

CAMERE DIGITALI PER RIPRESE AEREE E TERRESTRI

Riccardo Galetto

Dipartimento di Ingegneria Edile e del Territorio – Università di Pavia

galetto@unipv.it

Premessa

Questo lavoro riprende il tema trattato nella relazione ufficiale tenuta in occasione della VIII Conferenza ASITA, che si è svolta a Roma nel dicembre del 2004. L'argomento viene qui ripreso ed ampliato con la presentazione di altre camere digitali e con qualche approfondimento su alcuni argomenti tecnici come il funzionamento dei sensori e la correzione elettronica dell'effetto di trascinamento dell'immagine durante il tempo di esposizione.

La tecnologia delle camere digitali è in continuo progresso e quindi ciò che alla data di oggi può lasciarci stupiti per il grado di evoluzione raggiunta sarà presto superato nel medio periodo da nuove realizzazioni.

Scopo di questa relazione è quindi fare il punto della situazione ad oggi su quello che il mercato offre per soddisfare le esigenze delle riprese aeree e terrestri, ma soprattutto illustrare, con un linguaggio semplice, la struttura e il funzionamento dei sensori digitali e proporre un inquadramento metodologico per la valutazione delle prestazioni, dal punto di vista della geometria della presa, dei vari tipi di camera.

1. Caratteristiche delle immagini digitali.

Prima di addentrarci nell'argomento è opportuno fare due brevi considerazioni di carattere generale. Una riguarda la corretta interpretazione del termine *immagine digitale*. 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, 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, ne più ne meno come se osservassimo una fotografia. L'unica differenza consiste nel fatto che l'immagine osservata sullo video di un computer è materializzata dalla 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.

Una vera 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.

Una seconda considerazione riguarda uno degli aspetti che a volte non vengono subito colti e cioè il fatto che 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 tradizionale 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 fotografica e li modificano in modo tale che quando la pellicola subisce il procedimento chimico di sviluppo essi si anneriscono tanto più 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.

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.

Ma 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. 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.

Solo un cenno, però inevitabile, va fatto che l'introduzione delle camere digitali e quindi delle immagini digitali, porterà già nel breve periodo, ad un abbattimento dei costi delle riprese, sia terrestri che aeree.

2. I sensori.

2.1 Struttura dei sensori matriciali.

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 più 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, *charghed-coupled device* e il C-MOS ; il CCD è quello da più tempo utilizzato e molto più largamente usato del C-MOS e quindi prenderemo in considerazione solo il primo.

L'invenzione del CCD, *charghed-coupled device*, che in italiano significa *dispositivo ad accoppiamento di carica*, è avvenuta all'inizio degli anni '70 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 dall'uno all'altro.

Il CCD ha non 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 piastrina 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 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.

Come è noto il formato classico delle camere fotografiche tradizionali amatoriali è di $24 \times 36 \text{ mm}^2$.

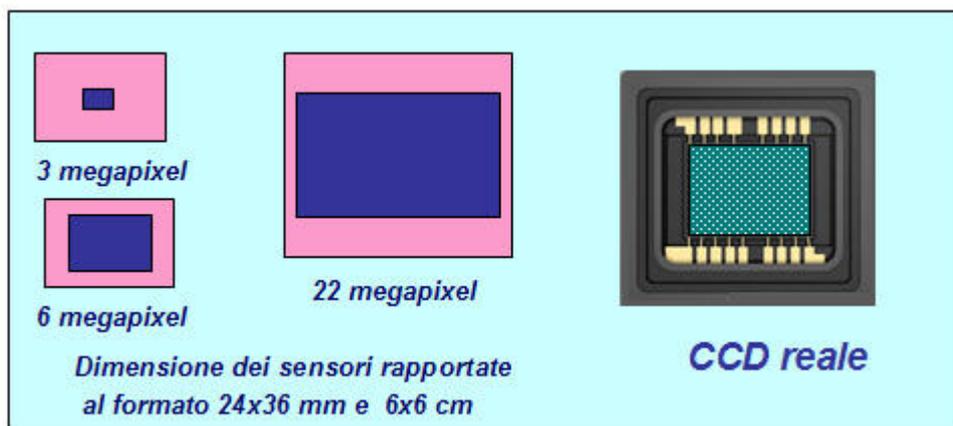


fig. 1

Il sensore delle camere amatoriali digitali che si pongono in alternativa alle camere a pellicola di questo formato hanno sensori molto più piccoli. Solo recentemente la Kodak ha realizzato per la camera DCS Pro 14n un sensore di 3024×4536 pixel (13 megapixel) di $8 \mu\text{m}$ di lato e che ha dunque la dimensione del formato pellicola $24 \times 36 \text{ mm}^2$.

Le camere digitali che si pongono in alternativa alle camere $6 \times 6 \text{ cm}^2$ tendono invece a raggiungere la dimensione dei sensori di $6 \times 4 \text{ cm}^2$.

I sensori più avanzati, che si trovano anche nei dorsali digitali, hanno dunque dimensioni di $38,8 \times 50 \text{ mm}^2$ essendo composti da un array di 4080×5440 pixel (22 megapixel) di $9 \mu\text{m}$ di lato. Come si vede nella fig. 1 non vi è proporzionalità diretta tra numero di pixel e dimensione del sensore; infatti in genere le camere con minor numero di pixel, e quindi di prestazioni e prezzo inferiori a quelle con maggior numero di pixel, hanno anche pixel di dimensioni inferiori.

La funzione del CCD è quello di catturare l'energia che cade sugli elementi fotosensibili del grigliato dei pixel del sensore per il tempo di integrazione e di trasformare questa energia in una matrice di valori numerici.

Per comprendere come ciò avvenga guardiamo, seppure in modo molto schematico e anche approssimato, come sia fatto un CCD, considerandone in particolare il sensore ed esaminando come avvenga il trasferimento delle cariche.

Consideriamo un CCD con un sensore rettangolare di dimensioni $a \times b$; nei disegni che seguono tale sensore è strutturato, per semplicità di trattazione, come un grigliato di quattro righe e cinque colonne, per un totale di 20 pixel; come abbiamo visto in un sensore reale questi grigliati sono composti da molti megapixel.

Il sensore è costituito per la maggior parte da silicio di *tipo p* (positivo). Parallelamente al lato b del sensore si realizzano, nel silicio p dei canali di silicio di *tipo n* (negativo) (v. fig.2).

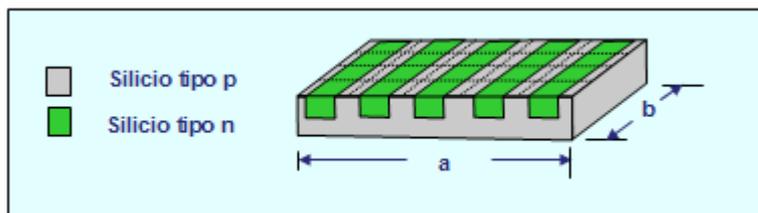


fig. 2

Tra canale e canale di silicio n rimane una striscia di silicio p . Tracciamo un reticolato ideale a maglia quadrata in modo che i lati verticali di questo reticolato ideale cadano nella mezzieria delle strisce intercanale; ogni quadratino di questa maglia costituisce un pixel del sensore (v. fig. 3).

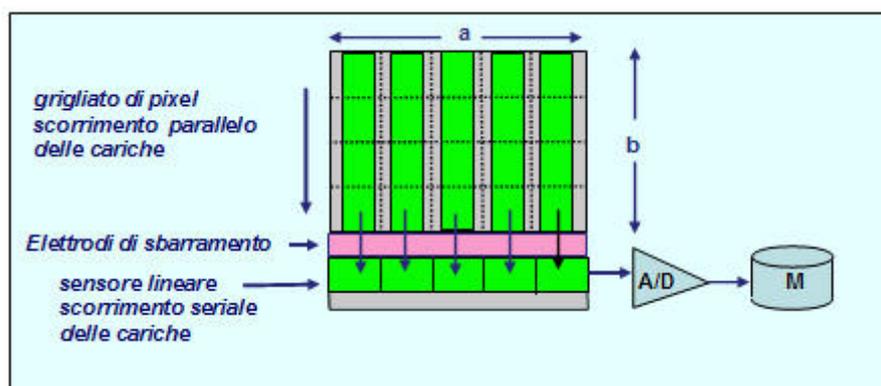


fig. 3

Alla base della matrice si trova un sensore lineare che ha tanti pixel quante sono le colonne della matrice; questo sensore lineare è separato dalla matrice da una barriera di elettrodi di controllo che, opportunamente comandati, impediscono, oppure consentono, il trasferimento delle cariche contenute nei pixel dell'ultima riga del grigliato ai pixel del sensore lineare. L'insieme di questi

elettrodi di sbarramento viene chiamato con terminologia anglosassone *transfer gate*, che possiamo tradurre con *gate di trasferimento*.

Alla fine del sensore lineare vi è un dispositivo **A/D** (*analog to digital converter*) in grado di convertire una carica elettrica in una tensione e quindi in numero ad essa proporzionale; dopo questa trasformazione i numeri vengono memorizzati in forma di matrice **M** numerica su un hard disk o dispositivo simile.

Esaminiamo prima la struttura del pixel prendendo in considerazione un generico pixel e facendone una sezione in senso ortogonale ai canali di silicio **n**, cioè parallelamente al lato **a**. Nella fig. 4 è rappresentata, in maniera molto schematica e non nelle proporzioni reali, la sezione di tre pixel appartenenti a tre canali affiancati e in essa vengono evidenziate le seguenti parti:

- il corpo del cristallo di silicio **p**
- la parte di silicio **n**, che costituisce l'elemento fotosensibile, detto anche fotodiode
- un elettrodo trasparente che, caricato positivamente, crea nel silicio **p** un pozzo (linea al tratto) nel quale spinge e intrappola gli elettroni che si liberano dal silicio **n**

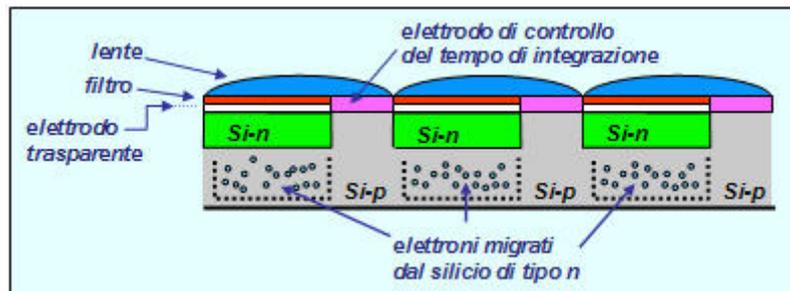


fig. 4

- gli elettroni rilasciati dal silicio **n** e intrappolati nel pozzo per effetto della carica positiva dell'elettrodo trasparente
- un elettrodo che comanda il tempo di integrazione
- il filtro che fa passare solo uno dei colori primari
- una microlente (non sempre presente) che fa convergere la luce che cade su tutta la superficie del pixel sulla superficie del fotodiode

Se sopra il fotodiode non fosse posto alcun filtro la risposta del fotodiode alla luce incidente sarebbe analoga a quella che viene data da una pellicola pancromatica in bianco e nero; in altre parole la carica di elettroni prodotto nel pozzo di un generico fotodiode sarebbe generata da tutta la banda spettrale della luce incidente sul fotodiode stesso.

Quindi, una volta trasformate le cariche di elettroni in una matrice di numeri, questa matrice potrebbe dar luogo, con un passaggio dal digitale all'analogico, solo ad una immagine in bianco e nero.

Per acquisire una immagine digitale che possa dar luogo una sua visualizzazione equivalente a una fotografia a colori, è necessario quindi separare la luce incidente nelle tre componenti primarie RGB (red, blu, green usando la terminologia anglosassone) e registrarne l'energia fotonica corrispondente con tre valori ad essa corrispondenti.

Per far sì che un fotodiode registri, ad esempio, solo la quantità di energia che corrisponde alla banda del blu della luce che su di esso incide, occorre stendere su di esso un filtro che faccia passare solo la banda del blu; ma in tal modo lo stesso fotodiode sarà insensibile alla parte della luce che corrisponde alle bande del verde e del rosso.

Per poter registrare una scena suddividendo la luce che da essa proviene nei tre colori primari occorre allora dedicare una parte dei pixel del CCD alla registrazione delle onde elettromagnetiche che corrispondono al colore primario rosso, una parte alle onde

elettromagnetiche che corrispondono al colore primario verde e una parte alle onde elettromagnetiche che corrispondono al colore primario blu.

La disposizione più usata dei filtri sui fotoni è quella che segue lo schema di Bayer, il quale prevede che il 50% dei pixel riceva la luce verde, il 25% la luce rossa e il 25% la luce blu. Nella fig. 5a) è indicata la disposizione dei filtri; in b) è indicata la posizione del filtro nel pixel; in c) viene mostrato come tutta la maglia dei pixel del sensore sia coperta dai filtri secondo lo schema di Bayer.

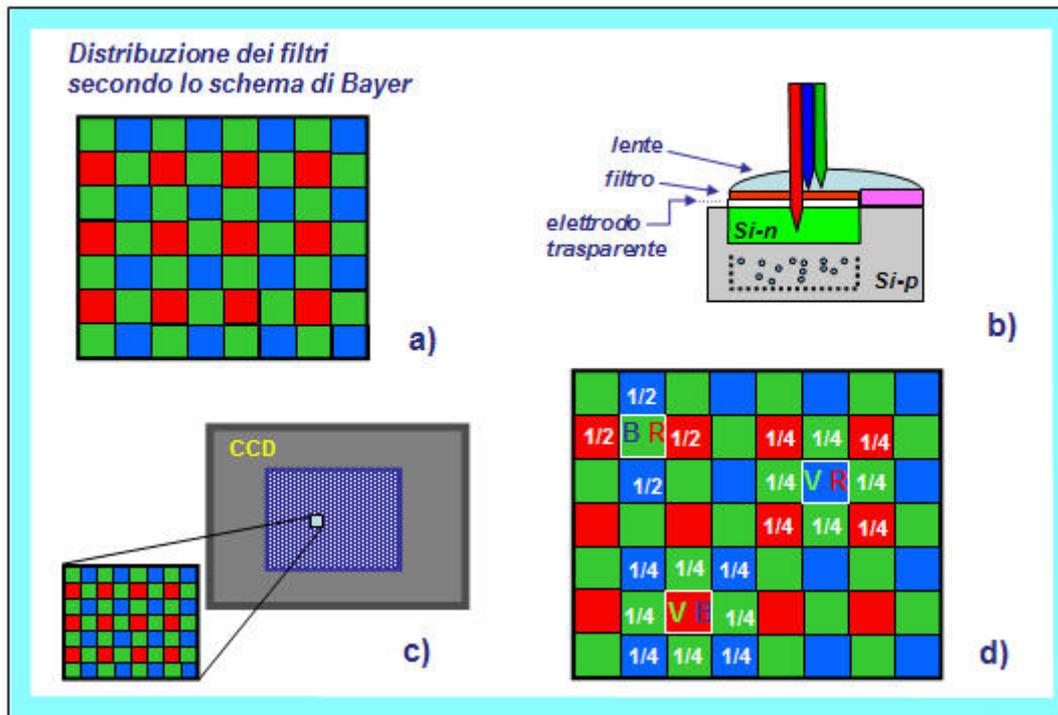


fig. 5.

Questa distribuzione in percentuali diverse dei filtri dei colori deriva dal fatto che l'occhio umano percepisce il verde come colore predominante per la definizione della nitidezza di un'immagine. Inoltre nelle camere fotografiche digitali terrestri con CCD di formato rettangolare che possono portare a inquadrature col lato lungo del CCD verticale o orizzontale, lo schema di Bayer produce lo stesso tipo di immagine indipendentemente dalla modalità di ripresa, sia essa orizzontale o verticale.

In fase di post processing si dovranno derivare, applicando gli algoritmi del caso, per ogni pixel le due componenti di colore che non sono state registrate dal fotodiodo di quel pixel, in funzione dei valori dei due colori mancanti registrati dai pixel adiacenti.

Questo processo di interpolazione può essere effettuato con algoritmi semplici o anche complessi. Nella fig. 5 d) si vede come, per i pixel coperto dal filtro verde, il valore del blu che gli compete possa essere ricavato semplicemente facendo la media dei valori del blu registrati nei due pixel che stanno sopra e sotto di esso; e ugualmente come possa essere ricavato il valore del rosso facendo la media dei valori del rosso registrati nei due pixel che stanno a sinistra e a destra di esso. Per i pixel che sono coperti dal filtro rosso e dal filtro blu si procede invece diversamente. Consideriamo un pixel coperto dal filtro rosso; il valore del verde verrà ricavato come somma di $\frac{1}{4}$ di ciascun valore di verde registrato nei quattro pixel che stanno a sinistra e a destra e sopra e sotto; mentre il valore del blu verrà ricavato dai quattro pixel che stanno sulle due linee diagonali. Lo stesso avviene per il calcolo del valore verde rosso dei pixel coperti dal filtro blu.

