite tramite SAR.

Sono già stati progettati e utilizzati con successo le seguenti tipologie di riflettore artificiale:

DIEDRO: è composto da due superfici metalliche quadrate di 100 cm di lato, disposte a 90 gradi.



Figura 262 – Riflettori artificiali (da <http://www.treuropa.com/>) di tipo DIEDRO.

CORNER: si tratta di un triedo cavo, di lato pari a circa 170 cm, adatto ad installazioni extra-urbane.

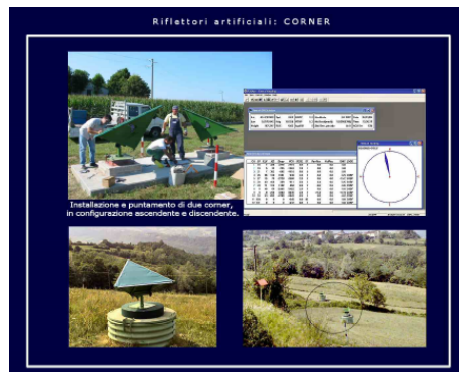


Figura 263 - Riflettori artificiali (da <http://www.treuropa.com/>) di tipo CORNER.

PLANAR: è composto da un'unica lastra quadrata di circa 120 cm di lato, che meglio si adatta ad una collocazione in ambiente urbano, grazie al più limitato impatto ambientale.



Figura 264 - Riflettori artificiali (da <http://www.treuropa.com/>) di tipo PLANAR.

7.7.1.5.1 Punti di forza della tecnica PS

In generale, la Tecnica PS presenta i seguenti vantaggi rispetto all'analisi DInSAR convenzionale:

- possibilità di misure puntuali;



- misure differenziali con accuratezza elevata. Per quanto riguarda il trend di deformazione sono possibili misure di velocità media fino a 0,1 mm/anno. Per quanto riguarda la precisione sulla singola misura è possibile apprezzare spostamenti verticali fino a 1 mm e spostamenti planimetrici fino a 1 cm;
- stima e rimozione dei contributi atmosferici;
- presenza di un archivio storico (dal 1992), da cui la possibilità di indagini su fenomeni passati;
- abbattimento dei costi e dei tempi di indagine su larga scala per la zonizzazione del territorio;
- integrabilità in ambiente GIS;
- applicazioni sinergiche con altre tecniche di rilevamento;
- accuratezza verticale delle misure superiore rispetto alla tecnica GPS;
- elevata densità spaziale di capisaldi radar (in area urbana fino a ~400 PS/Km²), già presenti sul territorio.

7.7.1.5.2 Punti di debolezza della tecnica PS

È importante sottolineare anche i limiti della tecnica PS:

gli spostamenti sono misurati lungo la direzione LOS, cioè approssimativamente lungo la verticale, salvo il caso di analisi ad hoc di diverse geometrie di acquisizione. E' pertanto richiesta una successiva scomposizione del vettore spostamento nelle componenti orizzontale e verticale;

per portare a termine con successo l'analisi PS è necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte);

per l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (ad es. un improvviso fenomeno di subsidenza), il problema legato all'ambiguità di fase può complicare notevolmente l'interpretazione dei risultati come in tutti i sistemi di tipo coerente. La tecnica interferometrica SAR consente infatti di valutare con accuratezza millimetrica variazioni di distanza sensore-bersaglio pari ad una frazione della lunghezza d'onda (5.66 cm per i satelliti ESA-ERS), ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono "equivocati" ovvero non è possibile "contare" il numero intero di lunghezze d'onda all'interno dei quali essi sono avvenuti. E' come se si misurassero i decimali e non gli interi dello spostamento. Al limite, se il bersaglio si muovesse esattamente di mezza lunghezza d'onda (2.8 cm per i satelliti ERS) non risulterebbe possibile misurare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo;

il tempo di rivisitazione dei satelliti ERS (revisiting time) pari a 35 giorni impedisce inoltre di osservare situazioni di pericolo che richiedono un monitoraggio in tempo reale.

Tali limitazioni, dal punto di vista operativo producono i seguenti effetti:

moti rapidi (superiori a 1 cm/35 giorni) non possono essere monitorati senza informazioni "a priori";

il monitoraggio in "tempo reale" è impossibile: frequenza del dato (35 giorni) anche se è possibile integrare più geometrie di acquisizione;

la misura in aree senza bersagli radar non è possibile (a meno di prevedere il posizionamento di capisaldi artificiali; in tal caso però cade il vantaggio dell'archivio storico);

la precisione della densità dei PS su aree non urbane risulta di difficile realizzazione;

il processo di elaborazione affinché sia robusto necessita di una quantità minima di immagini radar pari a 25-30;

il carico computazionale è elevato.



7.7.1.5.3 Incertezza di posizionamento planimetrico

In aggiunta alle limitazioni precedentemente esposte e dichiarate dai detentori della tecnica, persiste il problema del corretto posizionamento planimetrico dei PS in un sistema di riferimento opportuno, la cui quantificazione può essere affettuata soltanto attraverso opportune verifiche di collaudo a posteriori. Le celle delle immagini radar utilizzate oggi da questa tecnica (immagini ERS) possiede infatti una risoluzione geometrica al suolo di 25 m, il che confina all'interno di tale area l'entità minima dell'errore di posizionamento planimetrico. Tale valore può tuttavia essere ulteriormente peggiorato da incertezze connesse al processo di correzione geometrica e georeferenziazione del dato. In particolare per immagini relative ad aree montane caratterizzate da forti distorsioni dovute agli effetti di foreshortening e layover il processo di correzione geometrica risulta pesantemente condizionato dalla precisione del dato altimetrico di supporto e dalla precisione con cui sono noti i parametri geometrici di sistema del satellite.

Esistente pertanto una incertezza di posizionamento planimetrico esterna alla cella (dove è posta la cella?) ed una interna alla cella stessa (il bersaglio cui il segnale di ritorno si riferisce dove è posto all'interno della cella?).

Tale difficoltà, la cui risoluzione risulterebbe difficile considerando tutte le celle dell'immagine radar (problema di georeferenziazione della scena), può essere talvolta, e solo per alcuni PS, superata utilizzando ortofoto aeree dell'area per il riconoscimento visivo di elementi del territorio, prossimi alla posizione stimata della cella PS, che potrebbero costituire il PS stesso.

7.7.1.5.4 Possibili miglioramenti della tecnica PS

I risultati ottenibili con la tecnica PS possono ulteriormente essere migliorati e ampliati in differenti modi. In primo luogo accedendo ad archivi di immagini RADAR alternativi a quello storico ERS. In particolare è possibile accedere ai dati radar del satellite canadese RADARSAT, il cui sensore SAR presenta però caratteristiche di acquisizione differenti rispetto a ERS.

T.R.E. è in grado di utilizzare data-set composti da immagini acquisite da RADARSAT per stimare le velocità di deformazione dei bersagli a terra. La differente geometria di acquisizione di RADARSAT rispetto a ERS porta maggiori informazioni sulle velocità di deformazione (riferite sempre alla direzione sensore-bersaglio) e quindi una più vasta conoscenza del fenomeno in atto. RADARSAT ha differenti tipi di acquisizione rispetto ai satelliti ERS: oltre agli usuali data-set che coinvolgono la zona di interesse (ascendente, discendente ed eventualmente un terzo data-set) ha anche una modalità detta "fine beam" con una migliore risoluzione a terra (che può arrivare agli 8 m). Questo satellite acquisisce ogni 24 giorni indipendentemente dalla geometria di acquisizione.

