

**Master Universitario di II livello in
"Sistemi Informativi Territoriali"**

Geomatica e modellazione digitale del terreno

ELEMENTI DI FOTOGRAMMETRIA DIGITALE

Mauro Lo Brutto



Febbraio 2005

Premessa

A partire dalla metà degli anni '80 i maggiori produttori di strumenti fotogrammetrici hanno sviluppato e introdotto nel mercato i primi sistemi fotogrammetrici digitali che, dopo una prima fase sperimentale, hanno subito una graduale ma costante diffusione tra gli addetti ai lavori.

Il passaggio dalla fotogrammetria analitica a quella digitale ha determinato l'uso delle immagini digitali al posto delle copie analogiche e l'elaborazione di nuovi algoritmi e nuove procedure per una gestione sempre più automatizzata dei principali processi. Infatti, se l'introduzione della fotogrammetria digitale si fosse limitata soltanto all'uso di immagini digitali mantenendo i tradizionali algoritmi della fotogrammetria analitica i reali benefici sarebbero stati molto ridotti. Invece l'aspetto più importante è rappresentato dalla possibilità di utilizzare algoritmi che consentono di raggiungere un elevato grado di automazione (prima del tutto impensabile) in numerose fasi del processo fotogrammetrico.

La riduzione dei tempi e dei costi di produzione che conseguentemente deriva dall'impiego di tali tecniche ha determinato un notevole interesse per questi prodotti sia in ambito scientifico che anche, e soprattutto, tra le aziende del settore.

Purtroppo però la necessità di forti investimenti per l'impianto dei nuovi cicli produttivi e il ritardo con cui le nuove tecniche sono state inserite nei Capitolati Speciali di Appalto per la produzione di cartografia a media e grande scala hanno rallentato la diffusione dei sistemi digitali. A quasi venti anni dalla comparsa dei sistemi fotogrammetrici digitali, soltanto alcuni dei prodotti realizzabili (le ortofoto digitali) sono entrati, infatti, a fare parte dei principali cicli produttivi.

Lo sviluppo della fotogrammetria digitale è stato sicuramente legato ai notevoli progressi avuti in campo informatico, sia per quanto riguarda la parte hardware che per il software; la possibilità di avere a disposizione elaboratori capaci di gestire, in tempi rapidi e senza problemi da un punto di vista computazionale, tutte le nuove procedure introdotte dalla tecnica digitale è stata sicuramente di fondamentale importanza.

Il passaggio dalla fotogrammetria analitica a quella digitale ha comportato un cambiamento del dato primario utilizzato, da fotogrammi analogici a immagini digitali, che ha portato una notevole innovazione riguardo alla strumentazione utilizzata. Questo passaggio ha inoltre consentito lo sviluppo di nuovi algoritmi finalizzati al raggiungimento di un elevato grado di automazione del processo fotogrammetrico.

L'impiego dei classici algoritmi della fotogrammetria digitale, per il calcolo degli orientamenti o per la restituzione, rimane sempre valido; la grande novità è invece data dalla possibilità di utilizzare adeguati programmi per l'esecuzione di operazioni che prima venivano fatte in maniera interattiva da tecnici specializzati. In particolare possono essere eseguite in modalità automatica le procedure di orientamento (interno e esterno) e di estrazione di modelli digitali delle altezze (DEM).

Questa importante caratteristica viene anche evidenziata nella definizione che convenzionalmente è utilizzata per definire un sistema fotogrammetrico digitale: un insieme di *“hardware e software per derivare prodotti fotogrammetrici da immagini digitali usando tecniche manuali e tecniche automatiche”*.

I sistemi fotogrammetrici digitali sono generalmente suddivisi secondo lo schema indicato in figura 1; è possibile individuare i componenti che formano l'unità di acquisizione dell'immagine digitale (scanner e camere digitali) e i componenti che definiscono le stazioni fotogrammetriche digitali (*Digital Photogrammetric Workstation – DWP*).

Per ottenere immagini digitali con caratteristiche geometriche pari a quelle delle copie analogiche si utilizzano scanner fotogrammetrici caratterizzati da elevati valori di risoluzione

geometrica nell'acquisizione dei fotogrammi ed elevata precisione geometrica. Le camere digitali aeree per una acquisizione diretta delle immagini sono comparse solo recentemente e attualmente sono in fase di sperimentazione. Non è difficile però prevedere tra qualche anno un loro impiego generalizzato.

Le funzioni che un sistema fotogrammetrico digitale deve essere in grado di eseguire possono essere schematicamente descritte come:

- importare le immagini digitali da vari formati (TIFF, BMP, JPEG)
- eseguire l'orientamento interno (in maniera manuale e/o automatica);
- eseguire l'orientamento esterno (tramite TA manuale e/o automatica);
- consentire il ricampionamento epipolare delle immagini;
- eseguire l'estrazione automatica del DEM;
- consentire la restituzione stereoscopica vettoriale;
- essere in grado di produrre l'ortofoto digitale.

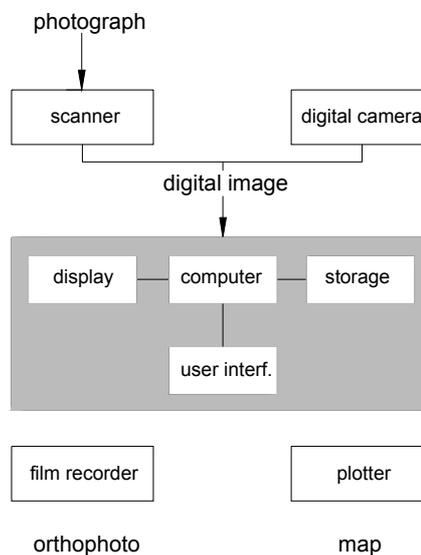


Fig. 1 – Schema di un sistema fotogrammetrico digitale; l'area in grigio comprende i componenti di una stazione fotogrammetrica digitale (da Schenk, 2000).

L'unità di acquisizione

L'unità di acquisizione consente di ottenere l'immagine digitale sia direttamente, tramite camere digitali, che indirettamente, attraverso la conversione da analogico a digitale tramite scanner. Attualmente quest'ultima procedura è quella impiegata nella totalità delle applicazioni in fotogrammetria aerea.

Una immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale composta da righe e colonne; tale rappresentazione, definita *raster*, si ottiene suddividendo l'immagine fotografica in elementi di dimensioni finite, *pixel* (*picture element*), ed associando ad ognuno di essi un numero che rappresenta la radiometria della porzione di immagine fotografica contenuta. Ogni pixel è individuato univocamente da due numeri interi che rappresentano la posizione in riga e colonna all'interno della matrice. Per convenzione nelle immagini digitali l'origine del sistema righe/colonne è posto nell'angolo in alto a sinistra (Fig. 2).

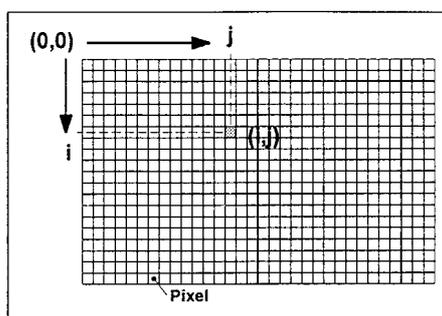


Fig. 2 – Immagine digitale.

Una volta fissato un opportuno sistema di riferimento, è possibile associare direttamente ad ogni pixel delle coordinate. In fotogrammetria il sistema di riferimento (x_i, y_i) che consente di individuare metricamente i pixels dell'immagine digitale viene definito secondo la seguente convenzione:

- asse x parallelo al lato superiore dell'immagine digitale e orientato verso destra;
- asse y parallelo al lato sinistro dell'immagine digitale e orientato verso il basso;
- origine spostata di mezzo pixel in alto a sinistra rispetto all'angolo in alto a sinistra dell'immagine digitale.

Il pixel in tale sistema assume una dimensione finita pari a Δx_i e Δy_i .

Si può determinare così una corrispondenza biunivoca tra la posizione del pixel (i, j) ed il sistema (x_i, y_i) (Fig 3). Infatti il baricentro del pixel risulta individuato nel seguente modo:

$$\Delta x_i \text{ baricentro} = i \cdot \Delta x_i$$

$$\Delta y_i \text{ baricentro} = j \cdot \Delta y_i$$

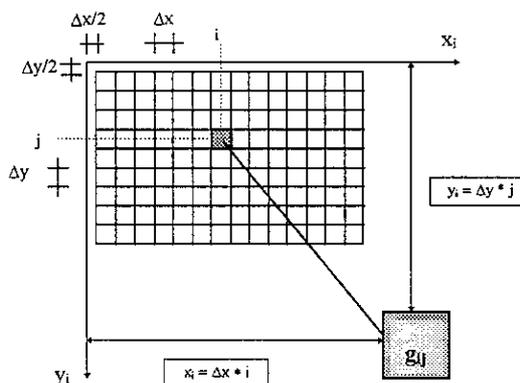


Fig. 3 – Sistema di riferimento in una immagine digitale

Pertanto in fotogrammetria digitale la misura tradizionale delle coordinate immagine è sostituita dall'identificazione del pixel all'interno della matrice, identificazione che, per quanto possibile, può essere fatta automaticamente.