Questo è il modo più semplice di fare l'interpolazione; si possono applicare processi di interpolazione più complessi prendendo in considerazione un maggior numero di pixel nell'introno di quello per il quale si devono ricavare i due colori mancanti. Naturalmente l'uso dei filtri secondo lo schema di Bayer riduce l'effettiva risoluzione delle immagini e quindi vedremo che nelle camere aeree fotogrammetriche, dove la risoluzione geometrica dell'immagine è fondamentale, non si userà questo metodo per ricavare le immagini a colori.

In molti casi i fotodiodi impiegati nei sensori sono sensibili anche alla parte dello spettro delle onde elettromagnetiche dell'infrarosso vicino, da 0,7 a 0,8 μm (IR); se si vogliono effettuare riprese a colori ognuno dei tre filtri dovrà schermare oltre a due bande del visibile anche quella dell'IR. Se invece si vogliono effettuare riprese all'IR falso colore si sostituisce, nello schema di Bayer, il filtro B con un filtro che fa passare solo l'IR.

Possiamo ora capire che il sensore di un CCD ha una struttura molto complessa e che in realtà vi è differenza tra dimensione del pixel e dimensione del fotodiodo in esso incluso.

In pratica quando schematizziamo il sensore lo suddividiamo in pixel secondo un grigliato che non lascia spazi vuoti tra pixel e pixel; in realtà una rappresentazione più realistica, ancorché ancora schematica di un sensore, è quella della fig. 6 a) nella quale è messa in evidenza la dimensione del pixel e quella del fotodiodo; la superficie del pixel che contorna il fotodiodo costituisce uno schermo che copre i vari tipi di elettrodi che servono al controllo del tempo di integrazione e al controllo del trasferimento delle cariche da un pixel all'altro.

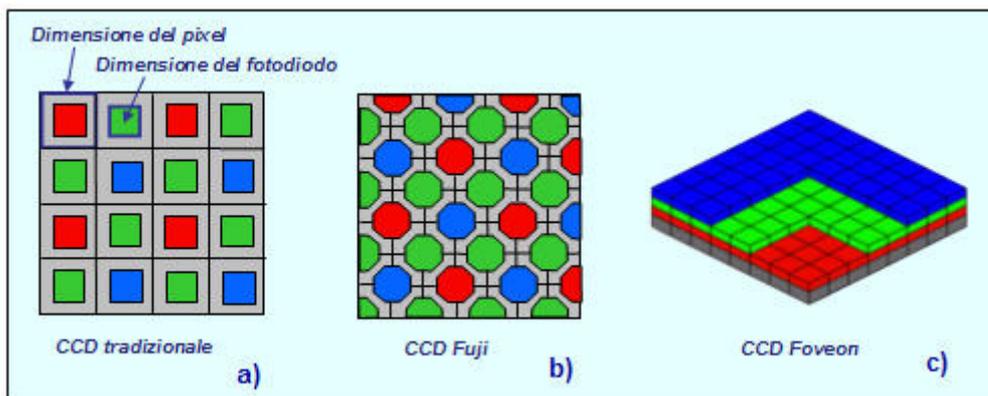


fig. 6

Questo fatto fa sì che la risoluzione effettiva delle immagini acquisite sia in realtà minore di quella nominale e che la parte non acquisita dell'immagine, quella che cade sui canali schermati del sensore, sia ricostruita per interpolazione. Può anche accadere che strutture lineari che cadano sulle zone schermate vadano in parte perdute.

Nei CCD il rapporto tra la superficie del fotodiodo e quella del pixel è circa del 70%; questo rapporto viene detto *fill effect* o fattore di riempimento; questo valore reale aumenta fino ad assumere il valore del 90% quando i fotodiodi sono coperti dalle microlenti.

Per aumentare il fattore di riempimento e ridurre il rischio che strutture lineari vadano perdute, la FujiFilm ha prodotto un CCD di tipo particolare, nel quale i pixel sono di forma ottagonale e disposti in modo quinconce rispetto ai lati del sensore (v. fig. 6 b)); in tale CCD la superficie schermata è minore e inoltre è più raro che l'immagine di una struttura lineare reale ne possa seguire l'andamento, venendo così persa nell'immagine.

Inoltre le lente che copre il pixel per favorire la concentrazione dei fotoni sul fotodiodo si adatta meglio alla forma ottagonale che non a quella quadrata.

Un ulteriore passo avanti per migliorare il modo di acquisire le immagini digitali a colori è rappresentato da un nuovo tipo di sensore che è stato ideato alla fine degli anni novanta dalla Società Foveon dello scienziato Carter Mead. Questo sensore deriva il suo nome, Foveon, dal

fatto di registrare la luce in modo analogo a quanto avviene nella formazione dell'immagine sulla retina dell'occhio umano.

In pratica il fotodiodo non è composto da uno strato di silicio omogeneo, bensì da tre strati che sono sensibili alle tre bande delle onde elettromagnetiche che corrispondono a i tre colori primari.

La realizzazione di questo sensore comporta l'impiego delle più evolute tecnologie nella realizzazione dei sensori, in quanto i tre strati devono essere distribuiti verticalmente in uno spazio di 2 μm . (v. fig. 6 c)).

2.2 Funzionamento dei sensori matriciali.

Ritorniamo ora al funzionamento del sensore e in particolare a come si forma e viene trasferita la carica.

Il meccanismo della creazione della carica avviene così:

- la luce, per un tempo di integrazione regolato dall'apposito elettrodo, cade sulla microlente
- viene filtrata dal filtro
- attraversa l'elettrodo trasparente
- viene focalizzata sull'elemento fotosensibile
- i fotoni della luce trasferiscono energia all'elemento fotosensibile, il quale libera degli elettroni che vengono spinti nel pozzo creato dalla carica positiva dell'elettrodo.

Il fatto che le strisce di silicio n siano completamente immerse nel silicio p impedisce che gli elettroni migrino spontaneamente dai pixel di un canale ai pixel dei canali adiacenti. Non ci soffermiamo su questo problema, ma accenniamo solo al fatto che comunque esistono dispositivi per drenare gli elettroni che fuoriescono, per eccesso di carica, dal loro pixel.

Nel pixel la carica è proporzionale all'intensità della luce che è caduta sull'elemento fotosensibile e al tempo di integrazione.

E' da notare che l'elemento fotosensibile risponde in maniera lineare all'energia che lo colpisce; cioè la carica prodotta è linearmente proporzionale all'energia della luce incidente. Questo fatto costituisce un altro punto di forza della tecnologia digitale rispetto alla ripresa su pellicola, dove invece la linearità tra energia incidente sulla pellicola e sensibilizzazione degli alogenuri d'argento è lineare solo per un certo intervallo. In pratica ciò significa che un sensore è in grado di mantenere un miglior dettaglio anche quando l'energia su di esso incidente è molto bassa; questo fatto si traduce ad esempio, nelle riprese aeree a scopo fotogrammetrico, in una miglior leggibilità dell'immagine nelle zone d'ombra.

Ma la carica che si genera, cioè il numero di elettroni liberati, non è solo proporzionale all'intensità della luce, cioè al numero di fotoni incidenti, e al tempo di integrazione, ma anche alla superficie del fotodiodo. Se la superficie del pixel è piccola anche la zona di silicio p in cui si accumula la carica, quella zona che abbiamo chiamato pozzo, è piccola e quindi succede che il pozzo raggiunge, sempre usando una perifrasi, la sua capienza massima e gli elettroni che eccedono questa capienza fuoriescono dal pozzo e vengono drenati via. Ciò significa in pratica che non si ha più dettaglio nelle zone luminose. Se, per evitare questo inconveniente, si accorcia troppo il tempo di integrazione, i fotodiodi dei pixel che ricevono poca luce potrebbero non essere in grado di liberare elettroni e quindi risulterebbero tutti privi di carica, e si perderebbe il dettaglio nelle zone meno esposte.

E' chiaro quindi pixel di dimensioni più piccole danno meno prestazioni di pixel di dimensioni maggiori.

La capacità di un sensore di dare dettagli sia nelle zone scure che nelle zone chiare, è caratterizzata da quello che viene detto il *range dinamico* e da esso deriva in pratica il numero di livelli in cui può effettivamente essere graduata l'intensità della luce che colpisce il fotodiodo.

In genere nelle camere digitali terrestri questa intensità viene graduata in 256 livelli (registrati con 8 bit); nelle camere digitali che devono dare maggiori prestazioni, ed in particolare quelle per uso fotogrammetrico, si arriva a un dettaglio di 4096 livelli (registrati con 12 bit).

Vediamo ora come, dopo il tempo di integrazione durante il quale si è formata la carica, avvenga il trasferimento della carica da un pixel all'altro, in modo che si possa realizzare lo scorrimento verticale delle cariche tra riga e riga e poi quello orizzontale nel sensore lineare che sta al fondo della matrice, dal quale poi le cariche vengono prelevate per esser convertite in numeri.

Consideriamo allora una sezione del canale che contiene i pixel nel senso del canale stesso, cioè parallelamente al lato a del sensore.

In corrispondenza di ogni pixel si trovano tre elettrodi; quello centrale è quello che abbiamo visto nella figura precedente e che, caricato positivamente, spinge e intrappola gli elettroni nel pozzo che esso genera nel silicio p ; degli altri due elettrodi, con riferimento al percorso che va dall'alto verso il basso lungo il canale, uno precede e uno segue questo elettrodo centrale.

Per illustrare il principio del trasferimento di carica abbiamo riportato nella fig. 7 due pixel consecutivi nello stesso canale verticale del sensore che denominiamo i e $i+1$.

Nella figura sono riportate in sequenza temporale le situazioni che si generano nei due pixel.

- **Situazione 1:** nei due pixel i e $i+1$ gli elettrodi centrali, fino alla fine del tempo di integrazione sono polarizzati positivamente e spingono e tengono intrappolati gli elettroni nei pozzi ad essi sottostanti
- **Situazione 2:** nei due pixel i due elettrodi di destra vengono polarizzati positivamente allargando i pozzi e gli elettroni si distribuiscono nei due pozzi allargati
- **Situazione 3:** viene tolta la tensione ai due elettrodi di centro e i pozzi ad essi sottostanti si chiudono spingendo gli elettroni nei pozzi sottostanti gli elettrodi di destra
- **Situazione 4:** gli elettrodi di sinistra vengono polarizzati positivamente e quindi si crea al di sotto di essi un pozzo che mette in comunicazione il pozzo sotto l'elettrodo di destra del pixel i col pozzo sottostante l'elettrodo di sinistra del pixel $i+1$; nella figura si vede anche che questa azione comincia a far affluire nel pozzo sotto l'elettrodo di sinistra del pixel i , la carica del pixel $i-1$ e comincia a far defluire la carica del pixel $i+1$ nel pozzo sotto l'elettrodo di sinistra del pixel $i+2$
- **Situazione 5:** viene tolta tensione ai due elettrodi di destra e, in tutti i pixel, gli elettroni si raccolgono nei pozzi al di sotto degli elettrodi di sinistra; a questo punto la carica del pixel $i-1$ è stata trasferita al pixel i , la carica del pixel i è stata trasferita al pixel $i+1$ e la carica del pixel $i+1$ è stata trasferita al pixel $i+2$; perché si ricrei la situazione di partenza della situazione 1 occorrono ancora i due passi che seguono
- **Situazione 6:** viene data tensione agli elettrodi di centro; i pozzi sotto gli elettrodi di sinistra vengono messi in comunicazione con quelli centrali;
- **Situazione 7:** viene tolta tensione agli elettrodi di sinistra e il pozzo sotto di loro si chiude; gli elettroni si raccolgono nei pozzi sotto gli elettrodi centrali e il ciclo può ricominciare.

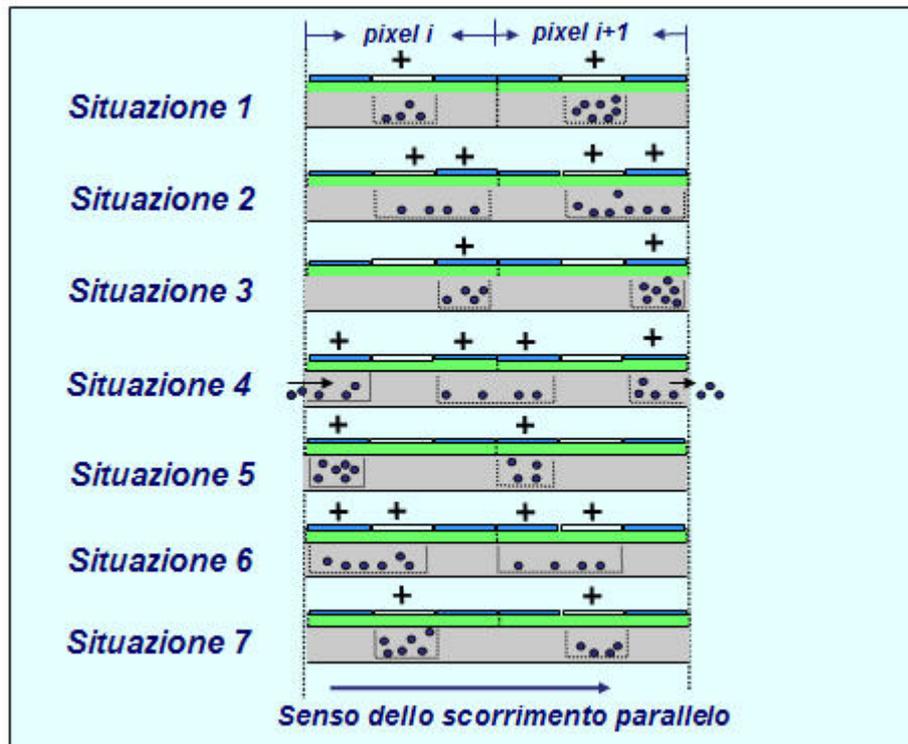


fig. 7

Lo svuotamento viene effettuato cominciando a trasferire le cariche della riga di pixel più in basso del grigliato di pixel del sensore matriciale, nel sensore lineare posto al di sotto di tale riga e da essa separato dal gate di trasferimento (v. fig. 3).

Non appena i pixel dell'ultima riga si sono svuotati dalle cariche, essi vengono riempiti dalle cariche della penultima riga, quella della penultima da quelle della terzultima, e così via. In questa cascata le cariche sono cioè accoppiate nella caduta le une alle altre (da qui il termine di *accoppiamento di carica*).

Vediamo cosa succede alle cariche trasferite nel registro seriale posto alla base della matrice dei pixel e da essa separata dagli elettrodi di sbarramento. La prima carica della riga del sensore lineare viene prelevata dal pixel, trasformata da carica elettrica in una tensione, questa viene amplificata e quindi tradotta in un valore numerico.

Non appena il primo pixel del sensore lineare rimane vuoto, la carica del secondo pixel viene trasferita in esso e tutte le altre avanzano anch'esse di un posto verso destra (ovviamente con riferimento alla figura). Così avviene lo svuotamento del sensore lineare e la trasformazione in forma numerica delle cariche della riga più bassa del sensore.

Non appena questo svuotamento è stato effettuato, quella che era la penultima riga della matrice dei pixel e che ora si trova nell'ultima riga, viene trasferita nel sensore lineare e le cariche di ogni altra riga viene trasferita in quella sottostante rimasta vuota.

La seconda riga di cariche che è stata trasferita nel sensore lineare subisce il trattamento della precedente. Il tutto si ripete fino a che anche l'ultima riga è stata trasferita nel sensore lineare ed elaborata.

Quando un CCD funziona nel modo illustrato si dice che è un *CCD a trasferimento di quadro pieno* o, con terminologia anglosassone, *full frame transfer CCD*. Questa modalità di funzionamento prevede appunto che i pixel funzionino inizialmente per l'acquisizione dell'energia luminosa e poi come registri di scorrimento (*shift register*). Il sensore lineare funziona solo come registro di scorrimento. Gli elettrodi di sbarramento (*transfer gate*) e il sensore lineare sono sempre schermati, mentre la matrice di pixel viene schermata per il tempo di durata del suo svuotamento dalle cariche.

Vi sono altri due tipi di sensori matriciali che qui per brevità non trattiamo: i CCD a *transfer frame*, nei quali oltre alla matrice dei sensori che acquisiscono le immagini ve ne è una di transito, e i CCD a *interline transfer*, nei quali ad ogni colonna di sensori se ne accoppia un'altra, con funzione di registro di scorrimento, per rendere il sensore immediatamente disponibile ad acquisire un'altra immagine.

E' importante avere un'idea dell'ordine di grandezza del tempo richiesto per la trasformazione delle cariche acquisite dal sensore in una matrice di numeri.

Abbiamo visto che dopo l'acquisizione della carica, cioè al termine del tempo di integrazione, comincia lo svuotamento del sensore col trasferimento delle cariche dell'ultima riga di pixel del sensore nel sensore lineare posto alla base del grigliato di pixel; il trasferimento delle cariche di una riga di pixel nella successiva (trasferimento parallelo) avviene in un tempo brevissimo, dell'ordine dei microsecondi. Il tempo maggiore è richiesto invece per lo svuotamento del registro di scorrimento seriale, cioè del sensore lineare dal quale, ad una ad una, le cariche dei pixel vengono amplificate, tradotte in una tensione e infine tradotte in un valore numerico.