La diversa geometria di acquisizione di RADARSAT (che ha anche la possibilità di acquisire con diversi LOS), può consentire l'identificazione di PS differenti rispetto a quelli individuabili sulle immagini ERS.

La possibilità di avere a disposizione sia dataset ERS sia dataset RADARSAT consente, in un'ottica di monitoraggio, di osservare la zona di interesse una volta alla settimana circa.

L'utilizzo di riflettori artificiali può essere prevista al fine di poter monitorare una zona sprovvista di PS naturali ed in ogni caso per supportare l'operazione di correzione geometrica e georeferenziazione delle scene e dei PS.

Con l'utilizzo di più dataset di immagini radar, tipicamente uno in nodo ascendente ed uno in nodo discendente del satellite, è inoltre possibile procedere alla risoluzione dell'incertezza riguardante la componente orizzontale del moto dei PS.

La combinazione dei risultati ottenuti dall'elaborazione dei dataset discendente e ascendente consente infatti di scomporre il vettore di velocità stimato (orientato lungo la LOS del satellite, e cioè inclinato di circa 23° rispetto alla verticale) nelle sue componenti di deformazione verticale ed orizzontale (nel sistema cartografico di riferimento). Infatti, se il fenomeno di deformazione che interessa l'area in esame ha delle significative componenti orizzontali, i valori di velocità individuati dall'analisi delle due geometrie di acquisizione ascendente e discendente risultano diverse, come illustrato in Figura 265 (sinistra).

Si consideri un PS individuato sia nel data-set discendente che su quello ascendente, e che quindi corrisponde alla stessa struttura a terra: si avranno a disposizione per questo punto le corrispondenti velocità v_{desce} e v_{asce} stimate da due punti di vista diversi.

I dati orbitali del satellite consentono di valutare i coseni direttori (s_x , s_y , s_z) associati alla coppia sensore-bersaglio, che descrivono l'orientamento della LOS nelle due geometrie rispetto al sistema di riferimento [Nord (N), Est (E), Quota (Z)] mostrato in Figura 265 (destra).

La velocità stimata può essere espressa come:

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{S}_x + v_y \mathbf{S}_y + v_z \mathbf{S}_z \quad (92)$$

dove v_x , v_y e v_z sono le proiezioni del vettore velocità lungo le direzioni E, N, Z.

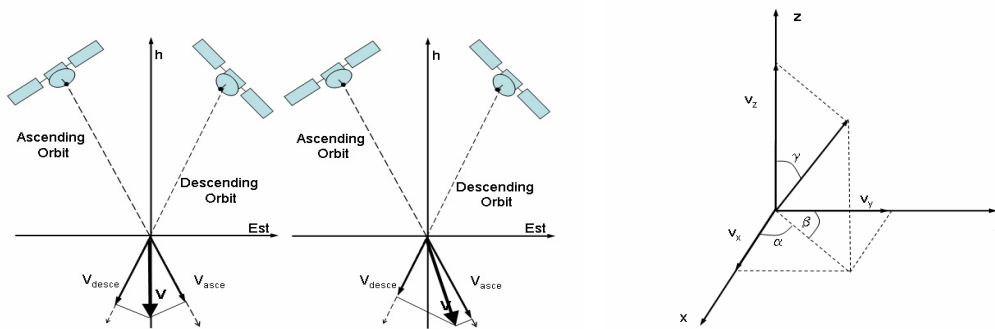


Figura 265. (sinistra): differenti punti di vista della velocità. Se il punto si muove solo lungo la direzione verticale, le proiezioni del moto lungo la LOS sono identiche per entrambe le geometrie; se il moto ha invece anche una componente orizzontale, le proiezioni risultano sensibilmente differenti.(destra): scomposizione delle componenti di velocità

Sfruttando le due stime di velocità derivanti dall'elaborazione delle due diverse geometrie di acquisizione, si può scrivere il seguente sistema:

$$\begin{cases} v_{asce} = v_x s_{xasce} + v_y s_{yasce} + v_z s_{zasce} \\ v_{desce} = v_x s_{xdesce} + v_y s_{ydesce} + v_z s_{zdesce} \end{cases} \quad (93)$$

Il sistema presenta un'incognita in più del numero di equazioni disponibili e non è quindi risolvibile, ma si può osservare che a causa della direzione dell'orbita del satellite il sistema risulta molto poco sensibile alle deformazioni in direzione Nord-Sud. Trascurando quindi il termine v_y si ottiene un sistema risolvibile che consente di valutare la deformazione in direzione Est-Ovest e in direzione verticale.



Si ricorda, infine, che tutte le misure effettuate tramite la tecnica PS sono di tipo differenziale. Ciò significa che tutte le stime vengono riferite ad un unico punto, che possiede ottime caratteristiche radiometriche, supposto fermo. Se si avesse a disposizione informazione di movimento per questo punto supposto stabile la correzione della velocità degli altri punti potrebbe essere fatta facilmente sommando algebricamente le velocità stimate e l'informazione relativa al punto di riferimento.

7.7.1.5.5 Standard Permanent Scatterers Analysis (SPSA) e Advanced Permanent Scatterers Analysis (APSA)

La tecnica di analisi SPSA viene applicata allo studio di estese porzioni di territorio (almeno 100 km²) per identificare potenziali fenomeni di instabilità superficiale il cui controllo di dettaglio è affidato a successive indagini di campo.

Il procedimento richiede un ridotto impiego temporale ed una limitata conoscenza informatica da parte dell'operatore incaricato.

La SPSA consente:

- l'identificazione dei punti di riferimento (PS);
- il calcolo delle relative coordinate geografiche;
- la stima dei loro movimenti relativi e della velocità degli spostamenti su base temporale differente al fine di conoscere le indicative variazioni dei fenomeni franosi in atto.

La tecnica di analisi APSA viene invece utilizzata per lo studio di aree con estensione relativamente modesta (fino a 20 km²) dove è richiesta una maggior quantità di informazione ad elevato contenuto qualitativo. Questa tecnica necessita però di un elevato grado di specializzazione da parte degli utilizzatori per poter identificare i PS caratterizzati da alti valori di coerenza dove gli errori legati allo srotolamento della fase interferometrica sono piuttosto improbabili.

Questa tecnica consente:

l'aumento della densità dei punti PS;

l'analisi di una completa serie multitemporale di punti di riferimento di interesse.

Per meglio caratterizzare l'area in esame e per migliorare e perfezionare l'analisi interferometrica e l'utilizzo di modelli cinematici da applicare alle masse in movimento, prima di applicare la tecnica APSA, sono necessari studi geologici, geomorfologici e geotecnici svolti sia direttamente sul terreno, sia attraverso lo studio dello stato dell'arte, coinvolgendo anche le amministrazioni locali.

