

Le immagini in fotogrammetria digitale

In un ambiente in cui le nuove potenzialità tecnologiche (sviluppo di sensori ad elevata risoluzione) ed informatiche (aumento della capacità di elaborazione e memorizzazione dei dati) si stanno affermando, l'acquisizione digitale è diventata lo strumento primario per registrare informazioni.

La fotogrammetria digitale elabora, mediante software, immagini in formato digitale e per questo è anche chiamata Softcopy Photogrammetry, in contrapposizione con l'Hardcopy Photogrammetry, la fotogrammetria che usa ancora immagini di tipo analogico, cioè su pellicola.

Il passaggio dalla Hardcopy Photogrammetry a quella digitale (o Softcopy) è stata una vera e propria rivoluzione nel settore della strumentazione ed ha comportato importanti cambiamenti sia di procedure che di prodotti. Significativo è anche l'ampliamento delle basi scientifiche della disciplina. Innanzitutto le immagini in formato digitale richiedono agli operatori una buona conoscenza nel campo del trattamento e della gestione dell'immagine.

L'immagine digitale

L'immagine digitale nasce da una operazione di discretizzazione, passando dal continuo bidimensionale ad una serie di elementi di superficie (pixel), disposti su un reticolo regolare o a matrice, ed una di quantizzazione con cui si assegna a ciascun pixel il valore di un determinato parametro fisico, ad esempio la luminosità, espressa come valore di grigio.

L'immagine digitale così costruita è una matrice di numeri interi di dimensione $M \times N$ (figura 1) e come tale può essere trattata analiticamente. Gli elementi della matrice vengono indicati con le coordinate (m, n) dove m è il numero di righe ed n quello delle colonne. L'origine del sistema di coordinate pixel 2D è di solito posta sul pixel in alto a sinistra dell'immagine, con l'asse x positivo verso destra (colonne) e l'asse y positivo verso il basso (righe).

I valori radiometrici vengono registrati sequenzialmente nella memoria di massa di un elaboratore, per mezzo di una rappresentazione binaria; dall'ordine di registrazione si risale alla posizione del pixel corrispondente (rappresentazione raster dell'immagine).

La risoluzione geometrica di una immagine digitale è legata alla dimensione del pixel. Essa viene espressa in dot per inch (dpi) o in coppie di linee per mm (lp/mm); si noti che non si riferisce in effetti al numero di linee risolte, ma solo alla dimensione del pixel acquisito. Ad esempio 400 dpi rappresentano una dimensione del pixel di 0.064×0.064 mm ($25.4\text{mm}/400$) da cui si ottengono circa 25000 pixel/cm²; oppure 1000 dpi rappresentano una dimensione del pixel di 0.025×0.025 mm da cui si hanno 155000 pixel/cm² che corrispondono a 20 linee/mm.

La risoluzione radiometrica è legata al numero di bit utilizzati per rappresentare il valore radiometrico e generalmente varia da 1 a 8 bit. Il numero di livelli rappresentabili è pari a 2 (numero di bit per pixel). Dunque un'immagine con una risoluzione radiometrica a 1 bit determina una rappresentazione binaria e assume solamente due valori: '0' che corrisponde al valore nero ed '1' che corrisponde al valore bianco (immagine in bianco e nero). Con 8 bit (1 byte) si hanno 256 livelli cromatici. Le immagini a colori vanno scomposte nelle componenti fondamentali (rosso, blu e

verde), secondo i criteri della sintesi additiva, per cui ogni pixel, richiede 24 bit (3 byte) per la rappresentazione a 256 livelli cromatici 16.7 milioni di colori.

La massa di dati da memorizzare può diventare imponente e la gestione di tali dati richiede memorie di massa speciali, dischi ottici e la moderna tecnologia dei CD-Rom. E' possibile trovare le immagini archiviate in formati differenti (bmp, tiff, gif, pcx, ecc.), che utilizzano anche tecniche di compressione, come il formato jpg. L'uso di compressioni spinte in applicazioni metriche è sconsigliabile, perché c'è il rischio di perdere informazioni.