Anche se il tempo richiesto per lo svuotamento del registro di scorrimento seriale è solo dell'ordine di alcuni decimi di millisecondo, tenendo conto che i sensori matriciali di maggiori dimensioni possono avere anche cinquemila righe di pixel, ne consegue che il tempo di svuotamento di tutto il sensore può richiedere anche due o tre secondi.

Il tempo di svuotamento del sensore determina in pratica il minimo intervallo di tempo tra l'acquisizione di due immagini successive.

Al fine di diminuire il tempo di svuotamento del sensore nei CCD tecnologicamente più evoluti il registro di scorrimento viene diviso in due, e ciascuna delle due parti fa scorrere le cariche verso un proprio convertitore A/D (v. fig. 8 a)).

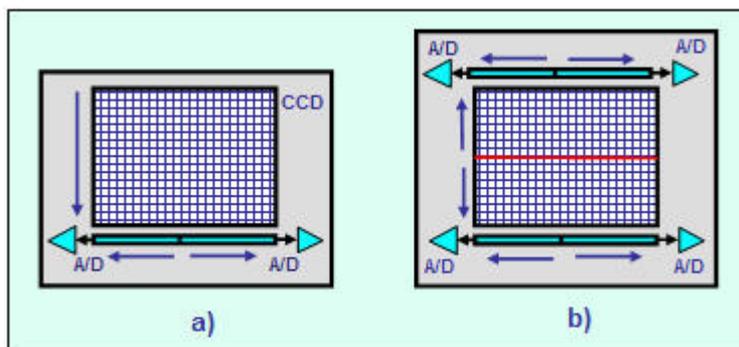


fig. 8

Sempre per diminuire il tempo di svuotamento sono allo studio anche sensori matriciali nei quali il sensore viene idealmente diviso in due parti secondo una riga di mezzeria orizzontale; al termine del tempo di integrazione le cariche di una metà del sensore viene fatta scorrere in modo parallelo verso un registro di scorrimento che sta nella parte alta del sensore, e l'altra metà verso la parte bassa; i due registri di scorrimento sono a loro volta divisi in due e ciascuna parte fa scorrere serialmente le cariche verso un proprio convertitore A/D (v. fig. 8 b)).

Da questa descrizione, seppur schematica, approssimativa e incompleta di come sia costituito un CCD con sensore a matrice, ci possiamo però rendere conto della sua complessità e dei problemi che pone la sua realizzazione.

In pratica questi problemi di costruzione dei CCD crescono proporzionalmente alla dimensione del sensore; i problemi nascono dalla difficoltà di realizzare wafer di silicio grandi ed omogenei, dal riuscire a creare la maglia di pixel con righe e colonne di pixel correttamente allineati e ad altri motivi tecnici che riguardano il funzionamento del microchip.

Possiamo dire che CCD con sensori di 1000x1000 pixel si trovano ormai solo nelle camere digitali amatoriali più comuni; nelle camere amatoriali di maggior pregio si impiegano usualmente CCD con sensori di 2000x3000 pixel; nelle camere per riprese terrestri anche ad uso fotogrammetrico e nelle camere aeree per impieghi non fotogrammetrici, si arriva anche a

sensori di 4000x5000 pixel. La dimensione massima oggi raggiunta per un sensore matriciale è di 9000x9000 pixel.

Vedremo quindi che la difficoltà di produrre sensori matriciali di dimensioni a quelle citate porterà a soluzioni abbastanza complesse nella realizzazione delle camere digitali aeree per le riprese fotogrammetriche.

2.3 La trasformazione dell'immagine in forma numerica.

Abbiamo visto come è strutturato il sensore a matrice, come avviene la cattura della luce e la trasformazione dell'energia luminosa in una matrice di numeri.

Vediamo allora come avviene, tramite un CCD, la trasformazione dell'immagine *ottica* della scena ripresa in immagine *digitale* e come in questo passaggio l'immagine subisca un effetto di *discretizzazione*.

Consideriamo di riprendere l'immagine di un cerchio nero su uno sfondo bianco (v. fig. 9).

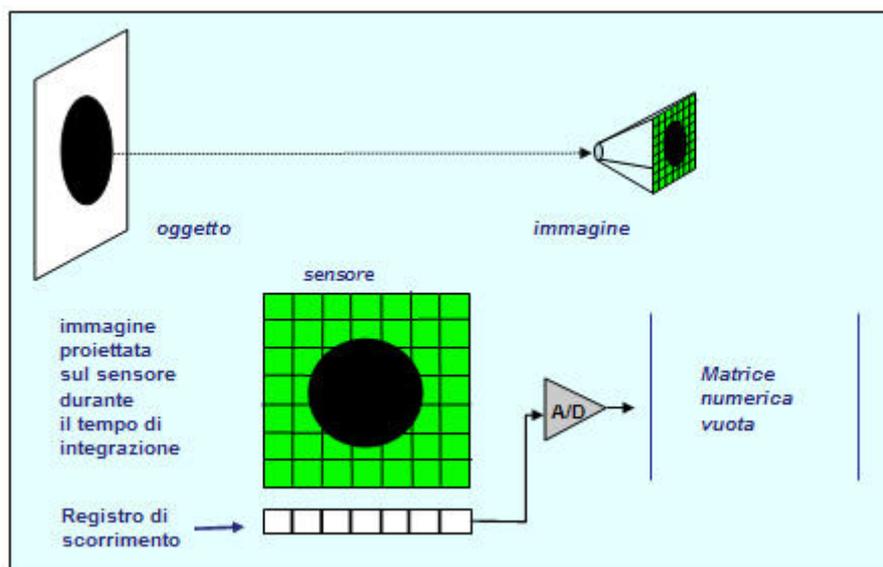


fig. 9

Consideriamo la sua immagine proiettata sul grigliato di pixel del sensore, e supponiamo per semplicità che i fotodiodi del sensore non siano coperti da filtri per la separazione del colore; immaginiamo inoltre che, come abbiamo fatto precedentemente per semplicità di disegno, il sensore sia composto da pochi pixel allo scopo di poter rendere comprensibile il discorso che stiamo facendo. Sempre per semplicità del discorso consideriamo che la dimensione del fotodiodo coincida con quella del pixel.

Nella figura si vede come l'immagine dell'oggetto ripreso, il cerchio nero, cada sul sensore coprendo in tutto o in parte alcuni dei suoi pixel.

Per semplificare l'esempio, supporremo che l'intervallo di discretizzazione dei valori di intensità delle cariche accumulate nei fotodiodi venga tradotta dal convertitore A/D con numero variabili da zero a 9, anziché, come avviene realmente nelle camere digitali e come abbiamo precedentemente detto, da 0 a 255 o da 0 a 4095.

Relativamente alla superficie di ogni pixel si potranno avere tre casi:

- tutta la superficie del pixel viene colpita dall'immagine della parte bianca del muro: in tal caso molti fotoni cadranno sul fotodiodo del pixel, si crea un consistente carica di elettroni e alla fine l'informazione che il CCD acquisisce, relativamente a questi pixel è: *ho ricevuto molta energia luminosa* e converte e memorizza questa informazione nel numero più alto, e cioè 9

- tutta la superficie del pixel viene colpita dall'immagine della parte nera del muro: in tal caso non cadono fotoni sul fotodiode del pixel, non si genera alcuna carica e l'informazione che il CCD acquisisce è: *non ho ricevuto energia luminosa* e converte e memorizza questa informazione nel numero più basso, e cioè 0
- la superficie del pixel viene colpita in parte dall'immagine bianca e in parte dall'immagine nera del muro: in questo caso una certa quantità di fotoni cadono sul fotodiode, si genera una carica di una certa entità e l'informazione che il CCD acquisisce è: *ho ricevuto una certa quantità di energia luminosa* e traduce questa informazione in un numero intermedio tra 0 e 9. Deve essere chiaro che, nel caso in cui su un pixel cada l'immagine di una parte del muro che è in parte bianca e in parte nera, è ininfluente *come* l'immagine in parte bianca e in parte nera si distribuisca su un pixel: quello che conta *agli effetti della produzione della carica* è la quantità di energia che colpisce il fotodiode.

La fig. 10 si riferisce all'istante in cui termina il tempo di integrazione: l'intensità di carica accumulata da ciascun pixel è rappresentata con un retino che è tanto più fitto quanto maggiore è la carica accumulata; il registro di scorrimento è ancora vuoto e nessun numero è stato trasferito alla matrice che conterrà l'immagine tradotta in forma numerica. Il cerchio tratteggiato rosso serve solo come riferimento per comprendere la distribuzione delle cariche, ma ovviamente non esiste sul sensore.

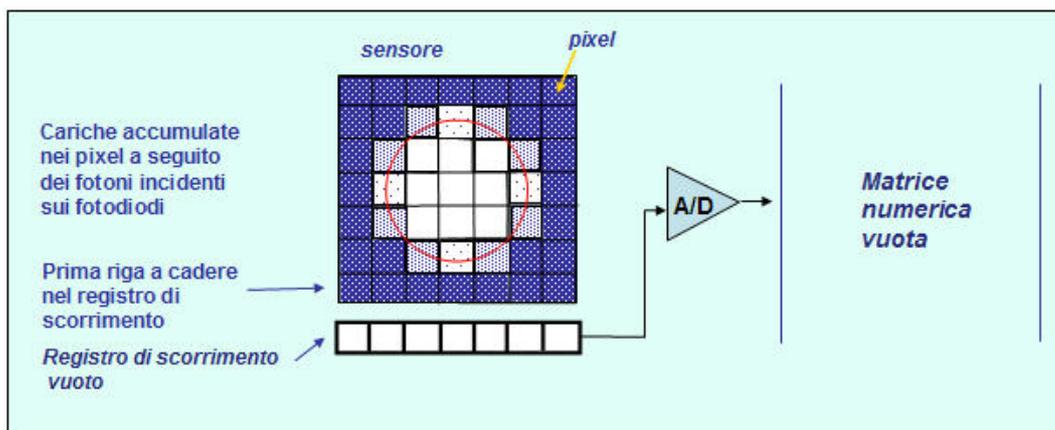


fig. 10

Al termine del tempo di integrazione, cioè dell'esposizione dei fotodiodi alla luce, inizia la fase di svuotamento del sensore e della traduzione in numero dell'intensità di carica accumulata da ciascun pixel.

Le cariche dell'ultima riga del sensore vengono trasferite al registro di scorrimento e di qui, con scorrimento seriale vengono convertite dal dispositivo A/D in numeri, che andranno a formare l'ultima riga della matrice nella quale sarà tradotta numericamente tutta l'immagine.

Nella fig. 11 è illustrato il secondo passo del procedimento, quando l'ultima riga è già stata decodificata e nella matrice si trova già la prima riga di numeri che, poiché tutti i pixel dell'ultima riga contenevano il massimo delle cariche, sono tutti 9 (secondo la convenzione fatta per questo esempio). Le cariche della penultima riga sono state trasferite nel registro seriale; tutte le cariche sono scivolte verso il basso di due righe. Le cariche della penultima riga che si trovano nel registro seriale daranno luogo alla serie di numeri che è riportata sotto di essi.

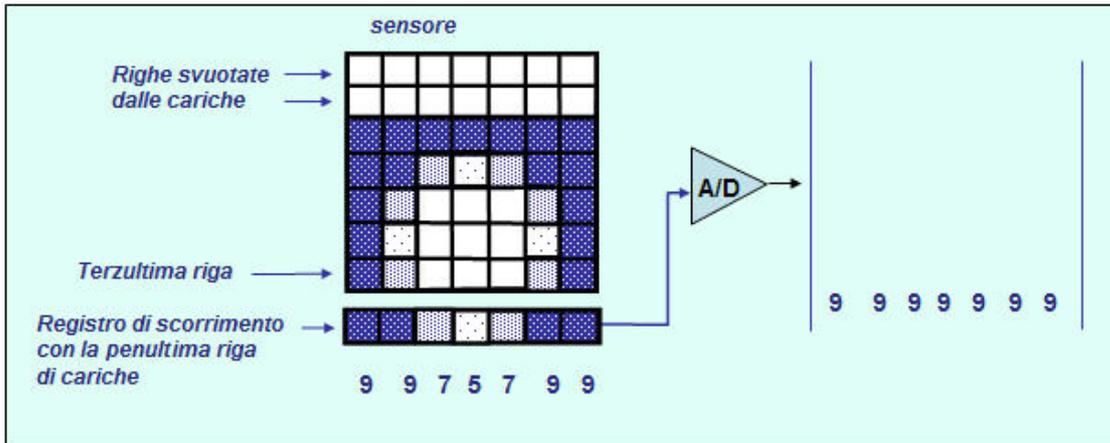


fig. 11

Al termine del trasferimento di tutte le righe di pixel del sensore nel registro seriale verrà prodotta la matrice numerica che traduce la situazione originaria delle cariche nel sensore dopo il tempo di integrazione; nella fig. 12 si riporta tale situazione con a fianco la matrice numerica che ne è derivata dopo il processo di svuotamento di tutto il sensore.

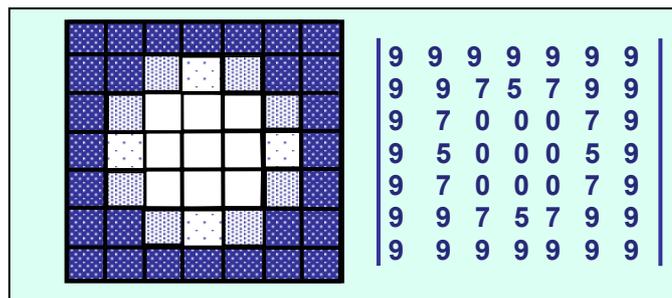


fig. 12

Quando poi si passa dalla matrice numerica prodotta dalla camera digitale a una sua visualizzazione (sullo schermo di un computer, su carta mediante una stampante, ecc.) si ottiene un'immagine che è costituita da quadretti di toni di grigio; nell'ipotesi di riprodurre la matrice di numeri con un dispositivo che fa corrispondere a ad ogni numero un quadretto, la matrice che abbiamo ottenuto produrrebbe il risultato della fig. 13 a).

Se il lato del sensore fosse stato più piccolo, avremmo ottenuto una matrice che, riprodotta con un dispositivo che fa corrispondere a ad ogni numero un quadretto, avrebbe dato luogo al risultato riprodotto dalla fig. 13 b).

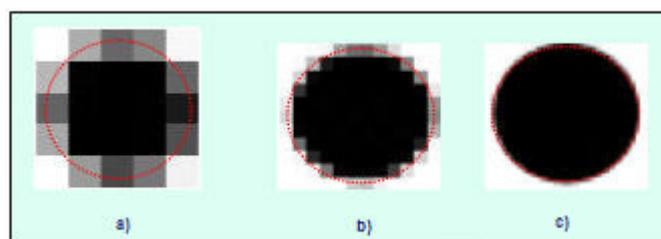


fig. 13

Diminuendo ancora il lato del pixel e rimanendo immutate tutte le altre condizioni, si sarebbe infine ottenuto il risultato riprodotto nella fig. 13 c). Vediamo che nel passare da a) a b) e a c) le dimensioni del pixel sono sempre più piccole rispetto a quelle dell'oggetto ripreso, e di conseguenza la forma dell'oggetto che l'immagine riproduce è via via più simile alla forma reale dell'oggetto ripreso; traduciamo questo fatto dicendo che l'immagine c) ha una *maggior risoluzione* dell'immagine b), così come l'immagine b) ha maggior risoluzione dell'immagine a). Quindi, *rimanendo invariati la distanza dell'oggetto dall'obbiettivo e la focale dell'obbiettivo*, 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 obbiettivo/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'obbiettivo e della distanza dell'oggetto dall'obbiettivo.

2.4 Il ground sampling distance (GSD).

Il modo più corretto per valutare la risoluzione di un'immagine digitale è quello di prendere in considerazione l'area di *superficie reale* la cui immagine, proiettata sul piano focale e quindi sul sensore, copre la superficie di un pixel; tale area viene detta, con terminologia anglosassone, *ground sampling distance (GSD)*. Potremmo rendere l'espressione in italiano con la dizione *dimensione del pixel al suolo*, riferendoci implicitamente a una ripresa aerea.

Il fatto che la risoluzione di un'immagine sia legata alla dimensione 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:

$$GSD = D \cdot (L / f)$$

dalla quale che il GSD risulta funzione dei tre parametri **L**, **f** e **D**.

Quindi se vogliamo confrontare due camere digitali al riguardo della *risoluzione* delle immagini che esse possono produrre, dobbiamo valutare che GSD producono a parità di distanza di presa. E dobbiamo anche aver 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'obbiettivo; 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 μm di lato e con focale di 100 mm, a parità di distanza di presa dall'oggetto, produce immagini con risoluzione superiore a una camera con pixel di 8 μm di lato ma con focale di 60 mm.

Confrontando le tre figure 13a, 13b e 13c e sapendo che sono prodotte a partire da immagini digitali di uno stesso oggetto, possiamo senz'altro dire che la figura 1c deriva da un'immagine che ha maggior risoluzione di quella da cui sono derivate le figure 1a e 1b; ma, se le figure derivano da immagini prese con tre camere digitali diverse e non conosciamo la distanza alla quale le tre camere hanno ripreso l'oggetto, non possiamo dire quale sia la camera con risoluzione maggiore.