7.7.2 Correzione geometrica di immagini SAR

La correzione geometrica rigorosa di immagini SAR e la loro georeferenziazione, al pari di quelle ottiche, richiede un approccio tridimensionale comparabile all'operazione di ortoproiezione. Pertanto alcune iparametri fondamentali relativi al sensore ed alla topografia devono essere comunicati. A seconda del sensore SAR cui si riferisce l'immagine (RADAR-SAT, ERS, JERS, etc.) i parametri vengono comunicati in modi ed unità di misura differenti. In generale, tuttavia, i parametri richiesti possono essere così definiti:



Parametri necessari all'ortoproiezione di dati SAR	Unità di misura
Numero di righe dell'immagine= numero di righe in azimuth)	
Tempo di inizio acquisizione della scena	sec
Tempo di registrazione della prima effemeride. Tale parametro può essere modificato in fase di stima dei parametri della trasformazione	sec
Tempo originale (non soggetto a variazione in fase di stima) di registrazione della prima effemeride	
Intervallo di tempo originale (non soggetto a variazione in fase di stima) tra due registrazioni successive delle effemeridi	sec
Intervallo di tempo tra due registrazioni successive delle effemeridi . Tale parametro può essere modificato in fase di stima dei parametri della trasformazione.	sec
Intervallo di tempo di acquisizione della scena (image duration)	sec
Semi-asse maggiore dell'ellissoide utilizzato durante il processamento	m
Semi-asse minore dell'ellissoide utilizzato durante il processamento	m
Quota teorica di acquisizione riferita all'ellissoide di riferimento (target height).	m
Direzione di puntamento del sensore (look side). Anche chiamato sensor clock angle: - 90° a sinistra, +90° a destra.	deg
Lunghezza d'onda del sensore	m
Frequenza di campionamento del segnale	Hz
Risoluzione geometria delle celle (Slant o Ground range)	m
risoluzione della cella più prossima (near slant range)	m
Numero complessivo di registrazioni delle effemeridi	
Tipo di proiezione in cui è fornita l'immagine (Slant or ground)	
Coefficienti della trasformazione polinomiale tra Ground and Slant range utilizzata quando l'immagine viene fornita in ground range	
Direzione di avanzamento del tempo rispetto alle colonne(range)	
Direzione di avanzamento del tempo rispetto alle righe (azimut)	
Posizioni (x, y, z) del satellite espresse nel sistema Earth Fixed Body.	m
Velocità del satellite (vsx, vsy, vsz espresse nel sistema Earth Fixed Body.	m/sec
Coefficienti utilizzati per modellizzare la posizione del satellite in funzione del tempo	
Coefficienti utilizzati per modellizzare la velocità del satellite in funzione del tempo	

L'algoritmo di ortoproiezione delle immagini SAR a cui si fa riferimento in questo documento è quello utilizzato all'interno del software commerciale ERDAS IMAGINE 9.0 della Leica Geomatics.

Il processo segue le seguenti fasi:

- modellazione delle effemeridi intesa a definirle compiutamente per tutte le celle dell'immagine ed eventuale rifinitura dei valori comunicati in fase di acquisizione delle immagini attraverso l'ausilio di punti di appoggio riconoscibili sulla scena;
- generazione di una griglia sparsa di coordinate terreno da assegnare alle celle dell'immagine;
- generazione dell'immagine SAR corretta dalle distorsioni originarie (incluse quelle dovute alla topografia)

7.7.2.1 Modellazione delle effemeridi

La procedura prevede che i valori di posizione e velocità del satellite siano riferiti al cosiddetto sistema Earth Fixed Body (EFB). Nel caso essi siano riferiti ad un sistema inerziale di coordinate (IRS) è necessario procedere alla loro conversione nell'EFB. L'EFB è un sistema di riferimento cartesiano geocentrico che ruota con la Terra. L'asse X è individuato dall'intersezione del piano equatoriale con il piano meridiano di longitudine 0°. L'asse Z

concede con l'asse di rotazione terrestre con verso positive verso il polo Nord geografico. L'asse Y completa la terna cartesian destrorsa.

Le effemeridi sono descritte dai valori di posizione e velocità del satellite registrate ad intervalli di tempo regolari. Per poter predire le effemeridi al generico tempo t occorre modellizzare nel continuo le osservazioni comunicate. Il modello predittivo utilizzato è quello che segue:

$$\begin{aligned}
 R_{s,x} &= a_1 + a_2 t + a_3 t^2 \\
 R_{s,y} &= b_1 + b_2 t + b_3 t^2 \\
 R_{s,z} &= c_1 + c_2 t + c_3 t^2 \\
 V_{s,x} &= d_1 + d_2 t + d_3 t^2 \\
 V_{s,y} &= e_1 + e_2 t + e_3 t^2 \\
 V_{s,z} &= f_1 + f_2 t + f_3 t^2
 \end{aligned} \tag{94}$$

dove R_s è il vettore posizione e V_s il vettore velocità secondo quanto segue:

$$\begin{aligned}
 R_s &= [R_{s,x} \ R_{s,y} \ R_{s,z}]^T \\
 V_s &= [V_{s,x} \ V_{s,y} \ V_{s,z}]^T
 \end{aligned} \tag{95}$$

La stima dei coefficienti del modello predittivo $\{a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i\}$ avviene, normalmente, con processo di stima ai minimi quadrati, tenendo in conto alcune procedure per l'eliminazione di eventuali errori grossolani nelle misure.

Il processo viene condotto per $R_{s,y}, R_{s,z}, V_{s,x}, V_{s,y}, V_{s,z}$.

7.7.2.1.1 Geometria dell'immagine SAR

Prima di descrivere le modalità con la quale si procede alla compensazione delle effemeridi è necessario comprendere come riferire una cella dell'immagine SAR (individuata da riga e colonna) alla sua posizione al suolo nel sistema geocentrico (Earth Centered System, ECS), cioè come relazionarla al bersaglio corrispondente. Questo processo viene utilizzato sia durante la compensazione delle effemeridi, sia nel corso dell'ortoproiezione vera e propria.

Per ciascuna coppia di coordinate immagine (colonna, riga), cioè per ciascuna cella dell'immagine SAR, viene definita la corrispondente posizione al suolo (R_t). Questa può essere descritta in termini di coordinate geografiche (lon, lat, quota) o in termini di coordinate geocentriche cartesiane (ECS). Si noti che il bersaglio, può essere considerato appartenente alla superficie ellissoidica (ipotesi semplificativa) o alla superficie topografica che sovrasta l'ellissoide di riferimento (caso reale non semplificato).

In entrambi i casi, la corrispondente posizione al suolo di ciascuna cella, viene determinata come intersezione del cono Doppler (range sphere) del segnale radar con la superficie di riferimento.

Questa operazione richiede che sia noto il centroide Doppler (vedere bibliografia).

Siano $i = n$. colonna e $j = n$. riga. Il tempo al quale la generica riga viene acquisita risulta:

$$T(j) = t(0) + \frac{j-1}{N_a - 1} \cdot t_{dur} \tag{96}$$

dove $T(0)$ è il tempo iniziale di acquisizione della scena, N_a è il numero di righe e t_{dur} è l'intervallo di acquisizione dell'intera scena.