La qualità dell'immagine dipenderà quindi da come sono state associate le coordinate e il rispettivo valore di radiometria all'immagine dal sistema di acquisizione (scanner, camere digitali).

La risoluzione radiometrica

La *risoluzione radiometrica* di un'immagine digitale è legata al numero di bit utilizzati per rappresentare il suo valore radiometrico e generalmente varia da 1 a 8 bit. Il numero di livelli rappresentabili è pari a $2^{(\text{numero di bit per pixel})}$. Dunque un'immagine con una risoluzione radiometrica a 1 bit determina una rappresentazione binaria in cui i pixel possono assumere soltanto valori uguali a 0 corrispondente al bianco e 1 corrispondente al nero (immagine in bianco e nero).

Naturalmente tale rappresentazione non è utilizzata in fotogrammetria dove invece le immagini hanno una risoluzione radiometrica a 8 bit (1 byte) corrispondente a 256 livelli cromatici. Comunemente viene posto 0=nero e 255=bianco ottenendo valori intermedi che rappresentano le varie gradazioni di grigio (immagini a livello di grigio). La scelta di suddividere l'intervallo tra nero e bianco in 256 parti è giustificato da due considerazioni pratiche:

- l'occhio umano può distinguere soltanto circa 80 grigi diversi;
- un intero compreso tra 0 e 255 può essere memorizzato in 1 byte.

Se l'immagine digitale deve rappresentare oggetti a colori la rappresentazione della radiometria avviene secondo modalità diverse.

Ogni colore viene scomposto nelle tre componenti fondamentali (rosso, blu e verde) e a sua volta ciascun componente è suddiviso in 256 valori che variano da 0 (=assenza di colore) a 255 (=saturazione del colore). La radiometria di un pixel viene quindi rappresentata, secondo i criteri della sintesi additiva, dalla somma dei tre numeri interi che esprimono la saturazione delle tre componenti principali; per cui ogni pixel richiede 24 bit (3 byte) per la rappresentazione e l'immagine avrà 16.7 milioni di colori (immagini RGB o true color).

La risoluzione geometrica

La *risoluzione geometrica* di una immagine digitale è legata alle dimensioni del pixel; queste sono direttamente collegate alla densità di campionamento (o *discretizzazione*). La risoluzione indica il numero di pixel contenuti in una opportuna unità di lunghezza che viene solitamente espressa in *dot per inch (dpi)* o punti per pollice¹. I pixel utilizzati in fotogrammetria sono generalmente quadrati per cui una immagine con risoluzione di 400 dpi corrisponde ad un pixel di dimensione di 64 μm in entrambe le direzioni. Stabilita la risoluzione di acquisizione è infatti possibile calcolare la dimensione del pixel corrispondente secondo la relazione:

$$d_{\text{pixel}} [\mu\text{m}] = 25400/\text{dpi}$$

Dalla risoluzione dell'immagine dipende la corretta visualizzazione dei particolari più piccoli e la precisione geometrica conseguibile durante le operazioni di orientamento.

Per valutare la risoluzione ottimale per una corretta visualizzazione bisogna considerare i seguenti tre fattori:

¹ 1 pollice = 2.54 cm

- il potere separatore dell'occhio umano arriva a circa 6-8 lp/mm (linee per mm) corrispondenti a circa 300-400 dpi;
- le possibilità di visualizzazione dei monitor sono in genere circa di 1000 dpi;
- il contenuto informativo delle tradizionali fotografie ha ad una risoluzione di 60÷80 lp/mm corrispondenti a 4000 dpi.

Appare quindi evidente che se dovessimo considerare soltanto i primi due punti, lavorando con immagini acquisite a 1000 dpi non avremmo nessun problema di visualizzazione; potremmo però perdere parte delle informazioni contenute nella fotografia.

Ma l'aumento della risoluzione, anche se possibile, comporta un aumento dell'occupazione di memoria tale che, pur disponendo di PC abbastanza potenti, le immagini potrebbero diventare difficilmente gestibili (Tab. 1).

Risoluzione	Numero di pixel	Occupazione di memoria per immagini a livello di grigio	Occupazione di memoria per immagini RGB
100	810000	0.8 Mb	2.4 Mb
400	12960000	13 Mb	39 Mb
600	29160000	28.5 Mb	85.5 Mb
1000	81000000	81 Mb	243 Mb
1200	116640000	113.9 Mb	314 Mb
2400	466560000	455.6 Mb	1.4 Gb
4000	1296000000	1.3 Gb	3.9 Gb

Tab. 1 – Risoluzioni di acquisizione e corrispondente occupazione di memoria per un fotogramma aereo.

Gli scanner fotogrammetrici

Come già anticipato, il passaggio dai fotogrammi analogici alle immagini digitali avviene mediante l'operazione di scansione. Questa operazione comporta però l'introduzione di una serie di errori nell'immagine prodotta (distorsioni geometriche) tali da influenzare le successive operazioni fotogrammetriche. Per tale motivo sono stati prodotti appositi scanner, definiti appunto fotogrammetrici, in grado di mantenere pressoché inalterate le informazioni geometriche dei fotogrammi originali.

In maniera schematica, le principali caratteristiche che uno scanner fotogrammetrico deve possedere sono:

- elevato valore della risoluzione geometrica di acquisizione (fino a 4000 dpi);
- alto valore dell'accuratezza geometrica ($< \pm 2\div 5 \mu\text{m}$);
- elevate qualità radiometriche;
- tempi di scansione ridotti;
- possibilità di acquisire direttamente dai negativi e dalle diapositive;
- predisposizione per supporti che consentono di acquisire direttamente dai rulli;
- capacità di operare in modalità *batch*

Uno scanner fotogrammetrico (Fig. 4) dovrebbe quindi essere in grado di acquisire i fotogrammi con risoluzione ottica corrispondente alla risoluzione della foto aerea analogica. Se si considera che generalmente tale valore risulta di 60÷100 lp/mm; se ne deduce che la risoluzione di acquisizione dovrebbe essere pari ad almeno 3000÷5000 dpi (corrispondenti ad un pixel di 8÷5 μm).

L'incertezza nel posizionamento dei pixel non dovrebbe inoltre essere maggiore di $\pm 2\div 5 \mu\text{m}$ in considerazione della precisione richiesta in alcune applicazioni fotogrammetriche come la triangolazione aerea.

La risoluzione radiometrica dovrebbe essere generalmente compresa tra 8 e 32 bit. I tempi di acquisizione variano tra i 5 e i 30 minuti in funzione della risoluzione di acquisizione. E' inoltre prevista, in alcuni modelli, la possibilità di eseguire l'orientamento interno in automatico.

La loro diffusione è però fortemente limitata dagli elevati costi che ancora presentano. Per tale motivo è stata sperimentata la possibilità di utilizzare, per scopi fotogrammetrici, anche scanner non specificatamente realizzati per applicazioni di questo tipo; si parla in questi casi di scanner del tipo DTP (*Desk Top Publishing*). Il loro uso è generalmente limitato a tutte quelle operazioni dove non sono necessarie alte risoluzioni di acquisizione ed elevate precisioni geometriche.



Fig. 4 – Scanner fotogrammetrico Zeiss *SCAI* (attualmente prodotto con il marchio *Z/I Imaging*).

I sistemi fotogrammetrici digitali

Le stazioni fotogrammetriche digitali (*Digital Photogrammetric Workstation - DPW*) sono costituite da un sistema informatico dotato di elevate risorse di memoria di massa e di RAM, da un apparato per la visione stereoscopica direttamente sul monitor del PC, da un insieme di periferiche (*mouse, trackball*) per la collimazione tridimensionale e da un software per la gestione delle procedure fotogrammetriche di orientamento e di restituzione (Fig. 5).



Fig. 5 – Stazione fotogrammetrica digitale APEX PCI.

Il loro sviluppo è strettamente collegato al miglioramento delle prestazioni dei computer negli ultimi anni. Infatti, da una prima serie di stazioni fotogrammetriche digitali realizzate su hardware dedicato (*workstation* con sistemi operativi UNIX) con costi estremamente alti, si è gradualmente passati a sistemi più economici, utilizzabili su piattaforme PC, con sistemi operativi Windows NT o Windows 2000.

Attualmente esistono nel mercato numerose stazioni in grado di risolvere efficacemente tutte le operazioni tipiche della fotogrammetria digitale, come le operazioni di orientamento, più o meno automatiche, la restituzione e la produzione di ortofoto digitali (Fig. 6).

Negli ultimi anni sono stati proposti diversi schemi per classificare i vari sistemi digitali, basati essenzialmente sulle funzioni disponibili o sui prodotti che potevano essere realizzati. Secondo uno di questi possono essere individuate quattro categorie diverse (Dowman, 1991):

- a. stazioni fotogrammetriche digitali con prestazioni analoghe ai restitutori analitici e con un elevato grado di automatismo;
- b. stazioni fotogrammetriche digitali con prestazioni analoghe a quelli dei restitutori analitici con funzioni di *image processing* e CAD;
- c. sistemi realizzati per applicazioni specifiche di alte prestazioni ma con limitate funzionalità;
- d. sistemi con prestazioni e funzioni limitate ma di basso costo.