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; come abbiamo precedentemente detto per ottimizzare le prestazioni di una

camera digitale occorre conciliare due aspetti e cioè la risoluzione geometrica e il range dinamico.

2.5 I sensori lineari.

I sensori lineari sono costituiti da un'unica riga di pixel; durante il tempo di integrazione il sensore acquisisce la carica e, al termine del tempo di integrazione, funziona da registro di scorrimento per far pervenire le cariche al convertitore A/D.

Lo schema di un sensore lineare, almeno concettualmente, è quindi molto semplice ed è quello riportato nella fig. 14 a); nella stessa figura in b) è riportata l'immagine di un sensore reale.

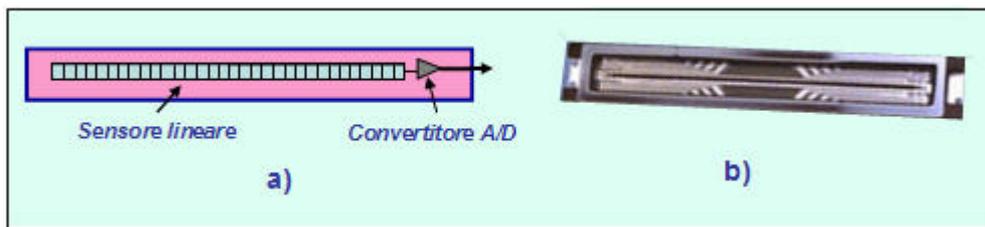


fig. 14

Per acquisire un'immagine con un sensore lineare si possono seguire due strade.

La prima, che viene applicata nelle camere da presa terrestri (v. fig. 15), consiste nel far traslare il sensore nel piano focale in modo da costruire l'immagine mediante l'acquisizione di tante striscioline dell'immagine stessa.

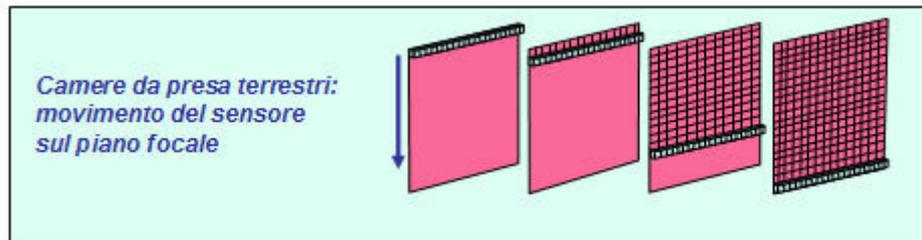


fig. 15

Naturalmente il soggetto deve essere fermo per tutta la durata del tempo di traslazione del sensore nel piano focale.

Ad ogni posizione del sensore lineare, cioè per ogni strisciolina di immagine catturata sul piano focale, le cariche acquisite vengono fatte scorrere lungo il sensore e trasformate in numeri dal convertitore A/D.

Naturalmente se si vuole ottenere un'immagine a colori o all'infrarosso falso colore impiegando un sensore lineare costituito da un'unica riga di pixel pancromatici, occorre ripetere la passata del sensore sul piano focale per tre volte, antepoendo all'obbiettivo ogni volta il filtro opportuno.

La soluzione per evitare la tripla passata è costituita dall'impiego dei sensori tri-lineari. Essi sono formati dall'unione di tre sensori lineari; sui fotodiodi di ciascuna riga di sensori è applicato un filtro diverso; per una ripresa a colori i tre filtri saranno i classici RGB.

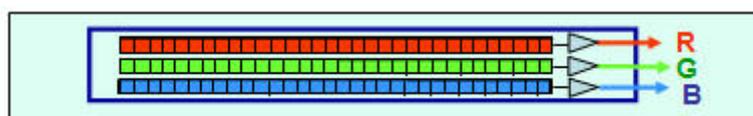


fig. 16

Nelle camere da presa terrestri i filtri lineari e trilineari sono impiegati nei dorsi digitali; i dorsi digitali che utilizzano questi tipi di filtri hanno, come già detto, la limitazione di poter essere usati solo con soggetti fermi, ma consentono risoluzioni molto più elevate delle camere o dorsi digitali basati sui sensori a matrice. Infatti ciò che limita la dimensione dei sensori a matrice è il fatto di essere costituiti da un sensore bidimensionale; quindi per aumentare le dimensioni del sensore bisogna estendere il numero dei pixel sia lungo le righe che lungo le colonne e, per il momento, ci sono delle notevoli difficoltà costruttive a portare le dimensioni oltre il limite dei 5000x7000 pixel. E' invece più semplice costruire dei sensori lineari costituiti da una sola riga di pixel; e infatti sensori lineari di 5000 o 8000 pixel sono abbastanza comuni; sono da tempo disponibili sensori lineari e trilineari di 12.000 pixel e più recentemente anche di 14.400 pixel. Ritornando alle camere per riprese terrestri o a dorsi digitali per esse, si vede che utilizzando un sensore lineare di 8000 pixel e facendolo traslare sul piano focale, si possono ottenere risoluzioni superiori a quelle conseguibili con sensori a matrice.

Quando il sensore lineare viene utilizzato da piattaforma satellitare o aerea (v. fig. 17), l'immagine viene formata dalla combinazione del moto del mezzo e dall'acquisizione dell'immagine registrata dal sensore lineare effettuata con una cadenza che è condizionata da tre fattori: la dimensione del pixel del sensore, la focale dell'obiettivo, la quota di volo e la velocità del mezzo.

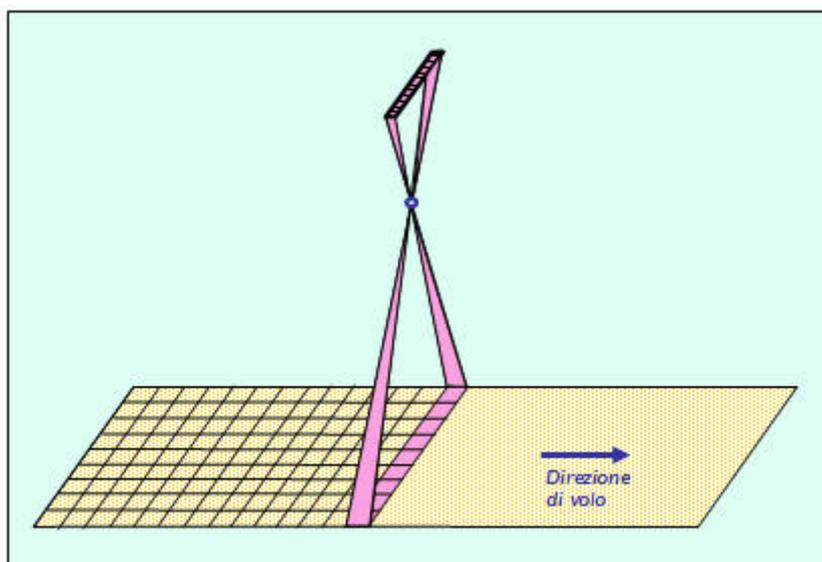


fig. 17

Gli apparati di presa che si basano su questo principio vengono detti *pushbroom line scanner*. Poiché la ripresa viene effettuata con continuità, striscia dopo striscia, il sensore lineare deve venir svuotato dalle cariche accumulate durante il tempo di integrazione, nell'intervallo di tempo che occorre all'aereo per percorrere una distanza che è data dalla proiezione del pixel al suolo divisa per la velocità V dell'aereo; a sua volta la proiezione del pixel al suolo è data dalla sua dimensione reale L moltiplicata per il rapporto tra l'altezza di volo H e la distanza focale f della camera da presa; quindi il tempo ΔT di svuotamento del sensore lineare deve essere inferiore a:

$$\Delta T < (L \cdot H/f) / V$$

Ad esempio: se la ripresa viene fatta con un sensore lineare i cui pixel hanno la dimensione di $8\mu\text{m}$, attraverso un obiettivo di 80 mm di focale, da un'altezza di volo di 1000 m, ogni striscia del terreno ripresa avrà, nel senso del volo, una dimensione δS che vale:

$$\delta S = (1000 / .08) \times 0.000008 \text{ m} = 0.10 \text{ m}$$

Se immaginiamo che la velocità dell'aereo sia di 300 km/h, pari quindi a 83 m/s, si vede che l'aereo percorre lo spazio δS in un tempo

$$\Delta T = 0.10 \text{ m} / 83 \text{ m/s} = 0.0012 \text{ s}$$

Questo significa che lo svuotamento del sensore lineare deve avvenire in meno di un millesimo di secondo. Se teniamo conto che i sensori lineari delle camere aeree arrivano anche a dimensioni di 14.400, si comprende il tempo di svuotamento del sensore possa costituire un punto delicato per le camere da ripresa aeree che impiegano sensori lineari. Vedremo ad esempio al punto 6.6 che la camera Starimager TLS, che adotta questo tipo di sensori, ha una frequenza di ripresa di 500 linee/sec e quindi viene impiegata solo su elicottero.

Per superare questo aspetto critico alcuni tipi di sensori trilineari che vengono impiegati nelle camere aeree sono dotati di particolari dispositivi. Un modo per velocizzare lo svuotamento dei sensori è quello di non far funzionare i tre sensori lineari che acquisiscono l'immagine come registri di scorrimento successivamente al tempo di integrazione, ma di trasferire, per ogni sensore, le cariche su due registri di scorrimento; le cariche dei pixel pari vengono trasferite in un registro di scorrimento e quelle dei pixel dispari in un altro registro di scorrimento; in tal modo il tempo di svuotamento del sensore si dimezza (v. fig. 18). Lo stesso vale ovviamente anche per i sensori lineari singoli, pancromatici o all'infrarosso.



fig. 18

Analogamente a quanto abbiamo visto per i sensori a matrice, alcuni sensori lineari sono dotati di sistemi di svuotamento ancora più sofisticati, e cioè non solo le cariche di ciascun sensore sono smistate su due registri, ma ogni registro si svuota per metà verso sinistra e per metà verso destra mediante un altro convertitore A/D; in tal modo il tempo di svuotamento di ogni sensore lineare si riduce ad un quarto rispetto a quello che si avrebbe se il sensore venisse utilizzato sia per l'accumulo delle cariche sia per la loro conversione in forma digitale (v. fig. 18bis).

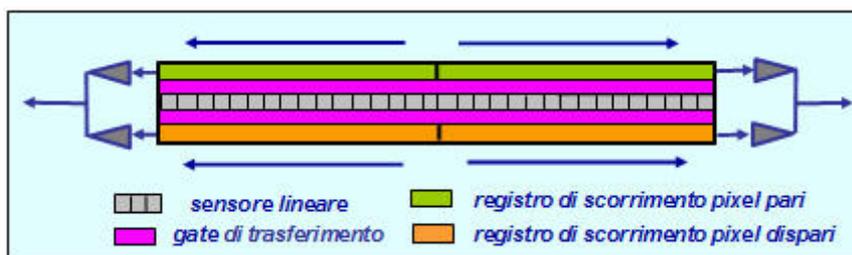


fig. 18bis

Nella fig. 18bis sono stati evidenziati anche i due gate di trasferimento che consentono il passaggio dal sensore ai due registri di scorrimento e che sono invece stati omessi per semplicità di disegno nella fig 18 precedente.

Ora che abbiamo richiamato alcuni concetti di base sui sensori a matrice e lineare vediamo come essi vengono impiegati nei vari tipi di camere da presa.

3. Un termine di confronto per valutare la geometria di presa delle camere digitali.

Tra le camere da presa che esaminiamo nel seguito alcune sono dedicate sia ad uso terrestre che aereo, altre ad uso esclusivamente aereo e segnatamente per impieghi fotogrammetrici. Le prime, quando usate per riprese aeree, non si propongono come vere camere fotogrammetriche aeree, ma piuttosto come camere per telerilevamento, per ricognizione o come camere che hanno il compito di fornire immagini di supporto alle riprese effettuate con il laser a scansione; come camere per rilievi fotogrammetrici vengono tutto al più proposte per rilievi di strutture ad andamento lineare, come: strade, canali, linee elettriche, ecc. e comunque per rilievi che si potrebbero definire, con terminologia corrente, speditivi.

Sia che si tratti di camere del primo tipo sia che si tratti di camere aerofotogrammetriche è interessante confrontare la geometria della presa delle camere che vedremo; è opportuno quindi premettere alcune considerazioni e dare un criterio di massima per poterne effettuare una valutazione comparativa con le camere fotogrammetriche tradizionali a pellicola.

Abbiamo visto che la maniera più corretta di valutare comparativamente la risoluzione di due immagini digitali è quella di valutare il GSD. Ma questo vale per confrontare due immagini, indipendentemente da come esse vengano acquisite (camera usata, distanza camera-oggetto, ecc.).

Se vogliamo invece paragonare tra loro due (o più) camere digitali dal punto di vista prestazionale in termini di risoluzione dobbiamo specificare quali sono i valori che caratterizzano la geometria della presa che hanno determinato quel dato GSD. Abbiamo visto infatti che il GSD è funzione non solo della dimensione del pixel del sensore, ma anche della focale dell'obbiettivo e della distanza dell'oggetto ripreso dall'obbiettivo.

Ad esempio: consideriamo due camere digitali A e B per riprese aeree con obbiettivo di focale uguale, con uguale dimensione fisica del sensore, ma con dimensione del pixel diversa, ad esempio una camera A con pixel di $9 \mu\text{m}$ e una camera B con pixel di $12 \mu\text{m}$. Non possiamo dire a priori che la camera A sia quella che dà immagini con maggior risoluzione. Infatti se voliamo con le due camere alla stessa altezza di volo H avremo in effetti per la prima un GSD inferiore:

$$(GSD_A = H/f \cdot 9 \mu\text{m}) < (GSD_B = H/f \cdot 12 \mu\text{m})$$

in quanto il rapporto H/f è uguale per le due camere.

Però se con la camera B effettuiamo una ripresa ad un'altezza H_B minore di H_A , (ad es. $H_B = H_A/2$) otteniamo con la camera B un GSD minore di quello che otteniamo con la camera A.

Però, dato che abbiamo supposto per le due camere una focale uguale e uguali dimensioni fisiche del sensore, volando a quota minore, con la camera B avremo un campo abbracciato minore di quello che abbiamo con la camera A; questo fatto, nel caso di riprese fotogrammetriche, comporterebbe lo svantaggio di dover effettuare un maggior numero di strisciate per riprendere lo stesso territorio.

Diventa quindi difficile, se consideriamo il campo delle fotogrammetria aerea, confrontare tra di loro due camere digitali in termini prestazionale, pur volendosi accontentare di un confronto limitato alla geometria della presa.

D'altra parte non è tra gli scopi di questa rassegna fare confronti prestazionali tra le varie camere digitali per la fotogrammetria aerea, anche perché è mancata finora la possibilità di fare sperimentazione concreta su molte delle camere che vengono prodotte, ma che non sono ancora in circolazione in Europa.

Tuttavia, al solo scopo di poter effettuare una prima valutazione delle camere digitali, siano esse vere camere aerofotogrammetriche che camere per uso promiscuo terrestre ed aereo, dal solo punto di vista della geometria della presa, riteniamo che sia più conveniente confrontare le varie camere da presa che prenderemo in considerazione non tra di loro, ma con un termine di paragone per così dire *esterno*, confrontandone cioè le caratteristiche geometriche di presa con quelle di una camera tradizionale a pellicola di formato 23cm x 23cm e di focale 150 mm. Per il confronto del GSD supporremo che i fotogrammi siano trasformati da pellicola in forma digitale con pixel di 14 μm ; è opinione generalmente condivisa infatti che risoluzioni più spinte non portino alcun vantaggio reale.

I parametri che prenderemo in considerazione saranno quattro:

- il campo abbracciato nel senso trasversale alla direzione di volo (ACT = angolo di campo trasversale), che determina la larghezza della strisciata;
- il campo abbracciato nel senso del volo (ACL = angolo di campo longitudinale), che determina la base di presa; nella camera tradizionale a pellicola esso è uguale al precedente, ma vedremo che così non è obbligatoriamente nelle camere digitali; la base di presa, in rapporti all'altezza di volo, è importante perché incide sulla precisione della restituzione fotogrammetrica; per il calcolo della base di presa **b** ipotizzeremo un valore di ricoprimento longitudinale del 60%;
- il valore massimo dell'angolo di osservazione stereoscopica di un punto α_{max} (AMS = angolo di massima stereoscopia), che si ha per il punto che sta sulla verticale della mezzieria della base di presa;
- il GSD, che consente di confrontare in termini oggettivi la risoluzione geometrica delle immagini.

Effettueremo il confronto tra questi valori relativi a una camera tradizionale a pellicola e le varie camere che prenderemo in considerazione, assumendo un'altezza di volo $H = 2000 \text{ m}$.

Nella fig. 19 sono evidenziati i valori di questi parametri di confronto.