CENTROIDE DOPPLER

La determinazione del centroide Doppler da usare nel modello di correzione dipende dalle elaborazioni che i dati hanno subito. Se l'effetto di skew è già stato rimosso dall'immagine allora il centroide Doppler è nullo. Diversamente esso potrebbe essere una costante diversa da zero o variare lungo le colonne.

SLANT RANGE

Il calcolo dello slant range per la cella i -esima della riga considerata dipende dal tipo di proiezione in cui è fornita l'immagine. Se questa è fornita nella proiezione *slant range projection*, allora :

$$R_{sl}(i) = r_{sl} + (i-1) \cdot \Delta r_{sr} \quad (97)$$

dove $R_{sl}(i)$ è lo slant range per il pixel i , r_{sl} è il near slant range, e r_{sr} è la risoluzione geometrica del pixel nella direzione di slant.

Se la proiezione in cui è fornita l'immagine è di tipo ground range, allora il computo risulta più complesso.

INTERSEZIONE TRA IL CONO DOPPLER E IL MODELLO DI SUPERFICIE ADOTTATO

Per trovare la posizione del bersaglio R_t corrispondente ad una data cella immagine, deve essere determinata l'intersezione tra il cono Doppler, la sfera locale e/o il modello di superficie adottato.

Per un ellissoide, si può scrivere:

$$f_D = \frac{2}{\lambda R_{sl}} (\bar{R}_S - \bar{R}_t) \cdot (\bar{V}_S - \bar{V}_t) \quad (98)$$

$$R_{sl} = |R_S - R_t| \frac{R_S(x)^2 + R_S(y)^2}{(R_e + h_{targ})^2} + \frac{R_S(z)^2}{(R_m + h_{targ})^2} = 1$$

dove R_s e V_s sono i vettori posizione e velocità, V_t è la velocità del bersaglio (posta = 0), R_e è il semiasse maggiore dell'ellissoide, ed R_m il semiasse minore. Per ciascuna cella immagine è possibile determinare R_m e R_s come funzioni del tempo usando le equazioni descrittive delle effemeridi precedentemente definite.

Utilizzando un numero sufficiente di punti di appoggio (GCP, Ground Control Points) è inoltre possibile procedere ad una compensazione delle effemeridi originali.

L'operazione di ortoproiezione vera e propria determina, per una data posizione al suolo, il pixel dell'immagine originale che la rappresenta, tenendo in conto la geometria del sistema e della superficie terrestre.

Software commerciali consentono di eseguire questa operazione.

7.8 Satelliti equipaggiati con SAR

7.8.1 Missioni satellitari attualmente in orbita

7.8.1.1 Satelliti ERS 1-2

L'Agenzia Spaziale Europea – ESA – lanciò, nel maggio 1991, il primo SAR europeo a bordo del satellite ERS-1. Quattro anni dopo, nel 1995, venne lanciato lungo la stessa orbita, ma con un ritardo di un giorno, ERS-2, gemello di ERS-1. Con questa disposizione, detta a tandem, sono stati acquisiti ripetutamente dati di vaste aree della superficie terrestre a partire dal 1992. Il sensore SAR montato a bordo dei satelliti ERS può operare secondo due modalità:

- SAR Image Mode
- SAR Wave Mode

7.8.1.1.1 SAR Image Mode (AMI)

In questa modalità il sensore è in grado di acquisire immagini con risoluzione in distanza (a-cross track) di 26 m e tra i 6 e i 30 m in azimuth (along track). La copertura massima consentita è quella corrispondente ad un tempo di acquisizione di 10 minuti per orbita. Poiché la mole di dati acquisiti è troppo elevata per essere registrata a bordo, immagini vengono acquisite solo in prossimità di zone in cui è presente una stazione ricevente.

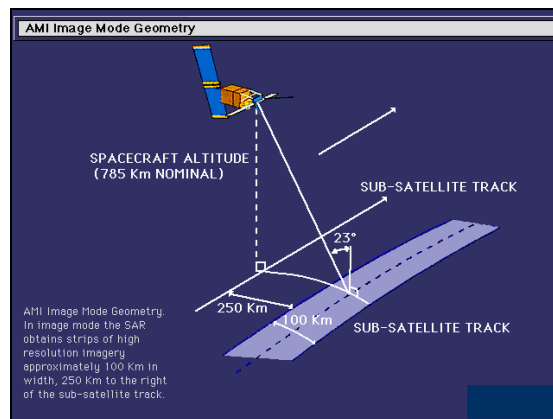


Figura 266 – Schema di acquisizione dei satelliti ERS in modalità AMI (da ESA)

Le principali caratteristiche dell'acquisizione SAR AMI di ERS sono riportate nelle tabelle che seguono:

Risoluzione geometrica	along track ≤ 30 m
	across track ≤ 26.3 m
Larghezza della strisciata (swath)	Tra 80 e 100 km
Posizione della strisciata	250 km a destra della traccia orbitale
Accuratezza di posizionamento dei punti a terra	along track ≤ 1 km;
	across track ≤ 0.9 km
Angolo di vista (incidence angle)	near range = 20.1°
	middle range = 23°
	far range = 25.9°
Precisione nella misura dell'angolo di vista	≤ 0.5 deg.

Tabella 53 – Caratteristiche geometriche dell'acquisizione SAR AMI di ERS.

Frequenza	5.3 GHz (C-band)
Lunghezza d'onda	5.6 cm
Larghezza di banda	15.55±0.1 MHz
Polarizzazione	VV
Peak sidelobe ratio:	along track >20 dB across-track >18 dB
Spurious sidelobe ratio:	across-track >25 dB along track >25 dB
Integrated sidelobe ratio:	>8 dB
Ambiguity ratio:	along track >20 dB across-track >31 dB
Radiometric resolution:	≤2.5 dB at sigma-zero = -18 dB
Dynamic range:	>21 dB
Radiometric stability:	≤0.95 dB
Cross polarisation (one way):	>15 dB

Tabella 54 - Caratteristiche radiometriche dell'acquisizione SAR AMI di ERS.

Il sistema richiede la visibilità di una stazione ricevente. La tabella 33 riporta le caratteristiche operazionali dell'acquisizione SAR AMI di ERS.

Durata massima dell'acquisizione	< 12 minuti complessivi per orbita < 10 minuti per orbite discendenti < 4 minuti per orbite in eclisse
Massimo numero di attivazioni	6 per orbita

Tabella 55 – Caratteristiche operazionali dell'acquisizione SAR AMI di ERS.

7.8.1.1.2 SAR Wave Mode

Questa modalità è utilizzata per la generazione di spettri d'onda delle superfici oceaniche. Il sensore opera ad intervalli regolari all'interno della strisciata. Le immagini vengono convertite in spettri direzionali che descrivono la direzione e la lunghezza d'onda dei sistemi ondosi della superficie marina. Le misure automatiche delle lunghezze d'onda e direzioni dominanti vengono utilizzate all'interno di modelli predittivi dei moti ondosi dei mari. Poiché il contesto esula dagli obiettivi del presente lavoro, si rimanda per approfondimenti a fonti esterne.