Allo stato attuale è spesso difficile ricondurre un sistema ad una delle quattro categorie su esposte; generalmente si preferisce semplificare questa suddivisione individuando, tra i sistemi esistenti in commercio, quelli di elevate prestazioni caratterizzati da un elevato grado di automazione in quasi tutte le funzioni, da strumentazione hardware con notevoli risorse, da costi elevati, e quelli denominati *low-cost digital photogrammetric systems (LC-DPS)*

caratterizzati dall'utilizzo di soluzioni hardware e software dal costo limitato, da prestazioni limitate e da un basso grado di automazione in alcune funzioni tipiche della fotogrammetria digitale.

Le procedure di orientamento e restituzione eseguite tramite la stazione fotogrammetrica digitale offrono il notevole vantaggio di consentire la collimazione automatica sui fotogrammi. Tale procedura è basata sul perfezionamento, negli ultimi anni, degli algoritmi di *image matching* (algoritmi di autocorrelazione).

Gli algoritmi di *image matching* permettono il riconoscimento sulle immagini di segnali o forme prestabilite al fine dell'individuazione automatica di punti omologhi. Il loro impiego rappresenta sicuramente l'aspetto più innovativo e più interessante della fotogrammetria digitale in quanto consente di risolvere, in maniera automatica, molte operazioni tipiche della fotogrammetria digitale come le fasi di orientamento interno o di individuazione dei punti di legame in triangolazione aerea.

La ricerca dei punti omologhi, tramite *image matching*, può attualmente essere eseguita con precisione inferiori alla dimensione del pixel (autocorrelazione subpixel). Questo permette di raggiungere, in funzione delle risoluzioni di acquisizione, precisioni paragonabili a quelle dei restitutori analitici.

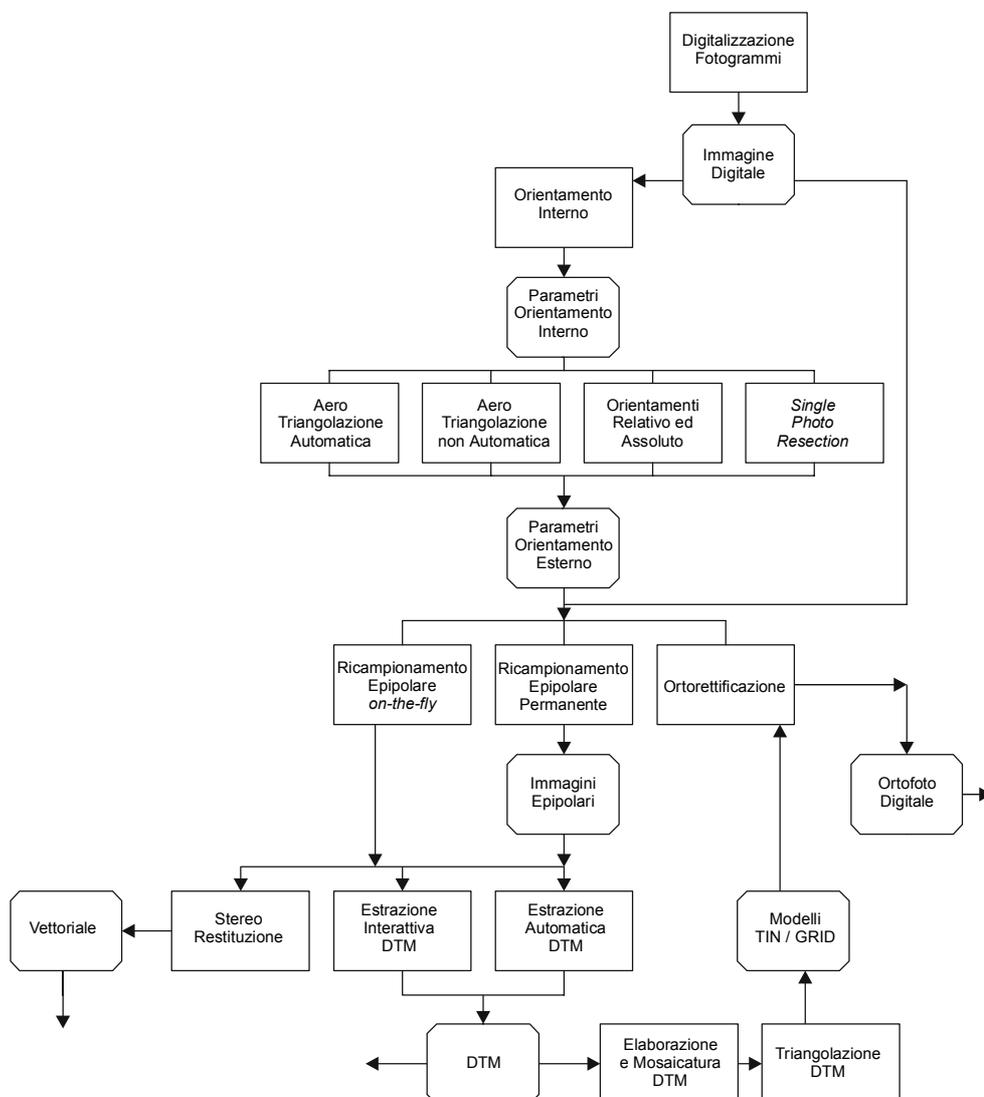


Fig. 6 - Flusso di lavoro in fotogrammetria digitale (da Nicoletti, 1998, mod.)

I sistemi di visione stereoscopica

I sistemi di visione stereoscopica attualmente utilizzati sono sostanzialmente due:

- con occhiali a polarizzazione attiva
- con schermo a polarizzazione attiva e occhiali passivi.

Entrambi i sistemi si basano sullo stesso principio secondo il quale le immagini vengono visualizzate nel monitor in maniera alternata ad elevate frequenze. La visualizzazione dell'immagine sinistra con l'occhio sinistro e dell'immagine destra con l'occhio destro viene resa possibile nel primo caso con un paio di occhiali polarizzanti a cristalli liquidi che, tramite un sincronizzatore a raggi infrarossi collegato con il monitor, oscura, con le stesse frequenze di visualizzazione, alternativamente la vista all'occhio sinistro e all'occhio destro. A causa delle elevate frequenze di visualizzazione, non percepibili dall'occhio umano, di fatto si ricreano le condizioni per la visione stereoscopica attraverso la separazione dell'immagine di sinistra da quella di destra.

Nel caso dello schermo polarizzante, le due immagini vengono oscurate da uno schermo a cristalli liquidi posto di fronte al monitor e collegato al computer. L'operatore indossa dei normalissimi occhiali polarizzati che consentono, anche in questo caso, la separazione delle due immagini (Fig. 7).

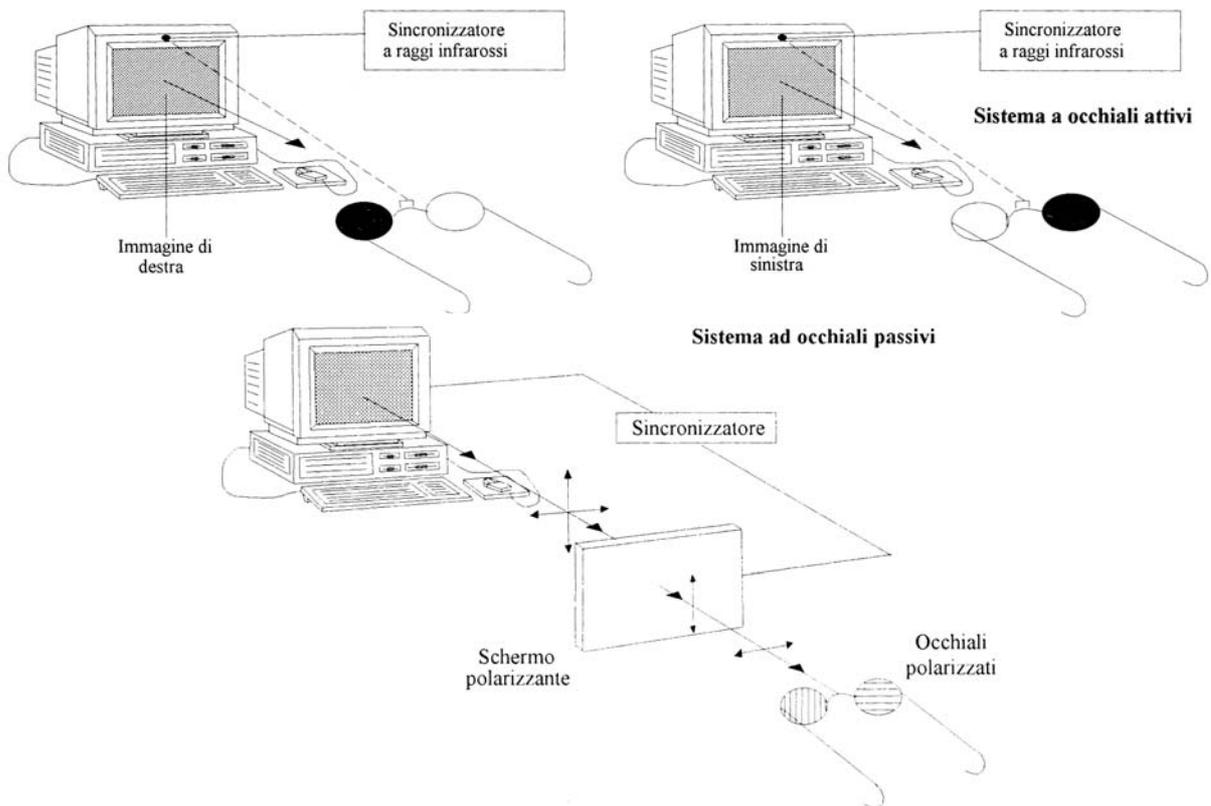


Fig. 7 – Sistemi per la visione stereoscopica nelle stazioni fotogrammetriche digitali.