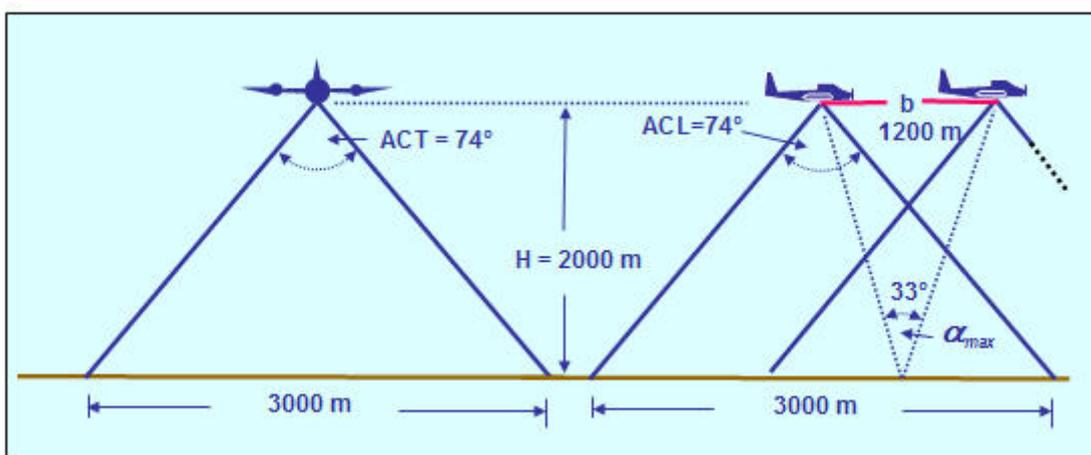


fig. 19

Il valore del GSD risulta:

$$GSD = (H/f) \cdot 14 \mu\text{m} = 0,186 \text{ m} = \sim 19 \text{ cm}$$

mentre l'AMS risulta:

$$\alpha_{max} = 2 \cdot \arctan ((1200/2) / 2000) = 33^\circ$$

4. Le frame camera.

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 funzionale 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.

4.1 Frame camera mono-CCD a camera singola.

Le frame camera *mono-CCD* sono indifferentemente usate per riprese terrestri ed aeree; fa eccezione a questa regola la camera della BAE System di cui diremo in seguito.

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 1000x1000 pixel fino a un massimo di 4000x5000 pixel.

In genere le camere dotate di sensori fino a 2000x3000 pixel vengono dette di piccolo formato; mentre quelle che sono dotate di sensori fino a 4000x5000 pixel vengono dette di medio formato. Che una camera digitale *mono-CCD*, specie se con sensori di dimensioni di 1000x1000 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.

In letteratura si possono riscontrare numerosissimi impieghi di frame camera *mono-CCD* con sensori da 1000x1000 pixel o da 1000x1500 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 strumentazione 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 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 di mezzo aereo su cui essa è montata.

Una delle camere digitali che è stata più utilizzata per questo tipo di riprese aeree è la Kodak DCS460 che a partire dall'inizio degli anni '90 è stata prodotta in una serie di esemplari con dimensioni del sensore via via maggiori; nei primi modelli il sensore aveva dimensione di 1000x1500 pixel e la dimensione del pixel era di 9 μm ; il modello più recente ha una dimensione del sensore di 3000x4500 pixel con una dimensione del pixel di 8 μm .

Nella fig. 20 vediamo la Kodak-460 CIR (*color infrared*); a sinistra vediamo come appare la camera nella sua configurazione per usi terrestri; in questo caso il corpo della camera è Nikon con obiettivo di 35 mm di focale; il sensore matriciale, costituito da 2036x3060 pixel di dimensione di 9 μm , ha una dimensione di 18.4x27.6 mm; il sensore è sensibile anche all'infrarosso vicino e quindi la camera è idonea sia alle riprese a colori che in falso colore. A destra vediamo la camera in assetto di ripresa aerea, montata in posizione nadirale su un dispositivo dotato di sistema antivibrazioni,



fig. 20

A fine di poter effettuare riprese a colori tutte le Kodak della serie DCS, come in genere tutte le frame camera *mono-CCD*, utilizzano sensori con pixel schermati da filtri secondo lo schema di Bayer.

Oltre alle frame camere che impiegano sensori di piccolo formato, vi sono camere, di recente introduzione sul mercato, prodotte per uso terrestre che hanno però utilizzi anche in campo fotogrammetrico, in particolare per la produzione di ortofoto, ma soprattutto in uso congiunto con riprese effettuate con laser a scansione da aereo (*LIDAR, Light Detection And Ranging*).

Tra queste ne ricordiamo alcune per le elevate caratteristiche e prestazioni.

Una è la Kodak DCS pro14n che continua la tradizione delle serie DCS; ha un sensore di 4536x3024 pixel di 8 μm di lato e quindi la dimensione del sensore è esattamente quella del classico formato pellicola 24x36 mm. Il sensore è a tecnologia CMOS anziché CCD (v. fig. 21 a)).

L'altra è la Rollei AIC 6008 integral della Rollei con sensore da 5400x4000 pixel (v. fig. 21 b)) e con obiettivi di focale di 50 mm e 120 mm.

Su quest'ultima si basa ad esempio la DigiCAM R22 della IGI, camera dotata di sistema GPS/IMU e di piattaforma stabilizzatrice e destinata specificatamente all'uso congiunto col lidar. Quando usate per riprese aeree queste camere sono montate su piattaforme stabilizzatrici e sono dotate di sistema GPS/IMU.



fig. 21

Per le camere ad esclusivo uso delle riprese terrestri notevole sviluppo si è avuto nel settore dei dorsi digitali; tra i tanti ricordiamo il dorso Leaf Valeo 22 da 4056x5356 pixel (22 Mpixel) visibile nella fig. 21bis nella posizione a), dove è montato su un corpo Mamiya 654. Nella stessa figura in b) è presentato il recentissimo dorso digitale Fuji DX-2000 che è dotato di un sensore di dimensioni eccezionali: 5408x7648 pixel (42 Mpixel).



fig. 21 bis

Molti sono anche i dorsi digitali basati sull'uso di sensori lineari, che, pur consentendo altissime risoluzioni, sono però esclusivamente dedicati alla riprese di oggetti fermi.

L'Applanix ha recentemente messo sul mercato il DSS (Digital Sensor System), che si basa sull'uso di un sensore MegaVision di 4092x4077 pixel di 9 μm di lato, in grado di acquisire immagini a colori e all'infrarosso, montato su un corpo camera Contax 645 con obiettivo di focale di 35 mm o di 55 mm. Il sistema è dotato di sistema POS/AV per il direct georeferencing e viene proposto per usi di telerilevamento, ma anche per impieghi fotogrammetrici veri e propri nell'ambito dei GIS: DEM, ortofoto, visualizzazioni stereoscopiche in genere.

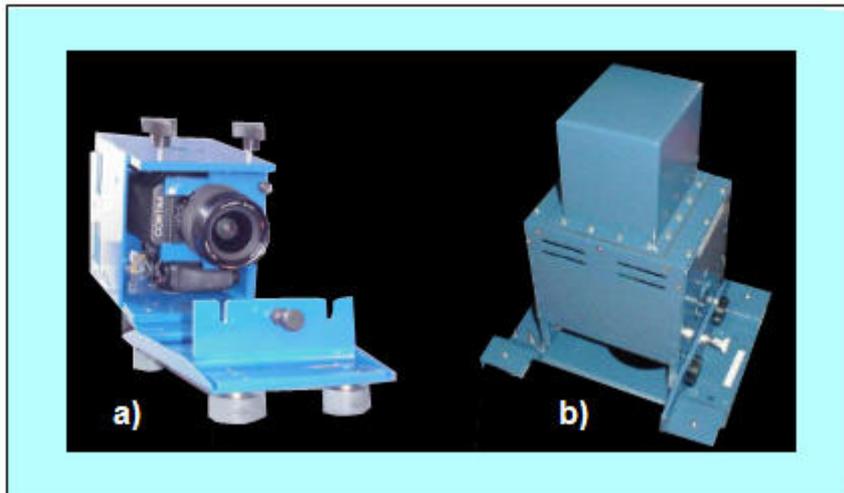


fig. 22

Nella fig. 22 a) si vede la camera aperta con asse ottico in orizzontale e in b) in posizione operativa. La parte prismatica superiore rientrante rispetto al corpo più basso alloggia il dispositivo POS/AV.

Con la focale di 55 mm il DSS, alla quota di 2000 m, abbraccia un campo di circa 1350 m e produce un'immagine con un GSD 32 cm.

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*) e quindi deve essere sempre tenuto presente nel pianificare le riprese il rapporto tra velocità dell'aereo e il tempo di esposizione per evitare l'effetto di trascinamento dell'immagine sul piano focale.

Nelle camere frame ad un solo sensore il punto più avanzato, in termini di dimensione del sensore matriciale, è costituito dalla camera della BAE System che si basa sull'uso di un CCD con un sensore di 9216x9216 pixel di dimensioni di $8,75 \times 8,75 \mu\text{m}^2$. La dimensione fisica del sensore è di $8 \times 8 \text{ cm}^2$. Allo scopo di ottenere la massima risoluzione possibile la camera fornisce immagini in b/n. Nella configurazione standard la camera che si basa su questo chip ha una focale di 75mm e quindi ha un angolo di campo di circa 56° . Ciò significa che a una quota di 2000 m il campo abbracciato è di circa 2100 m mentre il GSD vale pixel al suolo (GSD) vale circa 23 cm.

Per reggere il confronto con le prestazioni, dal punto di vista della geometria della presa, di una camera a pellicola e produrre una camera che possa essere definita fotogrammetrica nel senso usuale del termine, la BAE ha il progetto di produrre una frame camera multi-CCD assemblando quattro sensori da 9216x9216 pixel. Con una camera così fatta, a parità di quota di volo, non solo si avrebbe un GSD uguale a quello che si ottiene rasterizzando con pixel di $14 \mu\text{m}$ di lato un fotogramma su pellicola, ma si avrebbe anche una uguale superficie dell'area coperta da un singolo fotogramma.

Abbiamo detto precedentemente che l'uso del filtro di Bayer, che è presente in tutte le camere che abbiamo precedentemente menzionato, riduce la risoluzione nominale di un sensore matriciale poiché, per ogni pixel, i valori cromatici vengono ricavati per interpolazione di un certo numero di pixel del suo intorno.

Un modo di evitare questo decadimento consiste nell'effettuare tre riprese del soggetto antepoendo all'obiettivo, per ciascuna presa, separatamente i filtri RGB e IR, come illustrato nello schema a sinistra della fig. 23.

Questa operazione non pone problemi per riprese terrestri con soggetti non in movimento; è difficile da attuare nelle camere con cui si effettuano riprese aeree.



fig. 23

Un esempio di applicazione di questo metodo nelle camere per riprese aeree, illustrato nella parte destra della fig. 23, è costituito dalla camera SensyTech AMDC (Airborne Multispectral Digital Camera); in questa camera il sensore del CCD ha una dimensione di circa 2000x2000 pixel ed è in grado di acquisire un'immagine ogni 2 secondi; un filtro rotante è posto davanti all'obbiettivo e consente di catturare sul sensore in rapida successione le immagini del terreno nelle tre bande dello spettro visibile e in quello dell'IR; le quattro immagini si sovrappongono di circa il 90%;, ma poiché non sono riprese dallo stesso punto dello spazio e occorre un post-processamento dei dati per produrre l'immagine finale a colori o all'infrarosso. L'uso di questa tecnica è comunque raramente applicata nelle riprese aeree mentre è molto più comune nelle riprese terrestri di soggetti non in movimento; nella foto a lato si vede una camera terrestre tradizionale che viene trasformata in camera digitale con l'aggiunta di un dorso digitale e l'apparato con il disco ruotante munito di filtri.

Un altro modo per evitare di degradare la risoluzione dell'immagine dovuto all'uso dei filtri disposti secondo lo schema di Bayer è quello utilizzato nella camera MS4100 del Redlake di San Diego. Questa camera usa in realtà non un solo CCD, ma 3 CCD sui quali viene proiettata la luce suddivisa nei tre colori primari per mezzo di un prisma tricoico. Nella fig. 24 è rappresentata la camera MS4100 e lo schema del prisma tricoico.

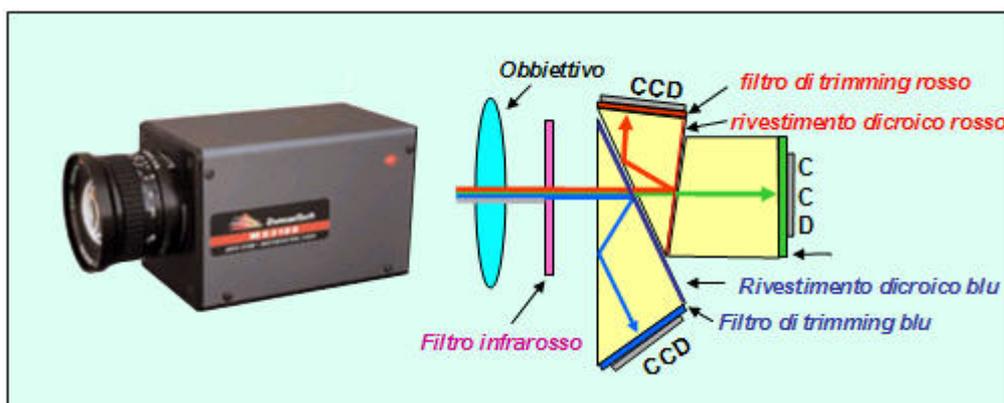


fig. 24

La camera può effettuare riprese a colori o all'IR. Nella figura è illustrato il caso delle riprese a colori. Un filtro anteposto al prisma diecrico taglia la banda dell'IR; passato il filtro, la luce entra nel primo elemento del prisma tricoico dove uno strato di rivestimento diecrico blu porta la componente blu della luce su un CCD al quale è anteposto un filtro Blu che ha lo scopo di depurare eventuali residui di luce non compresi nella banda del Blu. La restante parte della luce entra nel secondo elemento del prisma dove uno strato di rivestimento diecrico rosso devia la

componente della banda del Rosso su un CCD al quale è anteposto un filtro rosso. Infine la restante parte della luce costituita dalla banda del Verde, entra nel terzo elemento del prisma e dopo esser passata attraverso un filtro verde cade su un terzo CCD. Lo scopo dei filtri è quello di restringere ancor più la luce separata dai prismi nella loro banda di competenza.

I CCD sono dotati di un sensore matriciale di 1080x1920 pixel e il lato del pixel misura 7,4 µm; la dimensione fisica di ciascun sensore è quindi di 14.2x8 mm.

La camera consente un'elevata cadenza di ripresa che è di 10 immagini/sec.

4.2 Frame camera mono-CCD multicamera.

Abbiamo visto che l'impiego della schermatura dei pixel con filtri di diverso colore secondo lo schema di Bayer riduce in pratica la risoluzione nominale del sensore; per ovviare a questo inconveniente e cioè sfruttare la risoluzione nominale del sensore e nel contempo ottenere immagini a colori o all'infrarosso falso-colore, sono stati realizzati dei 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 1000x1500 pixel e 2000x3000 pixel, il sistema di presa viene realizzato assemblando quattro camere e mantenendo gli assi ottici degli obbiettivi tra loro paralleli.

Nella fig. 25 vediamo un'applicazione di questo criterio nella realizzazione TerraSim-1 della STI Services costituita da quattro camere assemblate in un unico contenitore; i sensori delle 4 camere possono avere dimensioni variabili da 1000x1000 pixel fino a 4000x4000 pixel.



fig. 25

Il sistema è dotato di GPS/IMU per il direct georeferencing ed è montato sul sistema di stabilizzazione *Zeiss T-AS* (a destra nella figura).

Su questo schema esistono altri tipi di realizzazione che sono molto simili tra loro e quindi non richiedono in questa sede un ulteriore approfondimento.

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 (v. fig. 26) è costituita da una camera digitale con un sensore a matrice Kodak da 5440x4080 pixel (circa 22 Mpixel); i pixel hanno il lato di 9 µm e la dimensione reale del sensore risulta perciò di 48.9x36.7 mm. I fotodiodi sono caratterizzati da un ampio range dinamico (da 8 a 16 bits) e la frequenza di presa è inferiore ai 2 secondi. Nella fig. 26, a destra è riportata la camera base e a sinistra una sua sezione schematizzata. La camera può essere dotata di obbiettivi con diverse focali (60, 80,100,120,150 mm).

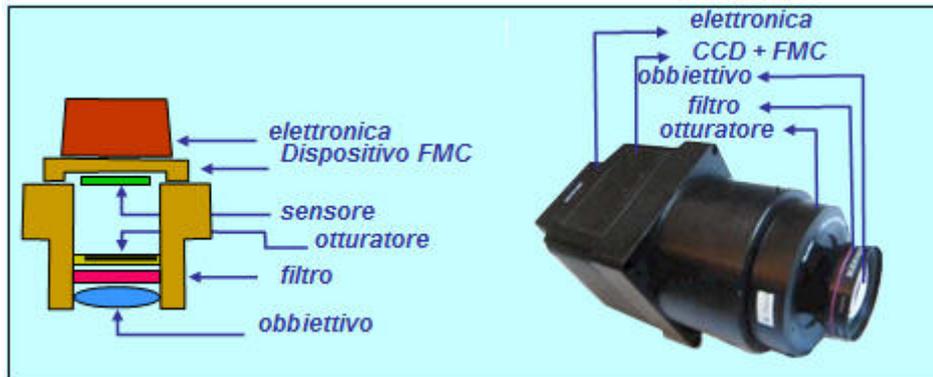


fig. 26

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, Forward Motion Compensation). Ricordiamo che nelle camere fotogrammetriche aeree a pellicola più evolute il dispositivo FMC consisteva nella possibilità di traslare il magazzino porta-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.