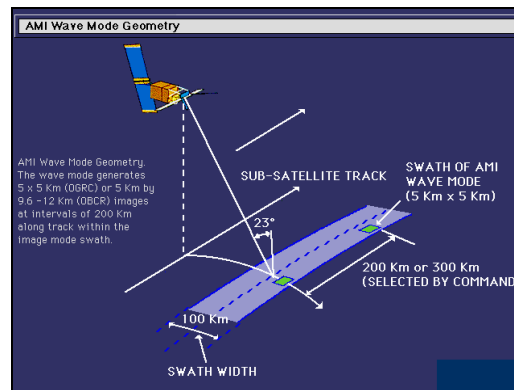


Figura 267 - Schema di acquisizione dei satelliti ERS in modalità Wave (da ESA).

7.8.1.2 *Satellite ENVISAT*

Envisat, lanciato in orbita il 1 marzo 2002, prosegue l'attività iniziata dai predecessori ERS. ENVISAT è un sistema complesso dotato di molti sensori (Figura 268).

ASAR (Advanced SAR) è il sensore SAR che garantisce continuità con le acquisizioni Image e Wave Modes di ERS. Il nuovo sistema è però in grado di aumentare la frequenza temporale delle acquisizioni. La risoluzione geometrica nominale è di 30 m, la larghezza della strisciata in ASAR Image Mode è di circa 100 km mentre in Wave Mode è di 5 km. Il tempo di rivisitazione, al pari di ERS, è di 35 gg.

ASAR offre 5 modalità acquisizione, ma combinando angoli di incidenza (variabili) e polarizzazioni queste arrivano a raggiungere le 37, tutte reciprocamente esclusive. Esse possono essere raggruppate secondo due famiglie:

- Missione Globale (Global Mission)
- Missione Regionale (Regional Mission)

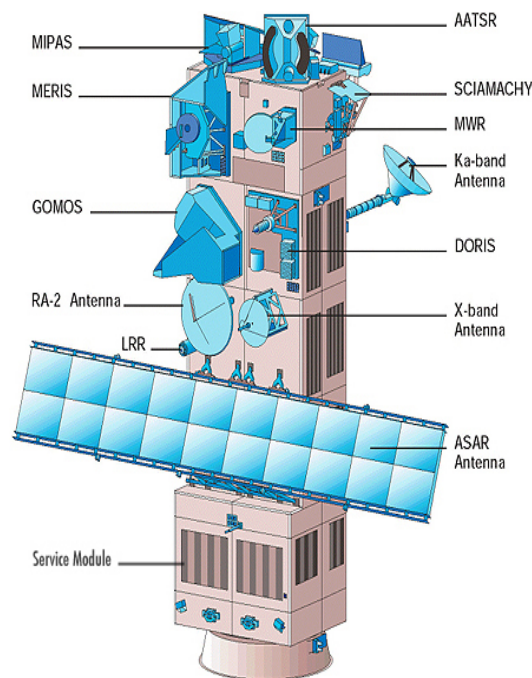


Figura 268 – Sensori a bordo di ENVISAT (da ESA)

7.8.1.2.1 Global Mission

I modi operativi che appartengono a questa famiglia acquisiscono dati a bassa frequenza di campionamento (0.9 Mbps) che vengono sistematicamente registrati a bordo per l'intera durata dell'orbita e scaricati a terra alla stazione ricevente ESA una volta per orbita. A questa famiglia appartengono le acquisizioni:

- Global Monitoring Mode (GM)
- Wave Mode (WV)

La modalità Global Monitoring Mode permette di acquisire immagini a bassa risoluzione (1 km) usando la tecnica ScanSAR lungo una strisciata larga 405 km in modalità polarizzata HH o VV. In modalità Wave Mode ASAR misura i cambiamenti di riflessione delle superfici marine connesse al moto ondoso. Produce immagini di piccole dimensioni (5 km x 5 km),



analoghe a quelle ERS, a passo di 100 km lungo la traccia orbitale in polarizzazione HH o VV.

7.8.1.2.2 Regional Mission

Le modalità operative di questa famiglia operano acquisendo dati con elevata frequenza di campionamento (100 Mbps) che richiedono una trasmissione frequente o continua a terra. L'acquisizione non avviene sistematicamente, ma su indicazione dell'utenza rispetto ad una area di interesse.

A questa categoria appartengono tre modalità:

- Image Mode (IM)
- Alternating Polarisation Mode (AP)
- Wide Swath Mode (WS)

In IM ASAR è in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione geometrica (30 m) simili a quelle ERS SAR. Queste possono essere acquisite con angoli di incidenza variabili tra 15° e 45° in polarizzazione HH o VV.

La modalità AP genera prodotti ad alta risoluzione (circa 30 m) consentendo combinazioni di polarizzazione diverse tra il segnale inviato e quello ricevuto (HH/VV or HH/HV or VV/VH). La modalità WS consente di acquisire strisciate larghe fino a 405 km con una risoluzione geometrica di circa 150 m in polarizzazione HH or VV. La larghezza complessiva della strisciata è ottenuta combinando 5 sotto-strisciate.

7.8.1.3 *RADARSAT-1*

Radarsat-1 è il primo satellite commerciale di osservazione della terra messo in orbita dall'agenzia spaziale canadese. Lanciato nel 1995 segue un'orbita eliosincrona inclinata di 98.6° ad una quota di 798 chilometri. Radarsat-1 monta un sensore SAR operante su una singola frequenza (5.3 GHz), in banda C. La risoluzione geometrica media delle immagini RADARSAT-1 dipende dalla modalità in cui opera il sensore, tra le sette disponibili. Queste variano dalla modalità Fine Mode, che permette di coprire un'area di 50 km² con una risoluzione geometrica media di 10 m fino alla modalità ScanSAR wide, che permette di acquisire un'area di 500 km² con una risoluzione geometrica media di 100 m. La modalità di acquisizione standard (Standard beam mode) consente di coprire un'area di 100 km² con una risoluzione geometrica media di 30 m. RADARSAT-1 ha inoltre la possibilità di orientare il fascio lungo direzioni variabili. Il suo periodo orbitale è di 100.7 minuti Radarsat-1 corrispondente a 14 orbite giornaliere intorno alla Terra. Il tempo di rivisitazione della stessa scena è di 24 giorni. Tale periodo può essere abbassato orientando differientemente il fascio. RADARSAT-1 è right looking, cioè acquisisce alla destra della sua orbita. In orbita discendente (Nord-Sud) il fascio è orientato verso ovest, in quella ascendente verso Est. La stessa scena può dunque essere acquisita da posizioni differenti.

Frequenza del segnale	5.3 GHz (banda C)
Risoluzione geometrica nominale	10 – 100 m
Larghezza scena	50 – 500 km ²
Tempo di rivisitazione	24 gg
Quota dell'orbita	798 km
Periodo dell'orbita	100.7 min
Inclinazione dell'orbita	98.6°

Tabella 56 - Caratteristiche tecniche di RADARSAT-1



7.8.1.4 JERS-1

Satellite dell'agenzia spaziale giapponese (Japanese Earth Resource Sensing) dotato di sensori SAR e ottici lanciato nel 1992 e disattivato nel 1998.

La strumentazione SAR presenta le caratteristiche riportate in Tabella 35.