Gli algoritmi della fotogrammetria digitale

L'automazione delle procedure fotogrammetriche digitali è basata sul perfezionamento, avvenuto soprattutto in questi ultimi anni, degli algoritmi di autocorrelazione (image matching) tali che permettono il riconoscimento sulle immagini digitali di segnali o forme al fine di individuare, in maniera automatica, punti omologhi.

Il loro impiego rappresenta quindi l'aspetto più innovativo delle tecniche fotogrammetriche digitali in quanto consentono di limitare o, in alcuni casi, di eliminare l'intervento diretto dell'operatore.

Il loro grado di perfezionamento permette attualmente il riconoscimento di punti omologhi con precisioni inferiori alle dimensioni del pixel (autocorrelazione sub-pixel). In questo modo vengono raggiunte, in funzione anche della risoluzione delle immagini, precisioni analoghe a quelle dei restitutori analitici.

Le operazioni di correlazione possono essere eseguite attraverso il riconoscimento sulle immagini di entità differenti; possono essere considerati i valori radiometrici delle immagini (livelli di grigio), può essere utilizzata la presenza di elementi geometrici semplici (punti, linee, aree), possono essere adoperate le relazioni spaziali che esistono tra gli elementi stessi. In funzione della diversa tipologia di entità che viene considerata è possibile suddividere i vari metodi di autocorrelazione in tre gruppi:

- algoritmi di *Area Based Matching (ABM)*;
- algoritmi di *Feature Based Matching (FBM)*;
- matching relazionale.

Tralasciando gli ultimi due metodi, che hanno un impiego più limitato nel campo fotogrammetrico, descriviamo sinteticamente le caratteristiche degli algoritmi di Area Based Matching.

Il metodo Area Based Matching si basa sul confronto statistico dell'intensità di grigio tra i pixel delle immagini. Nel processo vengono considerate due piccole porzioni di immagine, denominate image patches, delle quali una, definita matrice sagoma (target o template), viene tenuta fissa su una immagine mentre l'altra, definita matrice di ricerca (search matrix o search window), viene fatta muovere sull'altra immagine fino ad individuare l'esatto punto corrispondente secondo un criterio predefinito. Le due tecniche più conosciute e più impiegate in fotogrammetria per l'individuazione dei punti sono: Cross-Correlation e Least-Squares Matching.

La tecnica di Cross-Correlation si basa sul criterio statistico della "massima correlazione" tra i livelli di grigio della matrice sagoma rispetto alla matrice di ricerca. Si assume come posizione cercata quella a cui corrisponde il massimo valore del coefficiente di correlazione, calcolato per tutte le possibili posizioni della matrice di ricerca nell'immagine. Il coefficiente di correlazione r è dato da:

$$r = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$$

dove σ_1 e σ_2 rappresentano gli s.q.m. della densità della matrice sagoma e della matrice di ricerca e σ_{12} la covarianza delle due matrici.

Introducendo, nella relazione precedente, le funzioni g_1 e g_2 dei livelli di grigio rispettivamente per la matrice sagoma e per la matrice di ricerca, si ottiene la seguente relazione:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (g_{1i} - \bar{g}_1) \cdot (g_{2i} - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (g_{1i} - \bar{g}_1)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (g_{2i} - \bar{g}_2)^2}}$$

con

g_{1i} = livello di grigio della matrice sagoma nel punto i ;

g_{2i} = livello di grigio della matrice ricerca nel punto i ;

\bar{g}_1 e \bar{g}_2 = media aritmetica dei livelli di grigio nella matrice sagoma e nella matrice di ricerca;

n = il numero totale di pixel.

La precisione che è possibile raggiungere tramite questa tecnica è però limitata al livello del pixel.

Nel caso in cui si vuole ottenere una precisione maggiore, al livello sub-pixel, è necessario utilizzare la tecnica Least Squares Matching. Questa considera anche le distorsioni radiometriche e le deformazioni geometriche esistenti fra la matrice sagoma e la matrice ricerca. Tali differenze sono sempre presenti perché si tratta di due immagini distinte dello stesso oggetto ottenute da due punti di prospettiva diversi. Inoltre sono accentuate da vari fattori che introducono delle modificazioni sia da punto di vista radiometrico che geometrico. Per esempio le differenze nell'illuminazione, nel diverso sviluppo dei negativi, nel processo di scansione possono modificare sensibilmente i valori radiometrici tra le due immagini; gli effetti dovuti a variazioni di scala e rotazioni tra i due fotogrammi o alla irregolarità della superficie del terreno possono invece produrre distorsioni geometriche.

Occorre quindi tenere conto di tali effetti applicando una opportuna trasformazione geometrica e radiometrica tra la matrice sagoma e la matrice ricerca.

Considerando delle porzioni di immagine sufficientemente piccole si può ipotizzare che la radiometria vari secondo una relazione lineare e che la variazione geometrica tra matrice sagoma e di ricerca possa essere rappresentata da una trasformazione affine.

Possiamo quindi considerare ulteriori parametri introdotti da questi effetti (due per la radiometria e sei per la geometria) ed applicare una compensazione ai minimi quadrati per la loro determinazione.

Se consideriamo il caso bidimensionale, teoricamente potremmo scrivere le funzioni dei livelli di grigio della matrice sagoma e di ricerca in un generico punto di coordinate x, y coincidono:

$$g_1(x, y) = g_2(x, y)$$

A causa delle deformazioni geometriche e delle distorsioni radiometriche presenti si avrà invece:

$$g_1(x, y) = f[g_2(u, v)]$$

con $u = u(x, y)$ e $v = v(x, y)$.

Per compensare le variazioni radiometriche possiamo introdurre un fattore moltiplicativo dei livelli di grigio (g) e una traslazione radiometrica (equivalente ad uno spostamento nella scala dei livelli di grigio).

Le trasformazioni geometriche tra la matrice sagoma e la matrice di ricerca può essere invece assimilata ad una trasformazione affine a 6 parametri, quindi possiamo scrivere:

$$u = ax+by+c \quad e \quad v = dx+ey+f$$

L'equazione che rappresenta il confronto tra la matrice sagoma e quella di ricerca può quindi essere scritta come:

$$g_1(x, y) = g \cdot g_2(ax + by + c, dx + ey + f) + s$$

La tecnica Least Squares Matching è una procedura iterativa; i parametri calcolati durante le prime iterazioni sono utilizzati nel calcolo delle iterazioni successive. E' necessario però che i valori iniziali approssimati della posizione della matrice di ricerca siano conosciuti con una precisione sufficientemente elevata (circa ± 2 pixel) affinché il calcolo della correlazione possa fornire risultati corretti. Per questo motivo, molto frequentemente, le due tecniche, Cross Correlation e Least Squares Matching, sono utilizzate assieme nei processi di correlazione; la prima consente il posizionamento dei punti con precisione al livello del pixel, la seconda ridefinisce la posizione con precisione sub-pixel. Il risultato della correlazione in questi casi determina l'individuazione della posizione di un punto con precisioni elevate pari a $\pm 0.1 \div 0.2$ pixel.

Il processo di autocorrelazione può essere distinto nelle seguenti fasi:

- 1) selezione dell'entità per la correlazione in una immagine;
- 2) individuazione della corrispondente entità su un'altra immagine;
- 3) calcolo della posizione nello spazio del punto considerato;
- 4) valutazione della qualità della correlazione.

La prima riguarda la selezione dell'entità sul fotogramma che dovrà essere successivamente utilizzata per la correlazione. In questo caso possono essere utilizzati alcuni operatori matematici, denominati "*operatori di interesse*", che, secondo criteri prestabiliti, consentono di individuare su ogni fotogramma i punti che meglio si prestano ad una successiva correlazione. In maniera automatica viene quindi eseguito lo stesso processo che si ha quando, in fotogrammetria analitica, un operatore individua particolari delle immagini ben visibili da utilizzare per le operazioni di orientamento o di restituzione. In fotogrammetria digitale vengono utilizzati soprattutto "*operatori di interesse*" che consentono il riconoscimento di entità puntuali o lineari.

La fase successiva della ricerca del punto individuato su un'altra immagine potrebbe risultare eccessivamente onerosa, dal punto di vista dei calcoli da eseguire e dei tempi di elaborazione, se fosse considerato l'intero fotogramma. E' quindi indispensabile ridurre lo spazio di ricerca con opportuni accorgimenti. Il primo metodo è rappresentato dalla scomposizione piramidale delle immagini. Questa tecnica prevede il ricampionamento dell'immagine digitale originale in una serie di immagini a risoluzione ridotta che vengono denominate *immagini piramidali* (Fig. 8).