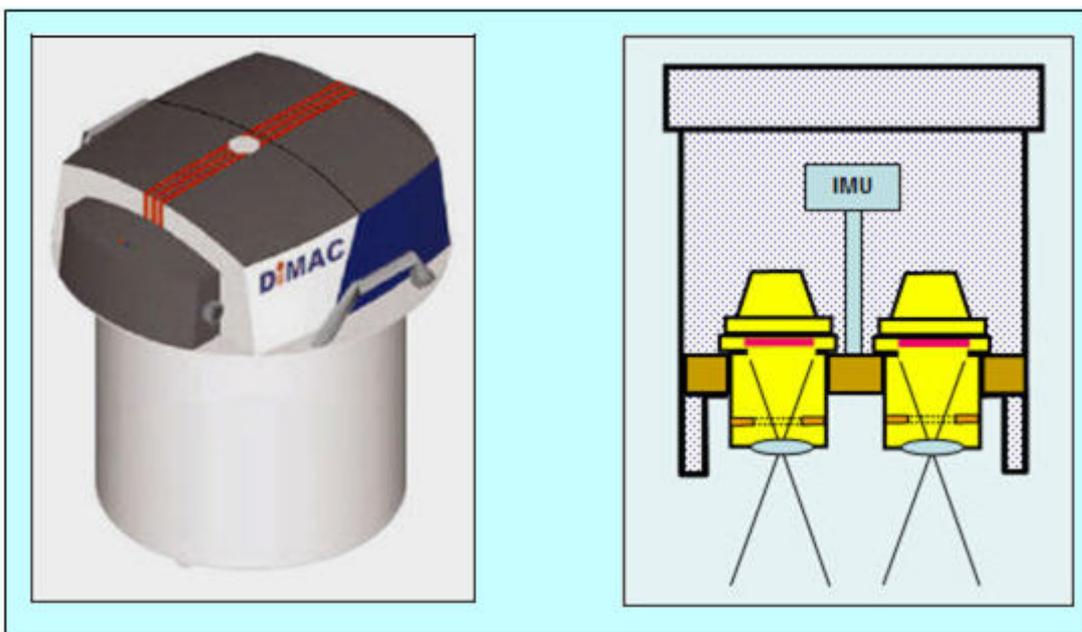


fig. 27

Nella fig. 27, 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 alloggiate in una metà del corpo cilindrico; altre due possono essere alloggiate 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 per il *direct georeferencing*.

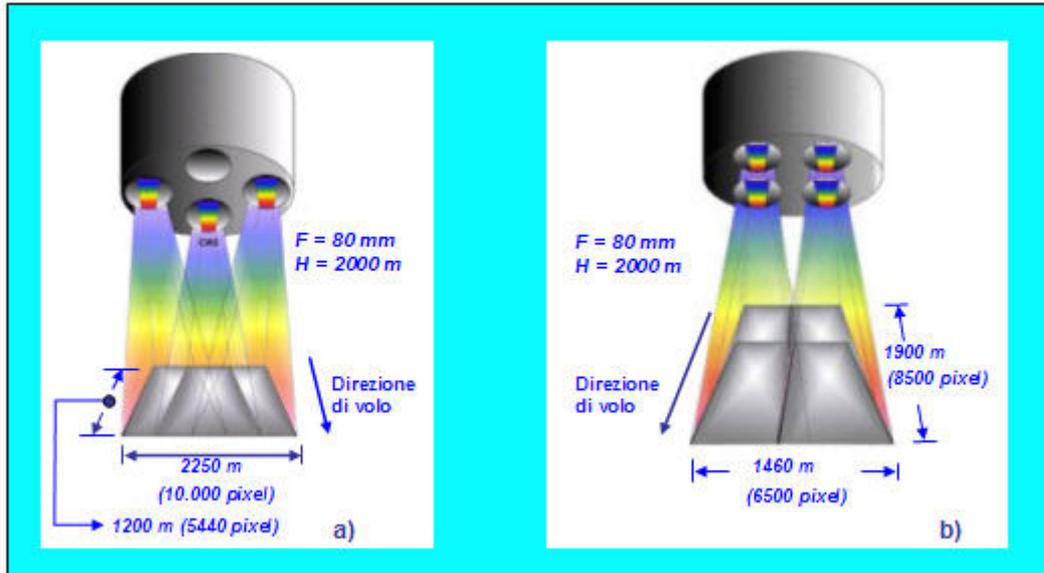


fig. 28

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.

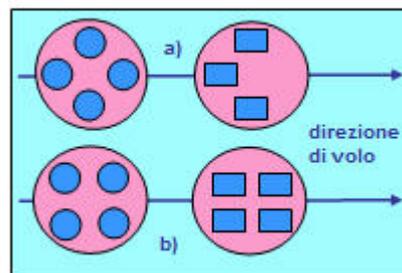


fig. 29

Nella fig. 28 a) 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 5440x10000 pixel.

Nella fig 29 a) è riprodotta la posizione della camera rispetto all'asse di volo e la posizione dei sensori che corrisponde alla situazione di presa della fig. 28 a).

Per le riprese fotogrammetriche la DiMAC suggerisce la configurazione con quattro camere e i sensori orientati nella direzione di volo (fig. 28 b) e un obiettivo con focale di 80 mm; adottando un'altitudine di volo di 2000 m l'immagine virtuale che si ricava ha una dimensione di 6500x8500 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 fig 29 b) è riprodotta la posizione della camera rispetto all'asse di volo e la posizione dei sensori che corrisponde alla situazione di presa della fig. 28 b).

5. Camere digitali aerofotogrammetriche multi-cono.

5.1 Le camere multi-cono.

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 *obbiettivo – sensore* nelle quali ciascun obbiettivo proietta l'immagine del terreno sul sensore matriciale ad esso accoppiato, ma queste coppie *obbiettivo - sensore* sono rigidamente montate in un corpo camera e non sono cioè delle camere a se stanti come abbiamo visto ad esempio nel caso della DiMAC. Esse inoltre si caratterizzano per un metodo peculiare di realizzare il FMC. Abbiamo visto 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

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

essendo V la velocità dell'aereo. La traslazione massima che il dispositivo può subire è di 640 μm .

Nelle due camere che stiamo per vedere non viene usata una traslazione fisica dei sensori, ma un particolare artificio elettronico detto *Time Delay and Integration (TDI)*.

5.2 Time Delay and Integration (TDI).

Il dispositivo FMC realizzato col metodo TDI consiste nel far scorrere le cariche da una riga del sensore matriciale alla successiva per la durata del tempo di integrazione richiesto dal sensore, con una velocità di scorrimento che è funzione dei seguenti fattori:

- δT = tempo di integrazione
- L = lato del pixel del sensore
- V = velocità dell'aereo
- H = altezza di volo

Affinché l'immagine venga correttamente acquisita occorre che la traslazione δS dell'immagine del terreno sul piano focale che avviene nel tempo di integrazione δT sia inferiore alle dimensioni L del lato del pixel; se invece la traslazione dell'immagine è superiore, la zona di terreno che dovrebbe essere ripresa da un solo pixel viene raccolta da più pixel, dando luogo a quello che potremmo assimilare all'effetto di trascinamento nelle camere a pellicola.

Quando non si verifica la condizione $\delta S < L$, col metodo TDI, per tutti i pixel del sensore, la carica non si forma totalmente in uno stesso fotodiodo, ma viene generata per incrementi successivi in un certo numero di fotodiodi allineati lungo la colonna a cui il pixel appartiene. Ciò si ottiene facendo scorrere, durante il tempo δT , la matrice delle cariche del sensore per n righe verso il registro di scorrimento.

E cioè: nel tempo di integrazione δT l'immagine sul piano focale si sposta di una quantità δS che vale:

$$\delta S = V \cdot (f/H) \cdot \delta T$$

Se δS è maggiore del lato del pixel L , la carica che ogni pixel acquisirebbe se il sensore venisse esposto per il tempo di integrazione δT stando fermo nello spazio, si formerà invece per un accumulo di incrementi di carica, facendo scorrere le cariche verticalmente di riga in riga verso il registro seriale per un numero n di righe che vale:

$$n = \delta S / L$$

In altre parole. Durante il tempo di integrazione le cariche di ogni riga del sensore passeranno per n volte da una riga alla successiva e, ad ogni passaggio, la carica di ogni fotodiode i della riga si incrementa di una quantità che è C_i/n essendo C_i la carica che il fotodiode acquisirebbe se l'esposizione del sensore venisse effettuata da fermo. Al termine della traslazione attraverso le n righe ogni fotodiode avrà acquisito la sua carica C_i come somma degli n incrementi C_i/n .

Al termine del tempo δT il sensore viene oscurato dall'otturatore e avviene il consueto svuotamento, facendo scorrere le cariche accumulate riga per riga nel registro seriale che traduce le cariche in forma digitale.

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, detto *maximum FMC capability*.

5.3 La camera Z/I Imaging DMC.

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 fig. 30) aventi focale di 120 mm; ciascuno di questi obiettivi proietta l'immagine del terreno su un proprio CCD Philips avente un sensore di 4096x7168 pixel con lato del pixel di 12 μm .

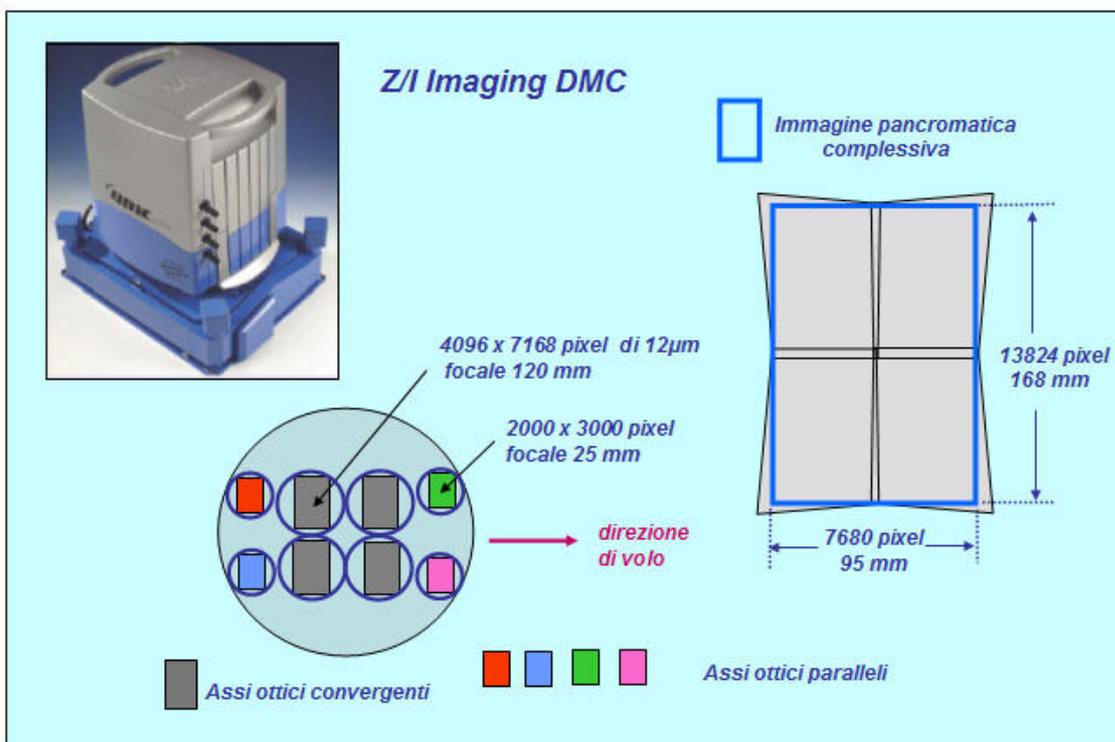


fig. 30

Questi quattro coni sono montati nella camera in modo che gli assi ottici degli obiettivi siano leggermente convergenti in modo 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 13824x7680 pixel. Questa immagine è quella destinata ad essere impiegata per scopi fotogrammetrici. L'acquisizione dei toni di grigio avviene con una profondità di 12 bit. In posizione esterna a questo corpo centrale di quattro coni (vedi fig. 30) 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 2000x3000 pixel; questi quattro coni forniscono l'immagine multispettrali 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 è il nostro termine di paragone assunto, la proiezione al suolo del sensore di una delle camere multispettrali vale 1920x2880 m², mentre quella equivalente all'insieme dei quattro sensori pancromatici vale 1550x2800 m².

Come si vede nella fig. 30 la camera viene montata sulla piattaforma giroscopica stabilizzatrice Zeiss T-AS.

Nella fig. 31 vengono confrontate le caratteristiche geometriche di presa della DMC con quella di una camera tradizionale; come si vede il campo abbracciato trasversalmente alla direzione di volo è quasi uguale, mentre nella direzione di volo è sensibilmente minore, con una conseguente riduzione della base di presa e quindi dell'angolo di osservazione stereoscopica.

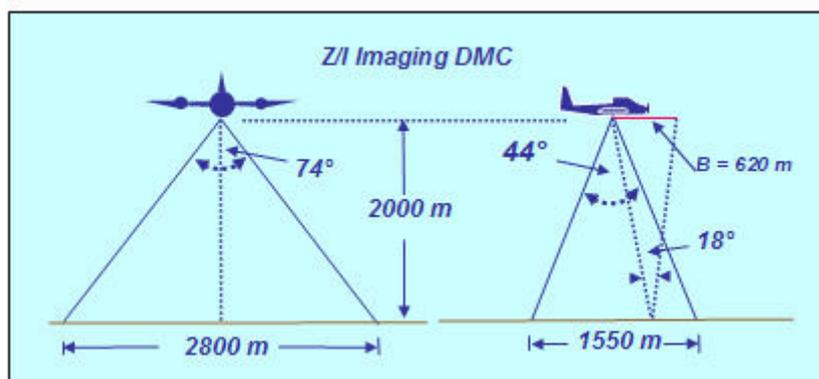


fig. 31

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

5.4 La camera Vexcel UltraCamD.

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 (v. fig. 32).



fig. 32

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 4008x2672 pixel, con pixel di lato di 9 μm.

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 fig. 33; il formato fisico del piano focale che risulta da questa disposizione dei sensori è di 103.5x67.5mm².

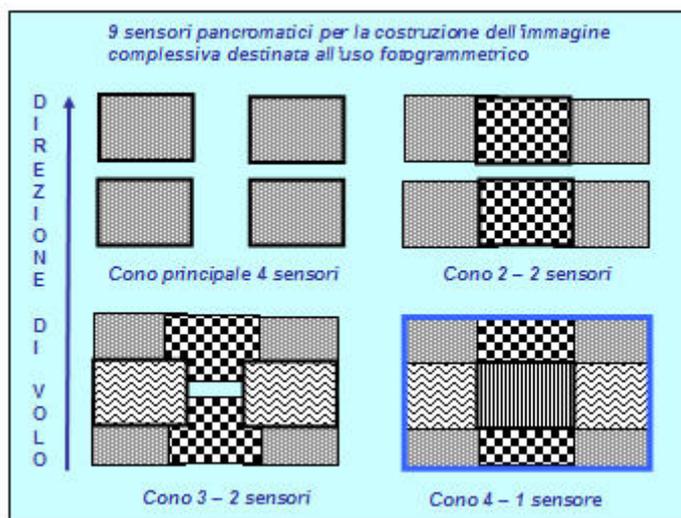


fig. 33

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

Via 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 cono 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. E' per ovviare a questo inconveniente che i quattro cono sono stati posti in asse con la direzione di volo. L'esposizione non avviene infatti contemporaneamente per tutti i cono, 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'obiettivo di ciascun cono si trova sempre nella stessa posizione spaziale.

La cadenza di presa massima è di 1 fotogramma la secondo.

Nella fig. 34 sono riassunte le caratteristiche geometriche di presa che possono esser confrontate con quella della camera tradizionale (v. fig. 19).