Frequenza del segnale	1.3 GHz (banda L)
Risoluzione geometrica nominale	18 x 18 m
Larghezza della strisciata	75 km
Tempo di rivisitazione	44 gg
Quota dell'orbita	568 km
Periodo dell'orbita	96 min
Inclinazione dell'orbita	97.7°

Tabella 57 - Caratteristiche tecniche di JERS-1

7.8.2 Principali differenze tra i sensori

Le più importanti differenze riscontrabili tra i sensori precedentemente descritti (con ricadute applicative sulla tecnica interferometrica) sono così riassumibili:

nell'angolo che la direzione del segnale forma con la verticale: 23° per i satelliti ESA-ERS, un angolo variabile da 10° a 60° nel caso del satellite canadese Radarsat, 35° per il giapponese JERS e variabile da 14° a 45° nel caso di Envisat;

nella lunghezza d'onda del segnale: banda C (lunghezza d'onda: ~5 cm) per ERS ed Envisat, banda L (lunghezza d'onda: ~20 cm) per JERS, banda C anche per Radarsat;

nel tempo di rivisitazione di una stessa scena al suolo: 35 giorni per ERS ed Envisat, 44 giorni per JERS, 24 giorni per Radarsat.

7.9 Future missioni satellitari

Tutte le nuove missioni elencate a seguito consentiranno di aumentare le capacità di monitoraggio del territorio. La possibilità di operare con intervalli di rivisitazione (periodi di campionamento) del dato sempre più ridotti o diversificati, l'utilizzo di diverse lunghezze d'onda e lo sviluppo di nuovi e più sofisticati algoritmi consentiranno di perfezionare ulteriormente i risultati ottenibili con la tecnica PS. Sono anche ipotizzabili futuri servizi "Real-time" in cui, per identificare aree a rischio, si potrà procedere ad un aggiornamento in "tempo reale" non appena un nuovo dato risulterà disponibile.

7.9.1 Cosmo-SkyMed

Missione già approvata dall'Agenzia Spaziale Italiana. Tra il 2006 e il 2008 sono previsti il primo lancio e il raggiungimento della piena operatività della costellazione di satelliti radar e ottici Cosmo-SkyMed. In particolare i sistemi SAR montati a bordo di quattro velivoli, consentiranno elevate risoluzioni al suolo e brevissimi tempi di rivisitazione delle aree di interesse, con la prospettiva di un vero servizio "Real Time".

7.9.2 TerraSAR-X

Missione già approvata dall'Agenzia Spaziale Tedesca (DLR). Lancio previsto per ottobre 2006. Il satellite disporrà di un dispositivo SAR in banda X (9,65 GHz) e avrà tempi di rivisitazione al suolo di 11 giorni. L'aspetto più significativo consisterà nella possibilità di fornire dati sia con polarizzazione semplice che doppia.



INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	INTRODUZIONE.....	5
3	MODELLI ALTIMETRICI (DEM).....	7
3.1	SISTEMI DI RIFERIMENTO E COORDINATE.....	9
3.2	TECNICHE DI FORMAZIONE DEI DTM.....	10
3.3	METODI DI INTERPOLAZIONE.....	10
3.3.1	<i>Media ponderata.....</i>	<i>10</i>
3.3.2	<i>Piano interpolatore.....</i>	<i>11</i>
3.3.3	<i>Interpolazione con una superficie del 2° ordine.....</i>	<i>12</i>
3.3.4	<i>Interpolazione con una superficie del 3° ordine.....</i>	<i>13</i>
3.4	ELABORAZIONI DERIVATE DAL DTM.....	13
3.4.1	<i>Carta delle curve di livello.....</i>	<i>14</i>
3.4.2	<i>Carta delle pendenze.....</i>	<i>16</i>
3.4.3	<i>Carta dell'esposizione dei versanti.....</i>	<i>17</i>
4	TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE.....	19
4.1	LA PROSPETTIVA CENTRALE.....	19
4.2	IL PRINCIPIO DELLA FOTOGRAMMETRIA.....	21
4.3	LA PROSPETTIVA CENTRALE E LA FOTOGRAFIA: DIFFERENZE E ANALOGIE ..	22
4.4	IMMAGINI ANALOGICHE E IMMAGINI DIGITALI ..	25
4.5	L'ACQUISIZIONE DEI DATI PRIMARI ..	26
4.5.1	<i>Camere metriche.....</i>	<i>27</i>
4.5.1.1	<i>Camere metriche aeree analogiche.....</i>	<i>27</i>
4.5.1.1.1	<i>La digitalizzazione di immagini fotografiche analogiche.....</i>	<i>29</i>
4.5.1.1.1.1	<i>Scanner fotogrammetrici.....</i>	<i>32</i>
4.5.1.1.1.2	<i>Scanner DTP.....</i>	<i>32</i>
4.5.1.2	<i>Camere fotogrammetriche digitali.....</i>	<i>35</i>
4.5.1.2.1	<i>Sistemi a prospettiva centrale unica.....</i>	<i>37</i>
4.5.1.2.1.1	<i>Camera ZEISS.....</i>	<i>39</i>
4.5.1.2.1.2	<i>Camera VEXCEL.....</i>	<i>40</i>
4.5.1.2.1.3	<i>Camera DIMAC.....</i>	<i>42</i>
4.5.1.2.2	<i>Sistemi a prospettiva centrale multipla.....</i>	<i>44</i>
4.5.1.2.2.1	<i>Camera ADS40.....</i>	<i>49</i>
4.5.1.2.2.2	<i>Camera JENA.....</i>	<i>51</i>
4.5.1.2.2.3	<i>QUICKBIRD.....</i>	<i>52</i>
4.5.1.2.2.4	<i>ORBVIEW-3.....</i>	<i>53</i>
4.5.1.2.2.5	<i>TERRA ASTER.....</i>	<i>54</i>
4.5.1.2.2.6	<i>FORMOSAT-2.....</i>	<i>56</i>
4.5.1.2.2.7	<i>SPOT-5.....</i>	<i>57</i>
4.5.1.2.2.8	<i>IKONOS.....</i>	<i>58</i>
4.5.1.2.2.9	<i>EROS A1 – B.....</i>	<i>59</i>
4.5.1.2.2.10	<i>Le camere HRSC.....</i>	<i>60</i>
4.5.1.2.2.11	<i>La camera STARIMAGER TLS (Three Line Scanner) della STARLABO CORPORATION.....</i>	<i>61</i>