Il processo di correlazione viene fatto iniziare nelle immagini a risoluzione più bassa in maniera tale da potere sfruttare la posizione calcolata come posizione approssimata per il livello successivo. In questo modo viene quindi limitata l'area di ricerca nell'intorno della posizione trovata in precedenza. E' un approccio di tipo gerarchico e la correlazione termina quando la correlazione viene eseguita sull'immagine originale (Fig. 9).

Un secondo metodo si basa invece sulla geometria epipolare, cioè sulla condizione teorica secondo la quale i fotogrammi si trovano sullo stesso piano e i punti omologhi possono essere ricercati lungo delle linee (linee epipolari). Questa condizione, che nella realtà non si verifica, può essere imposta, noti i parametri di orientamento, ai fotogrammi in maniera tale da limitare la ricerca dei punti omologhi soltanto lungo una direzione (Fig. 10).

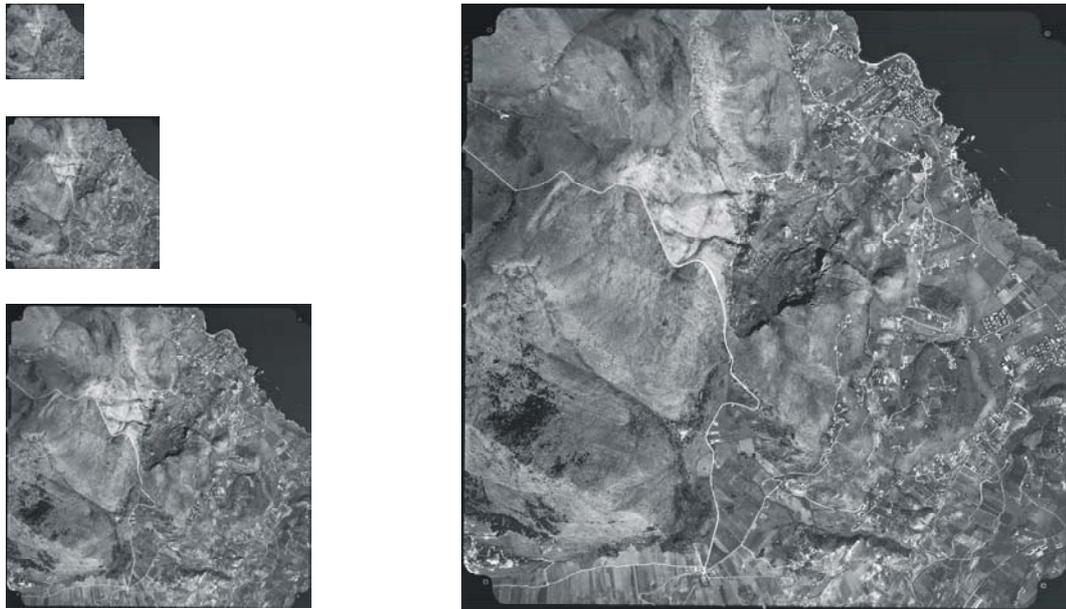


Fig. 8 – Scomposizione piramidale dell'immagine.

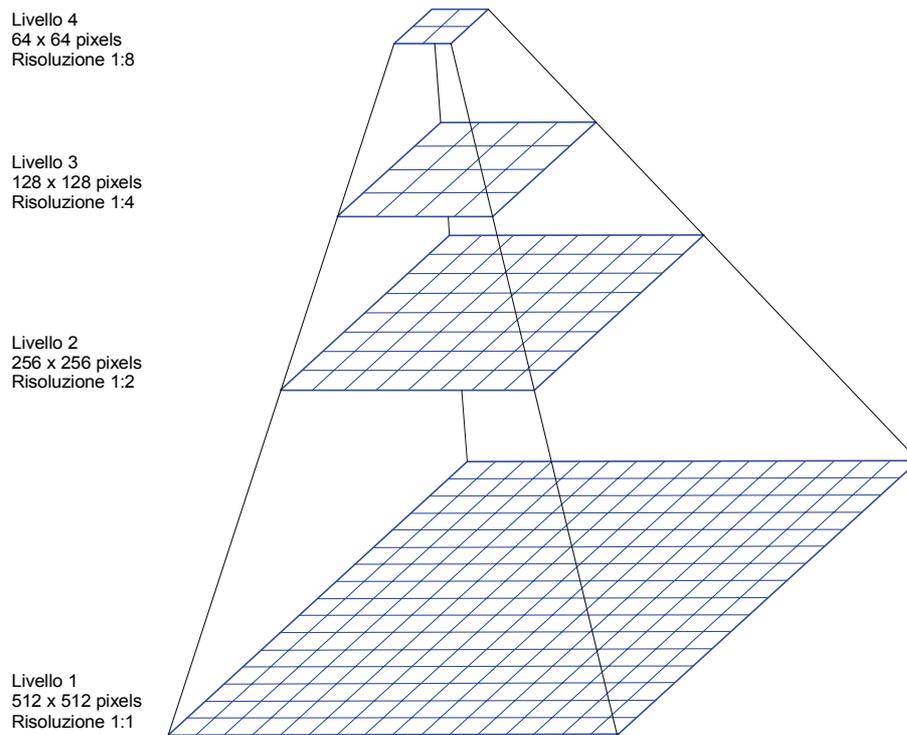


Fig. 9 – Le operazioni di correlazione iniziano al livello a risoluzione più bassa e terminano in quello a risoluzione più alta.

Le fasi di calcolo della posizione dei punti viene eseguita per mezzo degli algoritmi descritti precedentemente, mentre la valutazione della qualità del processo è eseguita per mezzo del valore dell'indice di correlazione calcolato durante il processo. Tale indice, però, non sempre risulta attendibile per garantire la totale affidabilità della procedura automatica. Il problema della presenza di errori di correlazione non sufficientemente segnalati è attualmente il limite maggiore per rendere totalmente automatiche alcune operazioni della fotogrammetria.

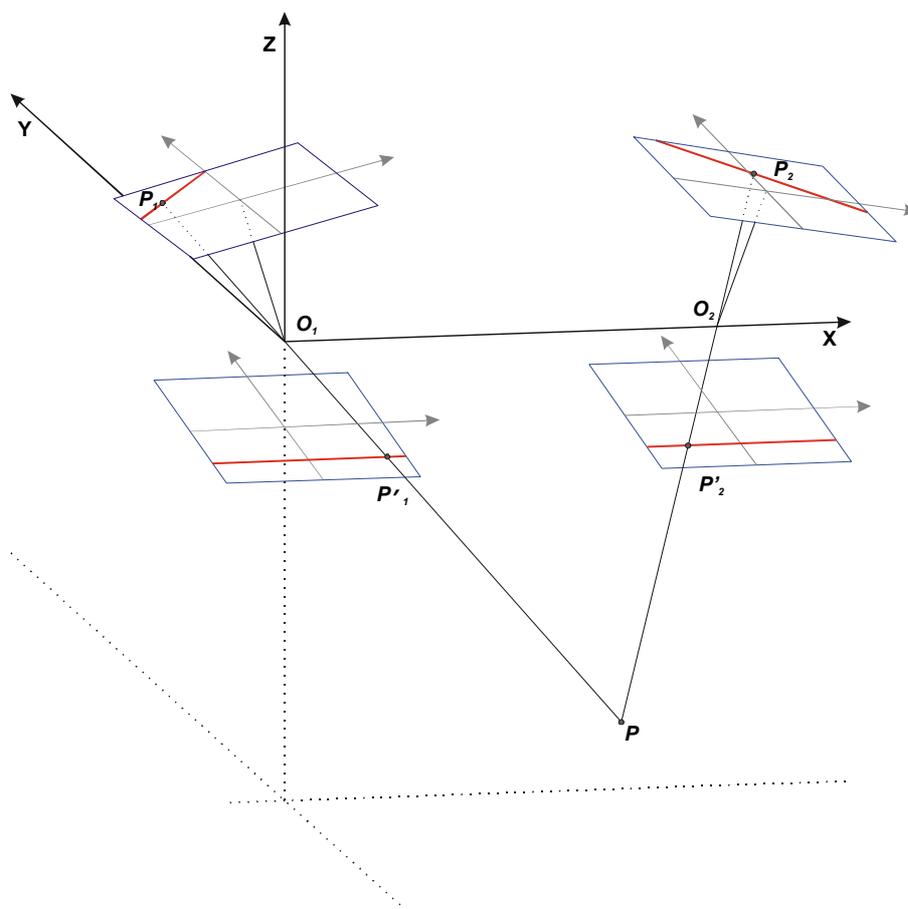


Fig. 10 – Geometria epipolare in una coppia di fotogrammi aerei.

Procedure di orientamento automatiche

Come già sottolineato nei paragrafi precedenti, l'aspetto più rilevante della fotogrammetria digitale consiste nella possibilità di eseguire in modalità automatica molti dei processi fotogrammetrici.

In realtà la completa automazione, in molti casi, non è ancora stata raggiunta; pertanto dovrebbe essere più corretto parlare di processi con un alto grado di automazione che richiedono cioè un modesto e/o occasionale intervento da parte dell'operatore. Alcuni autori suggeriscono pertanto di utilizzare il termine *autonomus*, in contrapposizione al termine *automatic*, per indicare quei processi totalmente automatici che non prevedono nessun tipo di intervento esterno.