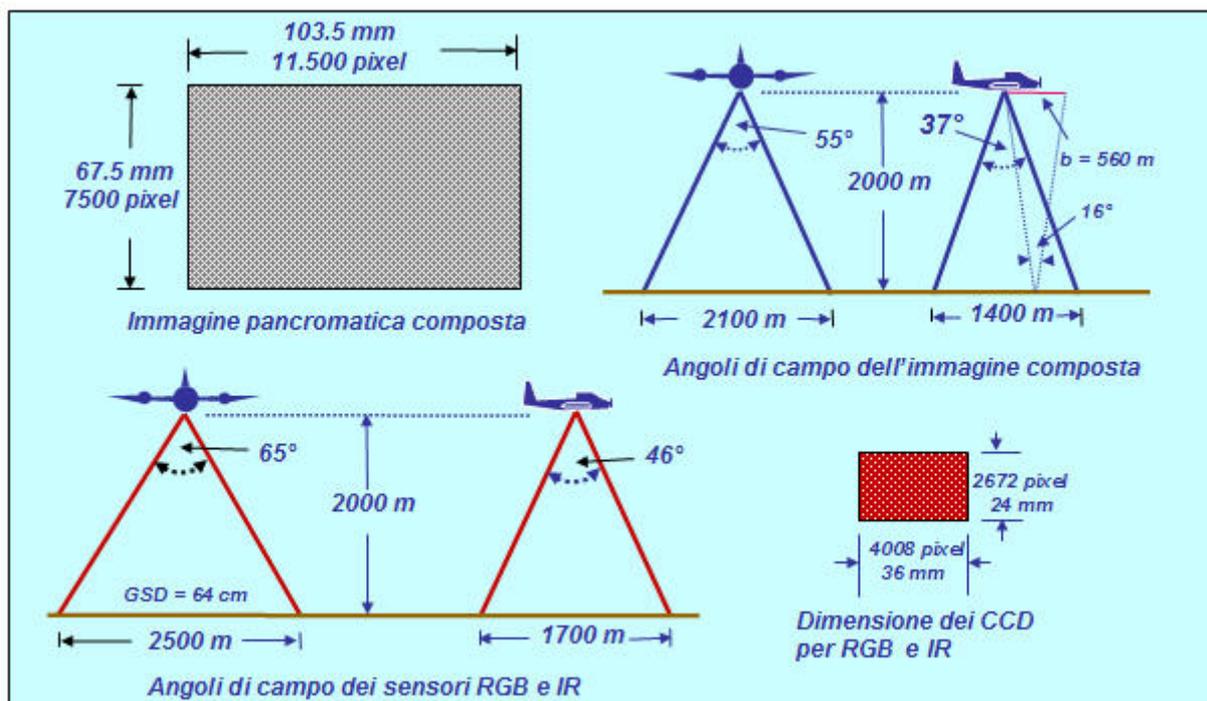


fig. 34

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 il GSD, mentre invece alquanto ridotta risulta la base di presa, che $H=2000$ 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 $540 \mu\text{m}$, ed è quindi molto prossimo al valor massimo del FMC della Wild RC10, che, come abbiamo già ricordato, è di $640 \mu\text{m}$.

5.5 La geometria della fotogrammetria con le frame camera.

Le camere di tipo *frame* che abbiamo visto finora quelle di uso promiscuo terrestre ed aere, le multicamera come la DiMAC, e le multi-cono come Vexcel UltraCamD e Z/I DMC, sono

camere per le quali la geometria della fotogrammetria, basata sull'equazione di collinearità, rimane immutata rispetto a quella delle prese effettuate con camere fotogrammetriche a pellicola. In altre parole i software fotogrammetrici utilizzati per applicazioni fotogrammetriche delle immagini digitali ottenute per scansione di fotogrammi su pellicola, possono essere usati con immagini digitali acquisite direttamente da queste camere.

6. Camere fotogrammetriche a sensori lineari multipli

6.1 Il principio di funzionamento delle camere a sensori lineari multipli (SML).

Le camere aerofotogrammetriche dotate di sensori lineari multipli (SLM) riprendono con continuità il territorio sorvolato, con tre viste simultanee: una vista nadirale (nadir), una vista inclinata nella direzione di volo (forward = **Fw**) e una vista inclinata in direzione opposta al volo (backward = **Bw**). Ciò si ottiene posizionando sul piano focale tre sensori lineari.

La posizione dei sensori **Fw** e **Bw** rispetto a quello Nadir può variare a seconda del tipo di camera; in genere al loro posizione non è simmetrica rispetto al sensore Nadir.

Inoltre vedremo che oltre ai tre sensori **Fw**, **Bw** e Nadir che acquisiscono l'immagine in tutto lo spettro pancromatico (danno cioè immagini paragonabili a quelle della pellicola in b/n), le camere SLM hanno anche altri sensori per l'acquisizione del colore e dell'IR.

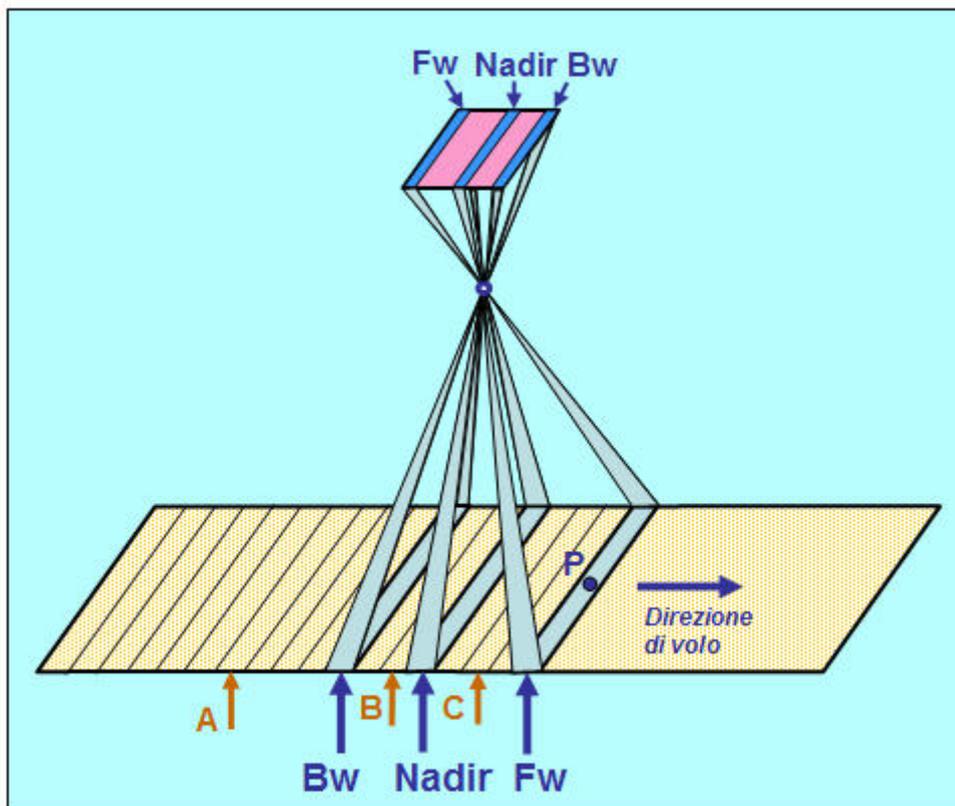


fig. 35

Nella fig. 35 è rappresentata schematicamente, ad un istante T_1 , una camera digitale SLM che sta riprendendo una strisciata di terreno.

In essa sono evidenziati i tre sensori sul piano focale e le corrispondenti strisce del terreno che, nell'istante T_1 , danno la loro immagine sui sensori; per semplicità di disegno si è omesso di suddividere i sensori lineari in pixel, così come il terreno già ripreso è stato suddiviso nelle ideali

strisce che hanno dato la loro immagine sui sensori, senza evidenziare la loro suddivisione in quadratini ideali corrispondenti ai pixel proiettati al suolo.

Nella figura si sono evidenziate con le lettere A, B e C tre delle strisce ideali nelle quali la strisciata è stata suddivisa dall'azione di cattura dei sensori.

Ciò che si vuole far rilevare è che la striscia A, come tutte quelle che la precedono e quelle che la seguono, fino a quella inclusa che all'istante T_1 a cui la figura si riferisce è ripresa dal sensore **Bw**, sono state riprese, all'istante T_1 , da tutti e tre i sensori. La striscia B, quella che la precede e quella che la segue, all'istante T_1 ripresa dal sensore Nadir, sono state riprese due volte, e cioè dal sensore **Bw** e dal sensore Nadir. Invece la striscia C, quella che la precede, quella che la segue e quella ripresa all'istante T_1 dal sensore **Fw**, sono state riprese una sola volta.

A mano a mano che l'aereo avanza lungo la strisciata tutte le strisce ideali in cui il terreno viene suddiviso saranno riprese tre volte.

Nella figura 35 è stato inoltre evidenziato il punto **P**, che è il punto mediano della striscia ripresa all'istante T_1 dal sensore **Fw**, poiché tale punto sarà preso in particolare considerazione in quanto diremo qui di seguito.

Una delle caratteristiche principali di una camera a sensori lineari è costituita dalla massima frequenza di acquisizione fa_{max} , che è il massimo numero di volte al secondo con cui la camera può effettuare il ciclo composto dall'esposizione dei sensori alla luce e dallo svuotamento del sensore lineare con conseguente trasformazione delle cariche accumulate durante il tempo di integrazione in forma numerica.

In genere la frequenza massima di acquisizione fa_{max} varia tra 500 e 1000 cicli/s. L'inverso della frequenza massima di acquisizione è il periodo di acquisizione minimo ΔT_{min} che è l'intervallo di tempo minimo tra l'inizio di due esposizioni successive dei sensori alla luce. Se, ad esempio, fa_{max} vale 500 cicli/s si avrà $\Delta T_{min} = 0,002$ sec, mentre con $fa_{max} = 1000$ cicli/s si ha $\Delta T_{min} = 0,001$ sec.

I valori fa_{max} e ΔT_{min} sono dei valori limite che non possono essere superati; in genere però la frequenza effettiva di acquisizione fa , e di conseguenza l'intervallo ΔT effettivo, cioè quello che viene impostato durante una presa, dipende dai seguenti parametri:

- altezza di volo **H**
- velocità dell'aereo **V**
- dimensione del lato **L** del pixel del sensore
- focale **f** dell'obiettivo

Dall'altezza di volo **H** e dalla focale **f** della camera si ricava il fattore di scala **H/f**; questo fattore moltiplicato per la dimensione del lato **L** del pixel del sensore dà la dimensione della proiezione a terra del sensore lineare nella direzione del volo; dividendo questo prodotto per la velocità dell'aereo si ha l'intervallo da utilizzare tra due esposizioni consecutive:

$$\Delta T = ((H/f) \cdot L) / V$$

Come detto questo valore non deve risultare minore di ΔT_{min} .

Ad esempio: se la ripresa aerea viene eseguita con $H=2000$ m alla velocità di 300 km/h e la camera ha obiettivo con focale $f=100$ mm e sensore lineare col lato del pixel di $9 \mu m$, risulta

$$\Delta T = ((2000 / 0.080) \cdot 0.000009) / (300 \cdot 1000/3600) = 0,0027 \text{ sec}$$

e pertanto tale intervallo tra due esposizioni consecutive dei sensori è compatibile anche con una camera che abbia un $\Delta T_{min} = 0,002$ sec, e cioè una fa_{max} di soli 500 cicli al secondo.

Un altro calcolo che si può fare è quello di determinare, in base alla fa_{max} , la velocità massima V_{max} a cui può volare l'aereo che effettua la ripresa, in funzione dell'altezza di volo **H**, della focale **f** della camera e della dimensione **L** del lato del pixel del sensore.

Se sostituiamo infatti nella relazione precedente a ΔT la frequenza di acquisizione fa si ottiene:

$$1/ fa = ((H / F) \cdot L) / V$$

da cui

$$V = (H/f) \cdot L \cdot fa$$

e sostituendo fa con fa_{max} si ha :

$$V_{max} = (H/f) \cdot L \cdot fa_{max}$$

Se assumiamo ancora i parametri dell'esempio precedente ($H = 2000m$, $f = 80 \text{ mm}$, $L = 9 \mu m$, $fa_{max} = 500$ cicli/sec) risulta:

$$V_{max} = (2000 / 0.08) \cdot 0.000009 \cdot 500 \cdot (3600/1000) = 405 \text{ km/h}$$

Questo significa ad esempio che non potremo utilizzare un jet per effettuare le riprese, ma dovremo utilizzare un normale aereo turboelica.

6.2 La geometria di presa delle camere a sensori lineari multipli.

Ora che abbiamo illustrato il principio di base della ripresa mediante camere sensori lineari multipli facciamo alcune considerazioni sulla loro geometria di presa, per meglio comprendere in cosa esse si differenzino dalle camere tradizionali a pellicola.

Nella fig. 36 è rappresentata schematicamente, ad un istante T_1 , la stessa una camera digitale aerea SLM della fig 35, ma rappresentata come vista da una direzione ortogonale alla direzione di volo anziché in rappresentazione assonometrica.

Nella fig. 36 a) è indicato con α l'angolo tra la direzione di presa Bw e la direzione di presa Nadir; con a è indicata la distanza sul terreno tra le due strisce riprese tra la direzione Bw e la direzione Nadir che, in funzione dell'altezza di volo H , vale $a = H \times \tan \alpha$.

Con β è indicato l'angolo tra la direzione di presa Nadir e la direzione di presa Fw ; con c è indicata la distanza tra le due strisce di terreno riprese tra la direzione Nadir e la direzione Fw che vale $c = H \times \tan \beta$.

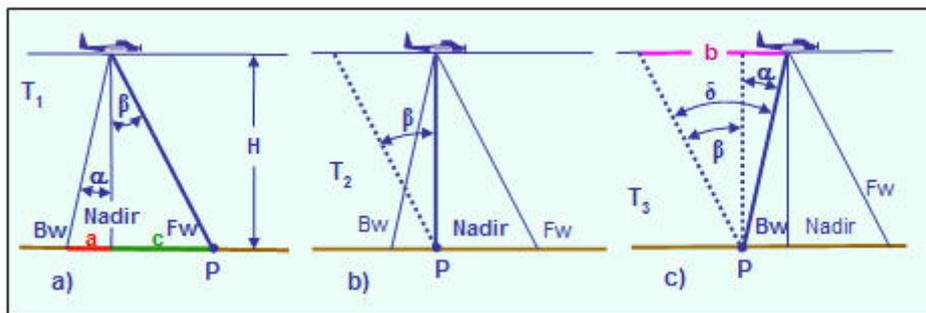


fig. 36

Consideriamo ciò che avviene all'istante T_1 : non occupiamoci di ciò che riprendono in questo istante i sensori in direzione Bw e Nadir e consideriamo solo il punto P che si trova nella striscia di terreno che corrisponde alla presa Fw .

Consideriamo ora l'istante T_2 in cui l'aereo è traslato della quantità c in modo da portarsi con la direzione Nadir in corrispondenza del punto P (v. fig. 36 b)); con questa seconda presa Nadir e la precedente Fw si hanno del punto P due immagini che ne consentono la visione stereoscopica sotto l'angolo α .

Consideriamo ora l'istante T_3 (v. fig. 36 c)) in cui l'aereo è traslato della quantità a in modo da portarsi con la direzione Bw in corrispondenza del punto P ; con questa presa Bw si ha del punto P una terza immagine che ne consente la visione stereoscopica sotto altri due angoli e cioè sotto l'angolo α formato dalle direzioni Nadir e Bw e sotto l'angolo δ formato dalle direzioni Bw e Fw . Questo angolo è il più grande dei tre e lo possiamo equiparare a quello che abbiamo

precedentemente indicato per le prese con camera tradizionale a pellicola, come l'angolo di massima stereoscopia.

Si vede inoltre dalla fig. 36 c) che la base di presa **b**, che si può paragonare a quella delle prese con camera tradizionale a pellicola, è data dalla somma di **a+c**.

Ciò che avviene per il punto **P** avviene per qualsiasi punto del terreno che si trova nella zona di terreno che corrisponde alla strisciata.

Possiamo notare che mentre nelle prese con camera tradizionale a pellicola c'è un solo punto nel modello stereoscopico che è osservabile sotto l'angolo di massima stereoscopia, nelle prese con camere SLM tutti punti che si trovano sull'asse della strisciata sono osservabili sotto l'angolo di massima stereoscopia.

Con le riprese con camere SLM il tradizionale concetto di strisciata intesa come sequenza di fotogrammi che si sovrappongono longitudinalmente lungo la direzione di volo viene superato da quello di strisciata continua.

Naturalmente per poter eseguire la restituzione fotogrammetrica di prese effettuate con camere a sensori lineari multipli occorre utilizzare programmi di elaborazione delle immagini completamente diversi da quelli che si impiegano nel caso delle prese tradizionali.

Inoltre le camere SLM devono essere sempre dotate di GPS e IMU, poiché nell'operazione di post-processing in cui viene formata l'immagine complessiva della strisciata occorre conoscere la posizione spaziale della camera (coordinate del punto di presa e assetto angolare) in corrispondenza di ogni punto di presa nel quale è avvenuta la presa simultanea delle tre strisce di terreno (**Fw**, Nadir e **Bw**). Con riferimento alla fig. 35 possiamo dire che se **n** sono le striscioline ideali in cui viene suddiviso il territorio che costituisce la strisciata, saranno **n** i punti di presa dei quali dovranno essere note le coordinate e **n** le triplette dei parametri di assetto angolare della camera in corrispondenza di essi.

Le camere a sensori lineari multipli sono caratterizzate da molti aspetti positivi. Innanzitutto ne sottolineiamo uno di carattere generale e che potremmo definire strategico: esse si avvalgono, se pur con le dovute differenze, della stessa tecnologia degli apparati a scansione satellitari; vedremo anzi che una delle camere SML che prenderemo in considerazione nel seguito è direttamente derivata da una camera destinata originariamente ad essere montata su una sonda destinata ad esplorare il pianeta Marte. Ciò significa che le camere SML si integrano in uno schema di rilevamento del territorio che le accomuna con le riprese satellitari e quindi, da un lato, ne può sfruttare l'evoluzione tecnologica, e dall'altro offre prodotti che sono simili a quelli proposti dalla tecnologia satellitare ad alte risoluzione.