4.6	ALGORITMI DI BASE DELLA FOTOGRAMMETRIA ANALITICA.....	62
4.6.1	<i>La rototraslazione piana</i>	62
4.6.2	<i>La rototraslazione spaziale</i>	64
4.6.3	<i>Le equazioni di collinearità</i>	66
4.6.4	<i>I parametri di orientamento interno ed esterno di un fotogramma</i> ...	68
4.6.5	<i>Il certificato di calibrazione delle camere fotogrammetriche</i>	68
4.6.6	<i>Stima indiretta dei parametri di orientamento esterno</i>	69
4.6.6.1	Orientamento di immagini a prospettiva centrale unica.....	69
4.6.6.1.1	Orientamento di immagini singole.....	70
4.6.6.1.2	Orientamento di coppie stereoscopiche (in una sola fase).....	70
4.6.6.1.3	Orientamento simultaneo dei due fotogrammi (in due fasi successive).....	71
4.6.6.1.4	Orientamento di blocchi di fotogrammi	71
4.6.6.1.4.1	Compensazione del blocco a modelli indipendenti.....	73
4.6.6.1.4.2	Compensazione del blocco a stelle proiettive	74
4.6.6.1.4.3	La precisione di una triangolazione fotogrammetrica.....	76
4.6.6.2	Orientamento di immagini a prospettiva centrale multipla.....	78
4.6.6.2.1	Il modello geometrico rigoroso delle immagini a prospettiva centrale multipla	79
4.6.6.2.2	Orientamento di scene stereoscopiche	82
4.6.6.2.3	Correzioni geometriche dei sensori satellitari.....	84
4.6.6.2.3.1	Trasformazioni 2-D.....	85
4.6.6.2.3.2	Trasformazioni 3-D	87
4.6.6.2.3.2.1	Modelli non parametrici (generalizzati).....	87
4.6.6.2.3.2.2	Modello neurale (Neural Net)	90
4.6.6.2.3.3	Considerazioni applicative	92
4.6.7	<i>La restituzione</i>	92
4.6.7.1	Restituzione da immagini a prospettiva centrale unica.....	92
4.6.7.2	Restituzione da immagini a prospettiva centrale multipla	93
4.6.8	<i>Precisioni della Fotogrammetria</i>	93
4.6.8.1	Coordinate di punti singoli.....	94
4.6.8.2	Linee planimetriche.....	96
4.6.8.3	Curve di livello.....	96
4.6.8.4	Profili e grigliati	98
4.7	LA FOTOGRAMMETRIA DIRETTA.....	99
4.7.1	<i>Descrizione del sistema</i>	100
4.7.2	<i>Il posizionamento GPS</i>	101
4.7.2.1	Il GPS differenziale.....	104
4.7.2.2	Il GPS cinematico.....	104
4.7.2.3	La piattaforma inerziale	105
4.7.3	<i>Accelerometri e loro principi di funzionamento</i>	109
4.7.4	<i>Integrazione GPS-INS</i>	112
4.7.5	<i>Prestazioni della fotogrammetria diretta</i>	112
4.8	LA FOTOGRAMMETRIA DIGITALE	116
4.8.1	<i>Il sistema fotogrammetrico digitale</i>	116
4.8.1.1	L'unità di acquisizione come strumento di misura	117
4.8.1.2	L'unità di restituzione	120
4.8.2	<i>Tecniche di ricampionamento delle immagini</i>	122
4.8.2.1	Metodi basati sul trasporto del baricentro.....	124



4.8.2.1.1	Zone di influenza.....	124
4.8.2.1.2	Distanze pesate.....	125
4.8.2.1.3	Interpolazione bilineare.....	126
4.8.2.1.4	Interpolazione bicubica.....	127
4.8.2.1.5	Considerazioni operative.....	128
4.9	PRODOTTI DELLA FOTOGRAMMETRIA.....	129
4.9.1	<i>Grigliati irregolari di punti</i>	129
4.9.2	<i>Grigliati regolari</i>	130
4.9.3	<i>Efficacia e precisioni ottenibili</i>	131
4.9.4	<i>Ortofoto digitali</i>	132
4.9.4.1	Le deformazioni di un fotogramma.....	133
4.9.4.2	Preparazione dei dati iniziali.....	136
4.9.4.3	La procedura di generazione.....	136
4.9.4.4	Influenza della precisione del DEM.....	138
4.9.4.5	Ortofoto di precisione.....	139
4.9.4.5.1	Ortoproiezione rigorosa di una superficie discontinua.....	140
4.9.4.5.2	Generazione del modello tridimensionale.....	142
4.9.4.5.3	Come produrre una ortofoto di precisione.....	144
4.9.4.5.4	Un esempio di ortofoto di precisione in area urbana.....	146
4.9.4.6	Ortofoto solida di precisione.....	147
4.9.5	<i>La Stereofotocarta</i>	152
4.9.5.1	Proprietà della stereofotocarta.....	153
4.9.5.2	Formazione della stereofotocarta.....	154
4.9.5.2.1	Digitalizzazione dei fotogrammi.....	154
4.9.5.2.2	Determinazione dei parametri di orientamento esterno dei fotogrammi.....	155
4.9.5.2.3	Organizzazione dei dati.....	156
4.9.5.3	Utilizzo della Stereofotocarta: il Navigatore 3D.....	156
4.9.5.3.1	Funzionalità di Stereospace.....	157
4.9.5.3.2	Dotazione hardware di Stereospace.....	158
4.9.5.3.3	Dotazione software di Stereospace.....	159
4.9.5.3.3.1	Navigazione.....	159
4.9.5.3.3.2	Collimazione stereoscopica di punti isolati.....	161
4.9.5.3.3.3	Memorizzazione di dati numerici.....	162
4.10	APPLICAZIONI AMBIENTALI DELLA FOTOGRAMMETRIA.....	163
4.10.1	<i>Variazioni volumetriche di un ghiacciaio</i>	163
4.10.2	<i>Valutazione metrica di colate detritiche torrentizie</i>	169
4.10.3	<i>Ortofoto e DEM per la valutazione degli spostamenti</i>	171
5	TECNICHE LIDAR	176
5.1	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	176
5.1.1	<i>Il laser come radiazione luminosa</i>	176
5.1.2	<i>Il raggio laser</i>	177
5.1.3	<i>I generatori di luce laser</i>	177
5.1.4	<i>Comportamento del laser a contatto con i materiali</i>	179
5.1.5	<i>Il problema della divergenza del raggio laser</i>	181
5.2	LA MISURA DELLE DISTANZE.....	182
5.2.1	<i>I distanziometri classici, la misura della distanza mediante onde e.m.</i> 183	