L'automazione delle fasi di orientamento dei fotogrammi ha rappresentato sempre uno dei principali obiettivi della fotogrammetria digitale. In particolare, i moduli per l'orientamento automatico dovrebbero idealmente possedere le seguenti caratteristiche (Heipke, 1997):

- essere moduli *autonomus* (nel senso specificato precedentemente);
- eseguire le operazioni di orientamento in tempi più ridotti rispetto alle procedure interattive;
- fornire risultati più precisi rispetto alle procedure interattive;
- potere operare in maniera indipendente rispetto al tipo di immagine o di camera utilizzata (fotogrammi aerei, immagini da satellite, prese con camere terrestri);
- potere utilizzare differenti tipi di informazioni per le operazioni di orientamento e di controllo (punti, linee, aree, DTM);
- potere lavorare anche con immagini di scarsa qualità;
- possedere procedure di auto-diagnosi per la valutazione della qualità dell'orientamento.

Pur essendosi registrati negli ultimi anni notevoli progressi nell'automazione delle operazioni di orientamento, non tutte le caratteristiche elencate sono presenti nei sistemi fotogrammetrici attualmente in commercio. Moduli per l'orientamento interno automatico e per la triangolazione aerea automatica sono, infatti, componenti standard di molti sistemi; il loro grado di automazione e di affidabilità complessiva è ancora oggetto di ricerca e sperimentazione. Le loro caratteristiche principali sono descritte in breve nei paragrafi successivi.

Orientamento interno automatico

L'orientamento interno in fotogrammetria digitale consente di stabilire una relazione tra il sistema di coordinate pixel dell'immagine e quello riportato dal certificato di calibrazione della camera. Tale operazione può essere eseguita, in modalità manuale, attraverso la collimazione delle marche sull'immagine da parte di un operatore. Se consideriamo invece un approccio di tipo automatico questa fase può essere considerata come l'individuazione sulle immagini digitali di geometrie e/o forme prestabilite attraverso gli algoritmi di *image matching*.

Le marche fiduciali hanno, infatti, forme geometriche prestabilite, che variano in funzione delle differenti camere fotogrammetriche, ma che possono essere catalogate e utilizzate come *matrice sagoma* nel processo di autocorrelazione (Fig. 11).

Il processo di orientamento interno automatico richiede sostanzialmente che vengano eseguite le seguenti operazioni:

- identificazione e localizzazione delle marche fiduciali con una precisione sub-pixel;
- capacità del sistema di distinguere i diversi tipi di marche, in funzione della camera fotogrammetrica utilizzata, e di individuare le marche anche in condizioni non ideali (marche parzialmente digitalizzate, con scarsa luminosità, con imperfezioni dovute allo sviluppo, ecc.);

- possibilità di lavorare con copie su negativo e/o su diapositive;
- impiego di fotogrammi in bianco e nero e/o a colori;
- individuazione delle marche anche su immagini con risoluzioni geometriche non molto elevate dove il punto centrale può anche non comparire.

Il riconoscimento delle marche è realizzato secondo i due metodi di *image matching* già descritti precedentemente (*ABM* e *LSM*)



Fig. 11 – Alcuni esempi di marche fiduciali; da sinistra a destra le camere fotogrammetriche Zeiss, Leica e Wild.

Il processo possiede un alto grado di automatismo; viene eseguito senza alcun intervento manuale dell'operatore restituitista. Il calcolo è effettuato, con tempi molto ridotti, contestualmente su tutti i fotogrammi che compongono la strisciata o il blocco fotogrammetrico. Al termine del processo è possibile eseguire un controllo dei residui per evidenziare la presenza di eventuali errori della collimazione; nei casi in cui il processo automatico non è riuscito ad individuare correttamente tutte le marche è necessario l'intervento dell'operatore per la loro rideterminazione.

Attualmente tutti i sistemi fotogrammetrici digitali di elevate prestazioni eseguono con successo le operazioni di orientamento interno automatico.

Triangolazione aerea automatica

Teoricamente un sistema per la triangolazione aerea automatica dovrebbe essere in grado di eseguire le seguenti operazioni:

- scegliere, trasferire e misurare i punti di legame;
- riconoscere e misurare i punti di appoggio;
- eseguire la compensazione del blocco.

Attualmente la fase di riconoscimento e misura dei punti di appoggio costituisce ancora un problema non risolto sia per le difficoltà operative che comporta (gli unici esempi sperimentali sono infatti limitati soltanto all'individuazione di punti presegnalizzati prevalentemente in fotogrammetria terrestre) che per lo scarso interesse che esiste nell'automazione di questa fase dell'orientamento. La misura interattiva dei punti di appoggio, in triangolazione aerea è, infatti, limitata ad un numero molto ridotto di punti e non richiede tempi particolarmente lunghi.

Le procedure automatiche sono quindi essenzialmente finalizzate all'individuazione e alla misura dei punti di legame (*tie points*). Tali operazioni vengono eseguite, nei sistemi digitali, in due fasi distinte. Nella prima, attraverso l'impiego degli "operatori di interesse" è possibile individuare sulle immagini i punti, definiti *interest points*, che meglio si prestano ad una successiva correlazione. Nella seconda, tramite gli algoritmi di *image matching*, vengono misurati i punti selezionati e vengono determinate le loro coordinate.

Per facilitare le operazioni di correlazione, molti sistemi utilizzano le immagini piramidali; la sequenza delle operazioni, selezione dei punti e correlazione, viene ripetuta per ogni livello aumentando progressivamente il numero di punti cercati, fino ad arrivare, nel livello a massima risoluzione, alla configurazione scelta.

Il numero e la disposizione dei punti di legame nei fotogrammi rappresentano dei parametri fondamentali per un corretto calcolo di triangolazione; sono stabiliti in una fase iniziale dall'utente in funzione dei parametri del volo e delle caratteristiche dei fotogrammi. La loro posizione può essere definita secondo schemi prestabiliti (*tie points pattern*) che prevedono la localizzazione di numerosi punti in corrispondenza di zone ben determinate del fotogramma (*points areas*), oppure una disposizione regolare su tutto il fotogramma.

Tutti i sistemi prevedono l'inserimento di alcuni parametri indispensabili per eseguire il calcolo. I dati relativi alla ripresa fotogrammetrica, come il numero di fotogrammi, il numero di strisciate, il ricoprimento longitudinale e trasversale, la quota media di volo e la quota media del terreno, rappresentano le informazioni minime per definire un orientamento approssimato dei fotogrammi. Per migliorare e facilitare le operazioni di correlazione possono essere inserite, se disponibili, anche informazioni relative alla posizione approssimata dei centri di presa o all'andamento della superficie del terreno tramite la disponibilità di un DTM della zona.

Nella triangolazione analitica il numero di punti di legame utilizzati per fotogramma e la loro disposizione è generalmente costante in quasi tutte le situazioni. Vengono adoperati infatti nove punti di legame posizionati secondo la classica disposizione di *Von Grüber*; la loro individuazione e la loro misura, eseguite in maniera molto accurata, consentono di ottenere risultati estremamente precisi.

Nella triangolazione automatica le condizioni sono sostanzialmente diverse. I punti di legame possono ricadere su due, tre o più fotogrammi, a secondo che colleghino fra di loro due fotogrammi, due modelli adiacenti o due strisciate. A causa delle differenze, talvolta anche notevoli, esistenti tra i fotogrammi, soprattutto se appartengono a strisciate diverse, in relazione alla diversa illuminazione, alla differente prospettiva, all'irregolarità della superficie, il processo di correlazione può comportare però la presenza di un numero anche elevato di punti errati, non sempre facilmente individuabili ed eliminabili. La scarsa precisione dei punti viene quindi compensata dal loro numero. Tale considerazione deriva dal fatto che il calcolo dei parametri di orientamento è influenzato dall'accuratezza dei punti e dalla ridondanza. L'aumento di quest'ultimo fattore, ottenuto da un aumento del numero dei punti di legame (anche superiore a 100), può quindi compensare la minore accuratezza dei punti.

In questi ultimi anni numerosi ricercatori si sono occupati dello studio delle problematiche connesse alla triangolazione aerea automatica al fine di valutarne le potenzialità e definirne i limiti. In particolare, un importante test internazionale organizzato dal *European Organisation for Experimental Photogrammetric Research (OEEPE)* e dal *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)* sulle prestazioni dei sistemi digitali per l'estrazione automatica dei punti di legame (Heipke, 1998; Heipke & Eder, 1999) ha permesso di conseguire risultati di grande interesse su alcuni aspetti della triangolazione aerea digitale.

I risultati ottenuti in questi ultimi anni dimostrano l'efficacia delle procedure di triangolazione aerea automatica sia per quanto riguarda la riduzione dei tempi di lavoro che le precisioni conseguite.

Alcune situazioni probabilmente però risultano ancora critiche soprattutto nel caso in cui si hanno strisciate con notevoli variazioni di scala, o fotogrammi di zone urbane o con fitta vegetazione.

La ricerca è finalizzata a dotare i software di controlli interni automatici più rigorosi per l'eliminazione di tutti i punti non ben correlati. In questo modo, l'intervento dell'operatore, che è ancora necessario per il controllo e l'editing dei punti, risulterebbe ridotto al minimo.