In secondo luogo le camere SML, sul piano della produzione si caratterizzano per la ripresa continua delle strisciate, non più frammentate in fotogrammi. Le riprese inoltre si prestano molto bene alla produzione delle ortofoto, poiché, utilizzando la presa nadirale, almeno nel senso del volo, l'effetto prospettico è completamente eliminato.

6.3 La camera ADS40 della Leica.

La camera ADS40 è una camera SML 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 fig. 37 viene mostrata una vista esterna della camera e uno spaccato 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.



fig. 37

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 Fw, Nadir e Bw
- un gruppo di tre sensori pancromatici che raccolgono l'immagine RGB mediante un prisma tricoico
- un sensore che raccoglie l'immagine nella banda IR.

I sensori sono costituiti da 12.000 pixel di 6.5 μm di lato.

L'immagine Fw, Nadir e BW viene raccolta non da tre sensori, ma, come detto, da tre coppie di sensori. Ciascuna coppia di sensori è costituita da due sensori accostati e sfalsati mezzo pixel (v. fig. 38 c)); 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 fig. 38 a) è indicata una delle possibili disposizioni dei sensori lineari sul piano focale della ADS40; diciamo che è 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 può 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.

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 (v. fig.38 b); 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.

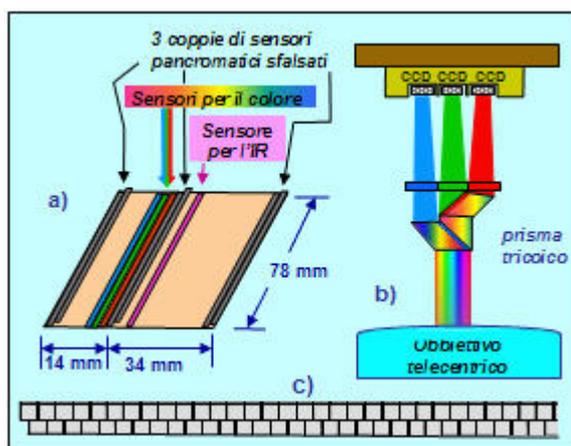


fig. 38

Come indicato in figura la dimensione fisica dei sensori lineari nel senso trasversale alla direzione di volo è di 78 mm ($6.5 \mu\text{m} \times 12.000$). 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 Fw e Bw, si ha una base di presa virtuale a cui corrisponde un angolo di massima stereoscopia di 42.6° , addirittura superiore a quello che si ha con le camere aerofotogrammetriche tradizionali, come si vede confrontando la fig 39 con la fig 19.

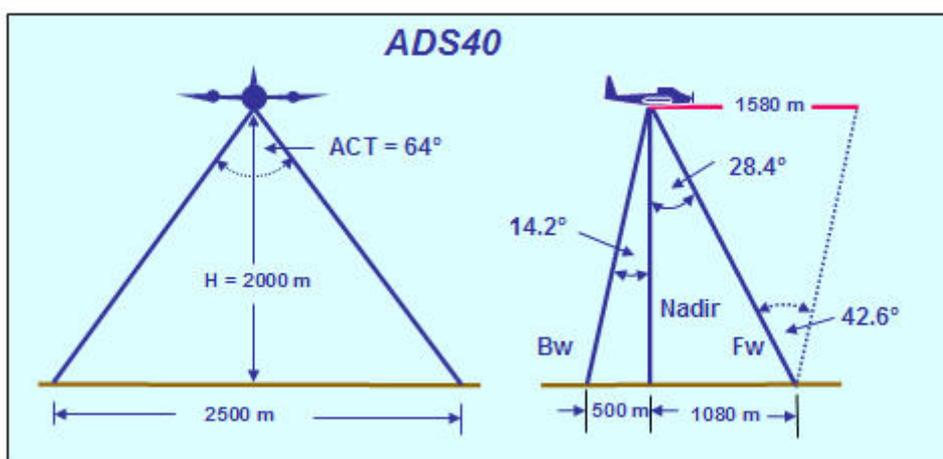


fig. 39

Per quanto riguarda la risoluzione geometrica in termine di GSD, sempre considerando le condizioni di confronto assunte, si ha che a 2000 m di quota 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.

6.4 Le camere HRSC

Dalla camera La camera HRSC-AX deriva dalla camera HRSC (High resolution Stereo Camera) che fu originariamente realizzata per la progettata missione su Marte dall'Istituto di Esplorazioni Planetarie del German Space Centre di Berlino-Adlershof sono derivate due camere per uso su piattaforma aerea. La e la HRSC AXW.

La camera HRSC-AX, che è dotata di dispositivo GPS/IMU dell'Applanix, è visibile nella fig. 40. 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 fig. 40; 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 molto inferiore a quella che si ha con una camera tradizionale (v. fig. 19).

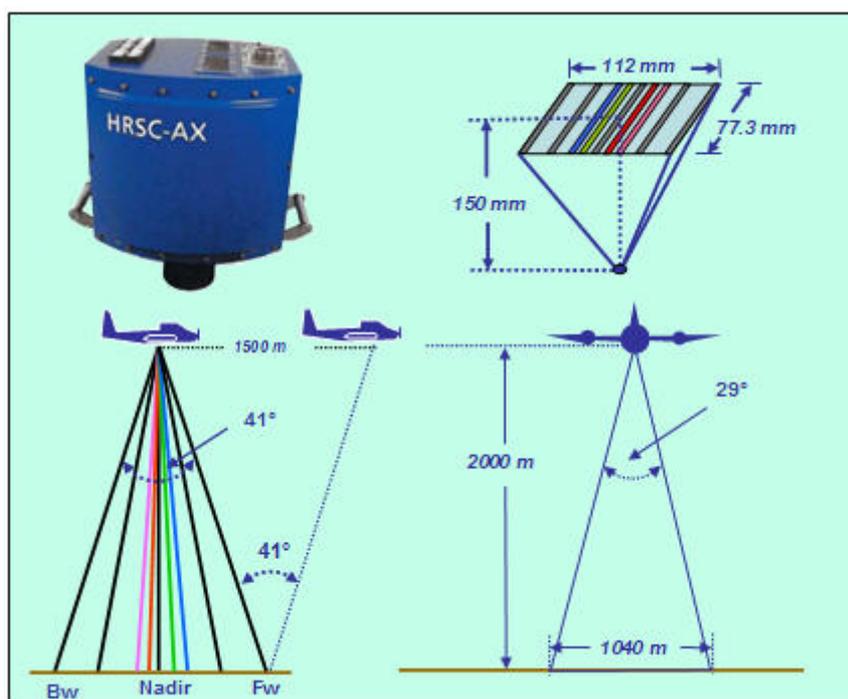


fig. 40

Grazie alla ridotta dimensione del pixel e alla lunga focale dell'obiettivo notevole risulta il GSD che, nella situazione di confronto, risulta pari a 8,6 cm.

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 *true orthophoto* o comunque per fotogrammetria di precisione, la camera HRSC-AXW, è più 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 Fw, Nadir e Bw 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 produce una strisciata di larghezza di 3360 m, che risulta quindi superiore, anche se di non molto, a quella di confronto relativa a una camera tradizionale.

A 2000 m di altezza di volo il GSD della HRSC-AXW è di 28 cm, e quindi non molto superiore a quello di confronto con la camera tradizionale.

La frequenza di scansione di entrambe le camere è molto elevata pari a 1640 linee al secondo.

6.5 3-DAS-1 Wehrli della Wehrli Associates Inc.

Questa camera (v. fig. 41) utilizza il consueto schema dei pushbroom line scanners che abbiamo visto per l'ADS40 e per la HRSC-AX, ma si caratterizza per i seguenti aspetti:

- la struttura dell'ottica, che è basata non su un unico obiettivo, ma su tre obiettivi, dei quali i due che provvedono alla visuale Fw e Bw hanno gli assi ottici non ortogonali al piano focale, al quale è invece ortogonale l'asse ottico dell'obiettivo centrale che fornisce la visuale Nadir.
- la camera non usa sensori pancromatici per le direzioni Fw, Bw e Nadir, e altri per il multispettrale, ma usa tre sensori trilineari Kodak nelle posizioni Fw, Bw e Nadir.

I sensori trilineari Kodak sono composti ciascuno da 8032 pixel di 9 μm di lato.

La focale delle ottiche è di 100 mm.

La camera è montata sul supporto stabilizzatore proprietario ASP-1, sul quale è montato il dispositivo IMU che fornisce i dati per il controllo in tempo reale dell'assetto della camera.

Nella fig. 41 è visibile la camera (vista da sotto) e la piattaforma stabilizzatrice sulla quale si vede il dispositivo IMU. Nella fig. 42 è visibile la camera ripresa da sopra.



fig. 41

La frequenza di scansione varia da 300 linee/sec a 800 linee/sec.

E' prevista una prossima versione della camera con ottiche da 60 mm.

Nella fig. 42 è riportata la geometria di presa relativa alla camera con l'ottica da 100 mm.

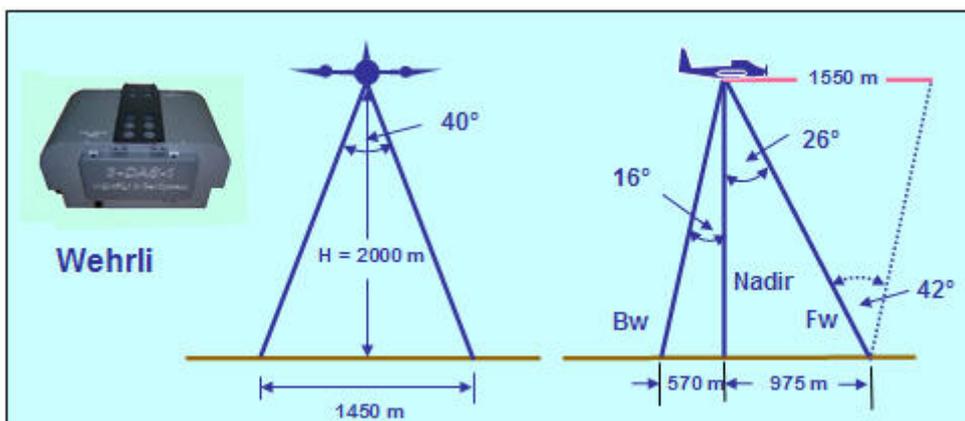


fig. 42

Come si vede l'angolo della visuale Fw è 26° mentre quello della visuale Bw è di 16°; ne risulta un angolo di massima stereoscopia di 42° e una base di presa virtuale di 1550 m. Nettamente inferiore a quello della camera tradizionale è invece il campo abbracciato trasversale che è di 40°

e che produce una larghezza di strisciata da 2000 m di soli 1450 m. Molto buono il GSD che nella situazione di confronto risulta di 18 cm.

Con ottiche da 60 mm il campo trasversale abbracciato migliorerebbe portandosi a 62°, con una corrispondente larghezza di strisciata di 2400 m; il GSD risulta però in questo caso di 29 cm.

6.6 Camera Starimager TLS (three line scanner) della Starlabo Corporation di Tokyo.

La camera Starimager è stata concepita per uso da elicottero.

Come si vede dalla fig. 43 essa viene montata all'esterno del velivolo agganciata ad una apposita piattaforma stabilizzatrice antivibrazione; la camera è dotata di strumentazione GPS/IMU.

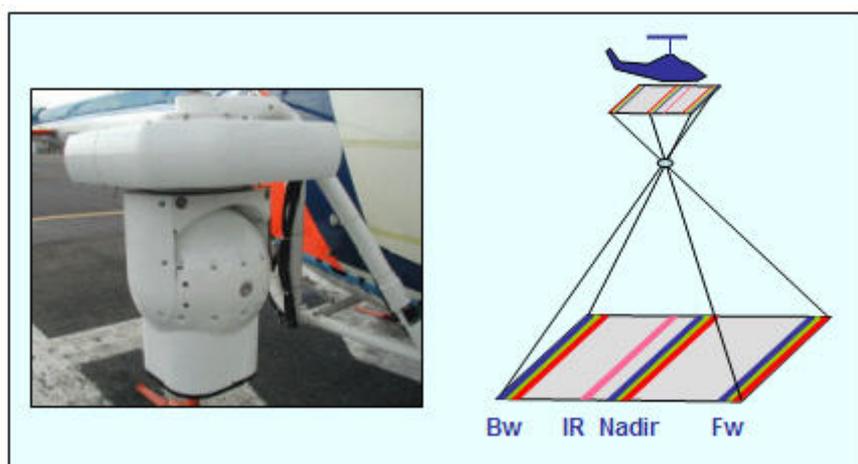


fig. 43

La camera ha un obiettivo di 60 mm che proietta l'immagine sul piano dove sono posizionati tre sensori trilineari RGB in posizione Fw, Nadir e Bw e un sensore per l'IR (v. fig. 43).

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 Fw, Nadir e Bw è indicata nella fig. 44 che presenta la geometria della camera nella situazione di confronto con la camera tradizionale a pellicola.

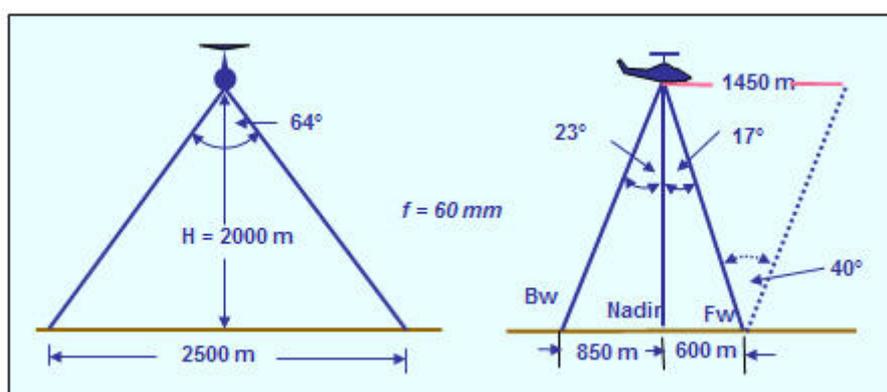


fig. 44

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 risultando di 16 cm.

L'acquisizione massima è di 500 linee/sec, 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.

7. Conclusioni.

Come detto in premessa in questo articolo si è dato più spazio alla parte dei sensori che a quello della rassegna delle camere digitali, con lo scopo di dare elementi con cui esaminare non solo le camere digitali di oggi, ma anche quelle di domani.

La rassegna fatta sulle camere digitali può essere considerata abbastanza esaustiva per quanto riguarda quelle dedicate al rilevamento aereo, e in specie a quello fotogrammetrico, poiché si può dire che siano state prese in considerazione tutte le camere oggi presenti sul mercato. Per quanto riguarda le camere da presa terrestri o di uso promiscuo terrestre ed aereo la rassegna è invece solo tipologica, poiché oggi esse sono presenti sul mercato con una varietà di marche e modelli che sarebbe impossibile recensirle tutte. La diffusione delle camere digitali ad uso terrestre, amatoriale e professionale, è stata tale che si stima che già oggi le macchine da presa digitali prodotte e vendute siano più del doppio di quelle di tipo tradizionale. Si è facile profeta a prevedere che il vantaggio economico, unito alla enorme versatilità di uso dell'immagine digitale, relegherà molto presto le macchine a pellicola e il benemerito rullino tra gli oggetti di modernariato.

Per quanto riguarda il mondo della ripresa aerea fotogrammetrica possiamo supporre invece che le camere digitali non soppianteranno nell'immediato le camere tradizionali, per diversi motivi. In primo luogo perché l'industria fotogrammetrica è tradizionalmente legata a tempi lunghi di ammortamento degli strumenti; basti pensare che benché da quindici anni siano disponibili e ormai ben collaudati sia strumenti che procedure di fotogrammetria digitale, sono ancora presenti, e non in piccola misura, strumenti analogici encoderizzati. Inoltre bisogna anche considerare che la gestione delle immagini presenta ancora problemi per quanto riguarda la loro memorizzazione e i tempi di elaborazione e che l'utente finale del prodotto fotogrammetrico, richiede sempre, oltre alla cartografia, le stampe delle foto aeree dalle quali essa è stata ricavata. Tutto sommato allo stato attuale è più semplice riporre una scatola di 200 stampe in un armadio che non gestire 200 immagini in forma numerica da 30 400 Mb l'una.

Non va neanche trascurato un altro fattore, che ha il suo impatto non solo sul mondo produttivo, ma anche su quello scientifico e cioè il senso di perplessità che si ha quando si abbandona una tecnologia che si domina in ogni aspetto, come è quello della fotogrammetria tradizionale, dove pellicole, strumenti fotogrammetrici e procedure sono ormai per tutti senza misteri, per rivolgersi ad un'altra che ci relega in una posizione di utenti sempre meno consapevoli degli strumenti che utilizzano.

Questi però sono piccoli ostacoli momentanei a una completa e rapida diffusione della tecnologia digitale anche nella fase della ripresa aerea fotogrammetrica; ostacoli che verranno presto rimossi non solo dai vantaggi economici che a regime comporterà la tecnologia digitale, ma soprattutto dal progresso più che esponenziale della tecnologia elettronica e informatica che permea ormai ogni settore del mondo della scienza, dell'industria e del nostro vivere quotidiano.