5.2.1.1	Distanziometri ad impulsi	183
5.2.1.2	Distanziometri a misura di fase	186
5.2.1.3	Misura della distanza multipla o dello spettro del segnale di ritorno 188	
5.2.1.3.1	Primo od ultimo impulso	189
5.2.1.3.2	I, II, III e ultimo impulso	189
5.2.1.3.3	Letture di tutta la forma d'onda	189
5.3	IL LASER SCANNER	190
5.3.1	<i>Laser scanner aerei</i>	191
5.3.1.1	Sistema a specchi di rotazione	192
5.3.1.2	Integrazione con piattaforme GPS/IMU	193
5.3.1.3	Integrazione con camera metrica	193
5.3.1.4	Unità di acquisizione dati	194
5.3.1.5	Calibrazione pre-volo e durante il volo	194
5.3.1.6	La sequenza di produzione dei dati dopo la calibrazione	195
5.3.2	<i>Laser scanner terrestri</i>	196
5.3.2.1	Integrazione con camera digitale	197
5.3.2.2	Metodi per l'integrazione fisica dei dati	198
5.3.2.3	Il principio dell'integrazione	199
5.4	TRATTAMENTO DEI DATI LIDAR AEREI	200
5.4.1	<i>Il sistema di riferimento laser ed il cambio di datum plano-altimetrico</i> 200	
5.4.2	<i>Sovrapposizione delle strisciate</i>	201
5.4.3	<i>Rimozione della vegetazione</i>	201
5.4.4	<i>Creazione del DEM</i>	201
5.4.5	<i>Segmentazione del DEM</i>	202
5.4.6	<i>Estrazione delle linee di discontinuità</i>	203
5.5	TRATTAMENTO DEI DATI LIDAR TERRESTRI	204
5.5.1	<i>Integrazione con rilievi topografici terrestri e satellitari</i>	206
5.5.2	<i>Filtratura dei dati</i>	207
5.5.3	<i>Rimozione della vegetazione</i>	209
5.5.4	<i>Allineamento delle scansioni</i>	209
5.5.5	<i>Georeferenziazione dei modelli complessi</i>	211
5.5.6	<i>Triangolazione LIDAR</i>	211
5.6	INTEGRAZIONE DEI DATI LIDAR CON LA FOTOGRAMMETRIA	212
5.6.1	<i>Colorazione del modello a colori reali</i>	213
5.6.2	<i>Immagini solide</i>	214
6	TELERILEVAMENTO MULTISPETTRALE	220
6.1	PRINCIPI	220
6.2	FIRME SPETTRALI	222
6.3	TECNICHE DI ACQUISIZIONE	224
6.4	INFORMAZIONE CONTENUTA NELLE IMMAGINI MULTISPETTRALI	227
6.5	ELABORAZIONE DEI DATI MULTISPETTRALI	229
6.5.1	<i>Pre-elaborazioni</i>	230
6.5.1.1	Correzioni radiometriche	230
6.5.1.2	Calibrazione	230
6.5.1.3	Correzione atmosferica	231
6.5.2	<i>Fotointerpretazione delle immagini</i>	232



6.5.3	<i>Classificazione delle immagini</i>	234
6.5.3.1	Spazio delle bande e firme spettrali	234
6.5.3.2	Processo di classificazione e categorie di classificatori.....	235
6.5.3.3	Classificatori assistiti	236
6.5.3.4	Classificatori automatici	237
6.5.3.5	Problematiche connesse alla classificazione.....	238
6.5.3.6	Verifica dei risultati.....	238
6.6	ELABORAZIONE DI DATI IPERSPETTRALI.....	240
6.7	PRINCIPALI SISTEMI MULTI E IPERSPETTRALI.....	241
6.7.1	<i>Landsat 5-7</i>	241
6.7.2	<i>Terra ASTER</i>	244
6.7.3	<i>SPOT 5</i>	245
6.7.4	<i>FORMOSAT-2</i>	245
6.7.5	<i>SISTEMA EO-1</i>	245
6.7.5.1	Advanced Land Imager (ALI).....	246
6.7.5.2	Hyperion.....	246
6.7.6	<i>ROSIS e DAIS</i>	247
6.7.6.1	Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS 7915).....	247
6.7.6.2	Reflective Optics System Imaging Spectrometer (ROSIS)	248
6.7.7	<i>Lo scanner iperspettrale MIVIS</i>	249
6.7.7.1	Il sensore	249
6.7.7.2	Le componenti del sistema MIVIS	250
6.7.7.2.1	Il Moving Window Display	250
6.7.7.2.2	Il Digitalizzatore	252
6.7.7.2.3	Il Registratore Magnetico VLDS	252
6.7.7.2.4	Il Distributore di Alimentazione	252
6.7.7.2.5	La Testa di Scansione e lo Spettrometro.....	253
6.7.7.3	Le caratteristiche tecniche del sistema MIVIS.....	253
6.7.7.4	Applicazioni del dato	255
6.7.7.5	Il volo MIVIS della Regione Autonoma Valle d'Aosta	258
6.7.7.5.1	Correzione geometrica delle immagini	259
6.7.7.5.2	Dati ausiliari a disposizione	260
6.7.7.5.3	Metodi di correzione geometrica validati	261
6.7.7.5.4	Individuazione dei punti di appoggio a terra (Ground Control Points, GCPs).....	262
6.7.7.5.5	Analisi risultati delle prove di correzione geometrica	262
6.7.7.5.6	Aspetti radiometrici del processo di correzione geometrica ..	266
7	TECNICHE RADAR.....	268
7.1	COMPONENTI STRUMENTALI DI UN SISTEMA RADAR.....	269
7.2	GRANDEZZE MISURABILI CON LA TECNICA RADAR.....	269
7.2.1	<i>Misura di distanza</i>	269
7.2.2	<i>Intervallo spettrale del radar</i>	271
7.2.3	<i>Proprietà delle diverse bande</i>	271
7.3	FATTORI DI SISTEMA	272
7.4	GEOMETRIA DI PRESA DEI SISTEMI RADAR.....	272
7.4.1	<i>Risoluzione in distanza</i>	273
7.4.2	<i>Risoluzione in azimuth (longitudinale)</i>	275
7.5	SAR (SYNTHETIC APERTURE RADAR).....	276



7.5.1	STRIPMAP	277
7.5.2	SCANSAR	277
7.5.3	SPOTSAR	278
7.6	IMMAGINI SAR	278
7.6.1	Deformazioni geometriche delle immagini SAR	279
7.6.2	La focalizzazione	280
7.6.3	Fattori che influenzano l'eco	281
7.7	TECNICHE DI ELABORAZIONE DEI DATI SAR	283
7.7.1	Interferometria SAR	283
7.7.1.1	Interferometria SAR per la generazione di DEM	284
7.7.1.2	Fase topografica	285
7.7.1.3	Interferometria Differenziale SAR (DInSAR, Differential SAR Interferometry)	285
7.7.1.4	Limiti dell'approccio interferometrico differenziale tradizionale	286
7.7.1.5	Tecnica interferometrica PS	287
7.7.1.5.1	Punti di forza della tecnica PS	289
7.7.1.5.2	Punti di debolezza della tecnica PS	290
7.7.1.5.3	Incertezza di posizionamento planimetrico	291
7.7.1.5.4	Possibili miglioramenti della tecnica PS	291
7.7.1.5.5	Standard Permanent Scatterers Analysis (SPSA) e Advanced Permanent Scatterers Analysis (APSA)	293
7.7.2	Correzione geometrica di immagini SAR	293
7.7.2.1	Modellazione delle effemeridi	294
7.7.2.1.1	Geometria dell'immagine SAR	295
7.8	SATELLITI EQUIPPAGGIATI CON SAR	297
7.8.1	Missioni satellitari attualmente in orbita	297
7.8.1.1	Satelliti ERS 1-2	297
7.8.1.1.1	SAR Image Mode (AMI)	297
7.8.1.1.2	SAR Wave Mode	298
7.8.1.2	Satellite ENVISAT	299
7.8.1.2.1	Global Mission	299
7.8.1.2.2	Regional Mission	300
7.8.1.3	RADARSAT-1	300
7.8.1.4	JERS-1	301
7.8.2	Principali differenze tra i sensori	301
7.9	FUTURE MISSIONI SATELLITARI	301
7.9.1	Cosmo-SkyMed	301
7.9.2	TerraSAR-X	301