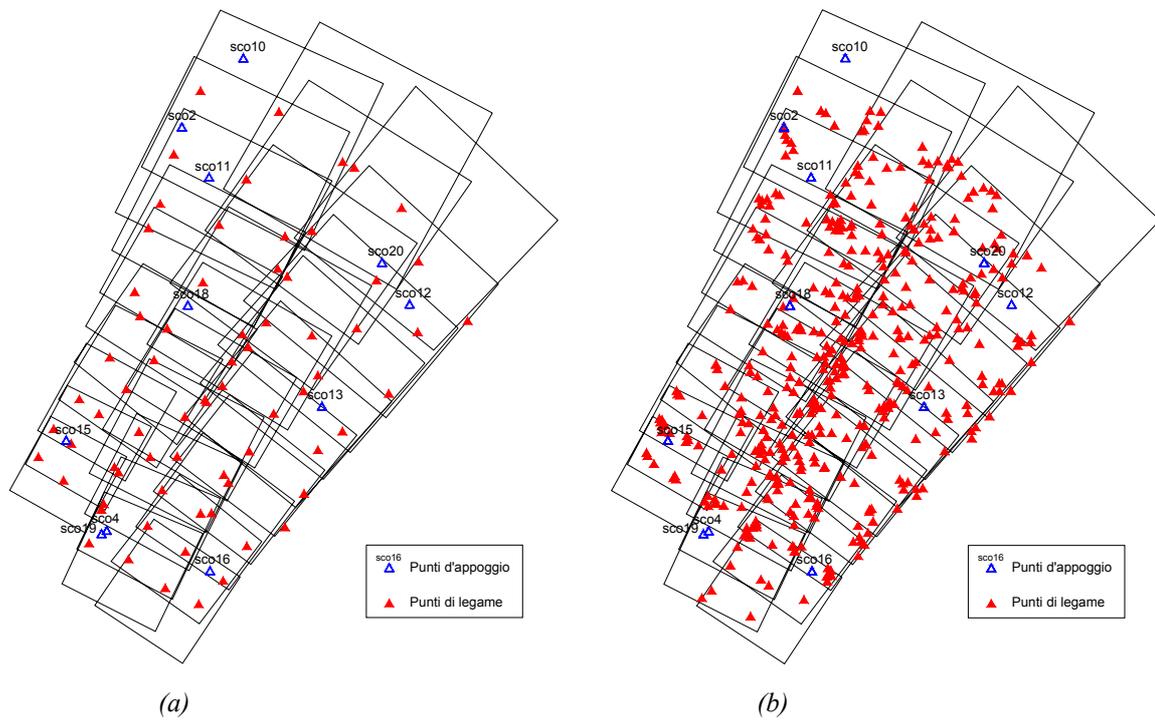


Fig. 12 – Distribuzione dei punti di legame in un blocco fotogrammetrico nel caso di triangolazione manuale (a) e automatica (b).

Procedure di ausilio alla restituzione

Terminate le fasi di orientamento (interno ed esterno) il processo di autocorrelazione può essere applicato con successo per la determinazione tridimensionale delle coordinate dei punti nel modello stereoscopico. L'individuazione automatica dei punti omologhi può essere considerata come il processo equivalente alla collimazione stereoscopica di un punto da parte dell'operatore.

Soprattutto nel caso di operatori inesperti, i comandi di autocorrelazione risultano molto utili per la corretta determinazione delle quote durante le operazioni di restituzione (Fig. 13).

Inoltre se eseguiamo il calcolo secondo una griglia regolare di punti possiamo ottenere il DEM della zona considerata.

Il calcolo automatico del DEM è stato uno dei primi prodotti ricavati dallo sviluppo delle tecniche digitali.

Come per la determinazione dei punti di legame in triangolazione aerea, anche in questo caso è quasi sempre necessaria una fase di controllo ed eventualmente di editing dei punti.

I risultati sono comunque molto soddisfacenti soprattutto nel caso di un utilizzo del DEM finalizzato alla produzione di ortofoto digitali. Il calcolo invece di DEM che consentono di estrarre le curve di livello per scopi cartografici risulta invece più problematico soprattutto in quelle zone dove la presenza di oggetti e ostacoli di vario tipo impedisce di considerare esclusivamente la superficie del terreno.



Fig. 13 – La figura superiore mostra la collimazione manuale approssimata sull'immagine destra del punto collimato su quella sinistra; la figura inferiore mostra il risultato del perfezionamento della collimazione manuale tramite autocorrelazione.

Raddrizzamento e ortoproiezione

Nei paragrafi precedenti abbiamo sempre considerato almeno due immagini fotografiche dello stesso punto per potere risalire alle sue coordinate spaziali.

Esistono però due tecniche che si prefiggono di determinare solamente le coordinate planimetriche dei punti fotografici attraverso l'uso di un singolo fotogramma. Queste due tecniche prendono il nome di *raddrizzamento* e *ortoproiezione*.

Il *raddrizzamento* consente di trasformare la fotografia di un oggetto piano, presa con un assetto qualsiasi, in una proiezione ortogonale dell'oggetto stesso.

L'*ortoproiezione* (o *raddrizzamento differenziale*) consente invece di trasformare la fotografia di un oggetto qualunque nella sua proiezione ortogonale considerando però di conoscere l'andamento altimetrico dell'oggetto stesso.

Il raddrizzamento

L'approccio analitico del raddrizzamento di una fotografia è abbastanza semplice. La fotografia è una realtà bidimensionale e i suoi punti possono essere definiti in un sistema di riferimento piano, detto *sistema immagine* (materializzato per esempio dalle marche del fotogramma). Nella ipotesi iniziale anche l'oggetto ripreso è piano e di conseguenza anche i suoi punti possono essere definiti in un sistema di riferimento piano detto *sistema oggetto*.

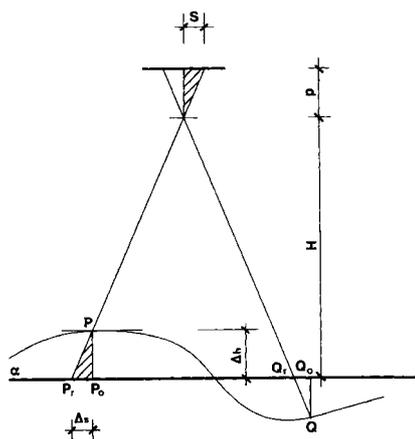


Fig. 11

Lo scopo del raddrizzamento è quello di trasformare le coordinate immagine di un punto nelle sue coordinate oggetto. Si tratta quindi di definire una trasformazione piana che consenta di

collegare questi due sistemi di riferimento. In questi casi il modello matematico utilizzato è l'*omografia*, trasformazione piana a 8 parametri; si può dimostrare che le formule della trasformazione omografica possono essere ricavate a partire dalle formule più generali della

fotogrammetria, le equazioni di collinearità, nel caso in cui gli oggetti del rilevamento possono essere assimilati a superfici pressoché piane.

Operativamente si procede misurando sul fotogramma almeno 4 punti di cui sono state determinate le coordinate oggetto; in questo modo è possibile calcolare gli 8 parametri necessari che consentono di passare dal sistema immagine a quello oggetto.

E' evidente che tale procedura è utilizzabile soltanto se è soddisfatta la condizione iniziale ovvero se l'oggetto è assimilabile ad un piano.

Se consideriamo in figura 11 un generico punto P distante Δh dal piano di raddrizzamento possiamo notare che la sua immagine, invece di essere proiettata correttamente in P_0 viene a formarsi in P_r . La quantità Δs rappresenta l'errore del raddrizzamento e viene detto comunemente *errore di altezza*.

Con semplici considerazioni di similitudine si può dimostrare che:

$$\Delta s = \Delta h \cdot \frac{s}{p}$$

dove s è la distanza dell'immagine di P dal punto principale del fotogramma e p la distanza principale della camera utilizzata per la ripresa.

Se il raddrizzamento viene eseguito alla scala $1/n$, l'errore grafico risulta:

$$\Delta' s = \frac{1}{n} \cdot \Delta s = \Delta h \cdot \frac{s}{np}$$

Come è facile osservare, l'errore d'altezza diminuisce al crescere della distanza principale della camera e al diminuire della distanza dell'immagine fotografica del punto considerato dal punto principale.

In sede di progetto di una presa per l'esecuzione di un raddrizzamento è necessario conoscere il valore Δh massimo ammissibile affinché l'errore grafico di altezza $\Delta' s$ risulti accettabile.

Le tecniche del raddrizzamento sono estesamente impiegate nel rilevamento fotogrammetrico architettonico soprattutto per il rilevamento delle facciate degli edifici. In questi casi, infatti, le superfici dei prospetti possono molto spesso essere considerate come superfici piane. Inoltre la disponibilità di numerosi programmi, anche abbastanza semplici da utilizzare, per l'esecuzione in forma digitale dei raddrizzamenti (detti anche *fotopiani*) ha contribuito notevolmente alla loro estesa applicazione nel campo architettonico.

L'ortoproiezione

Se l'oggetto da rappresentare non è piano, oppure non è considerabile come tale in base a quanto esposto precedentemente, si fa ricorso alla tecnica dell'ortoproiezione. In questo caso, anziché operare su tutta l'immagine fotografica, come si faceva per il raddrizzamento, si opera su piccole porzioni dell'immagine riproducenti un'area dell'oggetto che può essere considerata nei limiti prima esposti piana. Su ognuna di queste porzioni si esegue il raddrizzamento e le immagini risultanti vengono mosaicate in un'unica immagine che viene a coincidere con la proiezione ortogonale dell'oggetto ripreso.

In una fotografia di un oggetto non piano la scala varia da punto a punto in funzione della distanza tra il punto oggetto e il centro di proiezione (Fig. 12). Poiché lo scopo è quello di ottenere una riproduzione planimetrica a scala costante (detta *ortofoto*) deve essere mantenuta

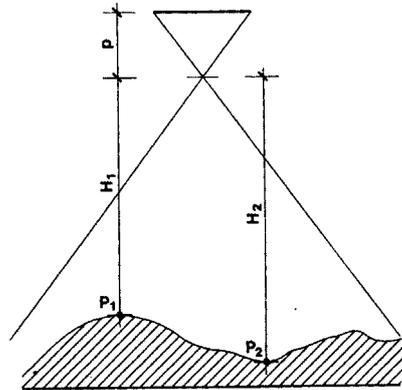


Fig. 12

costante la scala delle singole porzioni di immagini raddrizzate. Questa operazione è possibile conoscendo l'andamento altimetrico della superficie dell'oggetto che quindi consente di variare opportunamente per ogni singola porzione la distanza di presa mantenendo così sempre costante la scala.

L'ortoproiezione è ampiamente utilizzata in fotogrammetria aerea dove la modellazione digitale del terreno viene eseguita in maniera abbastanza rapida ed efficace con numerosi programmi.

Nel campo architettonico le ortofoto sono per lo più utilizzate per la rappresentazione e la restituzione bidimensionale di superfici regolari deformate (come mosaici o pavimenti).

Raddrizzamento e ortoproiezione di immagini digitali

L'uso delle immagini digitali consente di ottenere in modo semplice ed economico immagini-raddrizzate e ortoproiettate senza far ricorso ai costosi strumenti descritti nel capitolo precedente ma utilizzando un personal computer e un opportuno software.

Il raddrizzamento digitale avviene nel seguente modo:

- si calcolano i parametri dell'omografia che consente di passare dalle coordinate oggetto alle coordinate immagine;

- si scompone l'area compresa tra i quattro punti di appoggio in una griglia di maglie quadrate di dimensioni pari al pixel dell'immagine che si vuole generare;
- di ogni maglia (pixel) si conoscono le coordinate del baricentro. Con i parametri dell'omografia si trasformano tali coordinate nel sistema immagine e si determinano i numeri di riga e colonna corrispondenti sull'immagine di partenza;
- il valore radiometrico letto sull'immagine originale in corrispondenza dei valori di riga e colonna determinati nel passo precedente viene assegnato al pixel dell'immagine raddrizzata preso in esame.

Questa procedura viene ripetuta con il metodo esposto o con altre tecniche più sofisticate, per ogni pixel dell'immagine raddrizzata che viene così generata pixel per pixel.

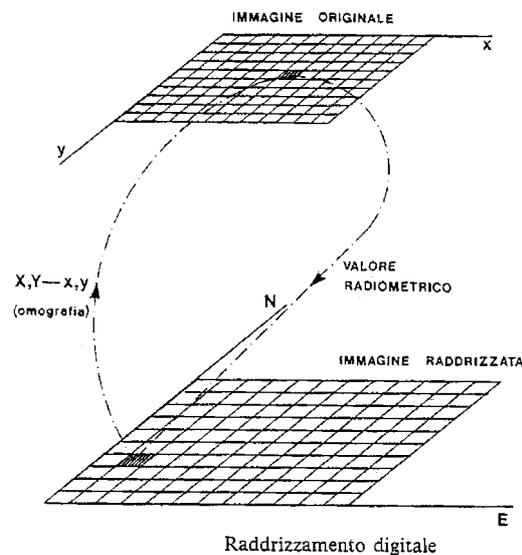


Fig. 11 – Raddrizzamento digitale

L'ortoproiezione digitale avviene in modo analogo. Come noto si deve disporre di un'immagine a orientamento esterno noto e di un DEM dell'oggetto. Quindi si procede secondo il seguente schema operativo:

- si scompone l'area dell'ortoproiezione in pixel di dimensioni opportune;
- determinate le coordinate terreno X, Y del baricentro del primo pixel si determina la quota Z a esso associata mediante un'interpolazione sul DEM;
- le coordinate X, Y, Z vengono prospettivizzate utilizzando le equazioni di collinearità e quindi si determinano i numeri di riga e colonna corrispondenti sull'immagine originale;
- il valore radiometrico del pixel individuato sull'immagine originale viene attribuito al pixel considerato sull'immagine ortoproiettata.

Ripetendo tale ciclo per ogni pixel dell'immagine finale si ottiene il risultato voluto. Esistono in commercio moltissimi programmi sia di raddrizzamento sia di ortoproiezione digitale con prezzi variabili da circa 1500÷2000 Euro fino a più di 50000 Euro; le differenze di prezzo sono dovute essenzialmente alle tecniche di interpolazione e di ricampionamento utilizzate e alla possibilità di inserire sull'immagine finale curve di livello, toponomastica e altre informazioni accessorie.

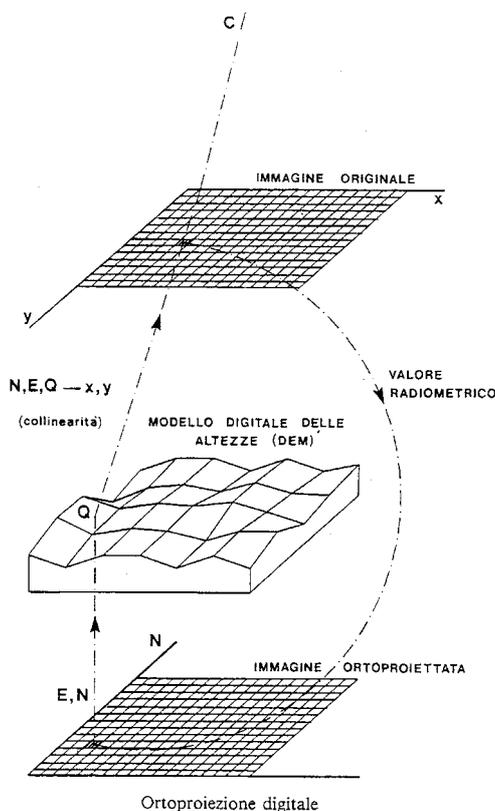


Fig. 12 – Ortoproiezione digitale

Bibliografia

- Crosilla F., Visintini D. (1998) – *Stato dell'arte e prospettive della fotogrammetria digitale*. Atti della 2° Conferenza Nazionale A.S.I.T.A., Bolzano, 24-27 Novembre 1998, vol. I, pagg. 17-32.
- Dequal S., Rinaudo F. (1995) – *La fotogrammetria digitale*. Boll. SIFET, n.2, 1995, pagg. 17-23.
- Dowman I. (1991) – *Design of digital photogrammetric workstations*. In *Digital Photogrammetric Systems*, Ebner/Fritsch/Heipke eds, Wichmann, Karlsruhe, 28-38.
- Forlani G., Pinto L. (2000) – *Applicazioni innovative della fotogrammetria digitale*. Atti della 4° Conferenza Nazionale A.S.I.T.A., Genova, 3-6 Ottobre 2000, vol. I, pagg. XXXI-XLIII.
- Galetto R., (1994) – *La fotogrammetria digitale*. Boll. SIFET, n.1, 1994, pagg. 19-40.

- Heipke C., Saisi P., Stefani M. (1994) – *La fotogrammetria digitale: dalla calibrazione della camera, all'acquisizione delle immagini fino alla restituzione discreta di oggetti tridimensionali*. Rivista del Dipartimento del Territorio, n.2, 1994, pagg. 43-104.
- Heipke C., Eder K. (1999) – *Performance of tie point extraction in Automatic Aerial Triangulation*. OEEPE Official Publication n.37, December 1999, pagg. 231-234.
- Kraus K. (trad. Dequal S.) (1994) – *Fotogrammetria – Teoria e Applicazione*. Ed. Libreria Universitaria Levrotto & Bella, vol. I, Torino.
- Kraus K. (1997) – *Photogrammetry – Advanced Methods and Applications*. Ed. Dummler, vol. II, Bonn.
- Nicoletti A. (1997) – *Tecnica e tecnologia in fotogrammetria digitale alla luce di dieci anni di esperienze*. Atti della 1° Conferenza Nazionale A.S.I.T.A., Parma, 30 Settembre - 3 Ottobre 1997, vol. II, pagg. 523-528.
- Nicoletti A. (1998) – *Produttività, integrabilità ed affidabilità dei sistemi di fotogrammetria digitale*. Atti della 2° Conferenza Nazionale A.S.I.T.A., Bolzano, 24-27 Novembre 1998, vol. II, pagg. 251-256.
- Shenk T. (1999) – *Digital photogrammetry – Background, fundamentals, automatic orientation procedure*. Ed. TerraScience, vol. I.
- Wolf P.R., Dewitt B.A. (2000) – *Elements of photogrammetry with applications in GIS*. Ed. McGraw-Hill, 3° edition.