In figura 2(a) è rappresentata un'immagine ad 8 bit (256 livelli di intensità), con un intervallo di discretizzazione di $60 \mu\text{m}$ (400 dpi); in 2(b), 2(c) e 2(d) viene mostrato l'effetto di un decremento della risoluzione spaziale rispettivamente di un fattore 4, 8 e 16. Le immagini in figura 2(e), 2(f) e 2(g) mostrano invece l'immagine con la risoluzione geometrica originaria di $60 \mu\text{m}$, ma rappresentata con differenti livelli di risoluzione radiometrica di 1 bit (2 livelli di intensità), 2 bit (4 livelli di intensità) e 3 bit (8 livelli di intensità).

Acquisizione delle immagini digitali

L'acquisizione delle immagini può avvenire in maniera diretta mediante camere CCD o effettuando la conversione in digitale delle fotografie analogiche, mediante scanner. Nel primo caso il pixel dell'immagine ottenuta

archivia direttamente la luminosità di una porzione di oggetto, nel secondo caso l'informazione corrisponde a quella presente sul supporto della pellicola.

Acquisizione diretta: camere CCD

La tecnologia dei sensori CCD si è affermata con eccellenti risultati nelle riprese da satellite; nelle applicazioni terrestri si stanno oggi sempre più affermando i sistemi per l'acquisizione digitale diretta.

La presa digitale si effettua direttamente con camere o telecamere a dorso digitale, in cui la pellicola è sostituita da una matrice di sensori allo stato solido, con dimensioni tipiche attorno alla decina di micrometri e numero di elementi variabile.

Sul mercato sono disponibili più di un centinaio di camere digitali di svariati tipi, di cui circa la metà a bassa risoluzione. Esperienze di rilievo fanno sì che queste camere (con meno di 1 milione di pixel) possano essere utilizzate per rilievi non solo descrittivi ma anche metrici, sempre che non sia richiesta un'elevata precisione.

Generalmente le camere digitali hanno focale fissa; poche hanno incorporato un sistema di lenti con una doppia lunghezza focale e sono in numero ancora minore quelle equipaggiate con un sistema di zoom automatico (da 3x a 12x).

Il fattore che viene preso maggiormente in considerazione da coloro che intendono effettuare un rilievo di tipo fotogrammetrico è la risoluzione dell'immagine. Le camere digitali presenti sul mercato vanno dal tipo a bassa risoluzione, da 324×240 fino a 640×480 pixel, a quelle che incrementano la risoluzione, da 756×464 fino a 1024×768 pixel. Inoltre molte camere hanno la capacità di poter selezionare via via la risoluzione desiderata, entro un certo range; altre applicano solo differenti livelli di compressione del dato, ma la risoluzione resta invariata; in altre, infine, non è il numero di sensori che fa variare la risoluzione, ma solo tecniche artificiali di interpolazione che non aumentano qualitativamente le caratteristiche dell'immagine originale.

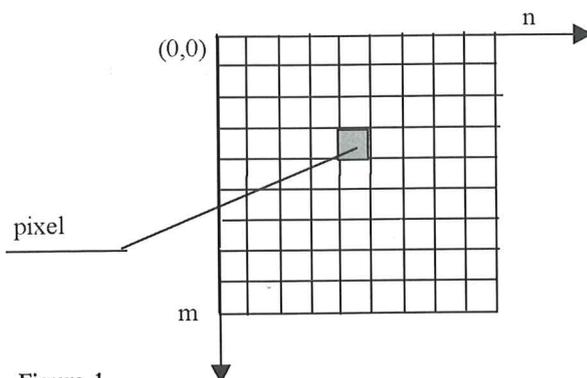


Figura 1

Se nella fotografia analogica il sensore è l'emulsione di alogenuri d'argento, nella moderna strumentazione da presa opto-elettronica esso è sostituito da un dispositivo CCD (Charge Coupled Device), formato da una serie di condensatori MOS (Metal Oxid Semiconductor) disposti a formare linee o matrici, rettangolari o quadrate. Questi semiconduttori sono ottenuti depositando elettrodi metallici su piastrine di ossido di silicio, ridotte ad uno stato depressivo, tale da farne delle vere e proprie unità di memorizzazione delle cariche elettriche generate da fotoni, quindi dalla luce che colpisce l'elemento; l'informazione così archiviata viene poi trasferita serialmente utilizzando un clock multifase.

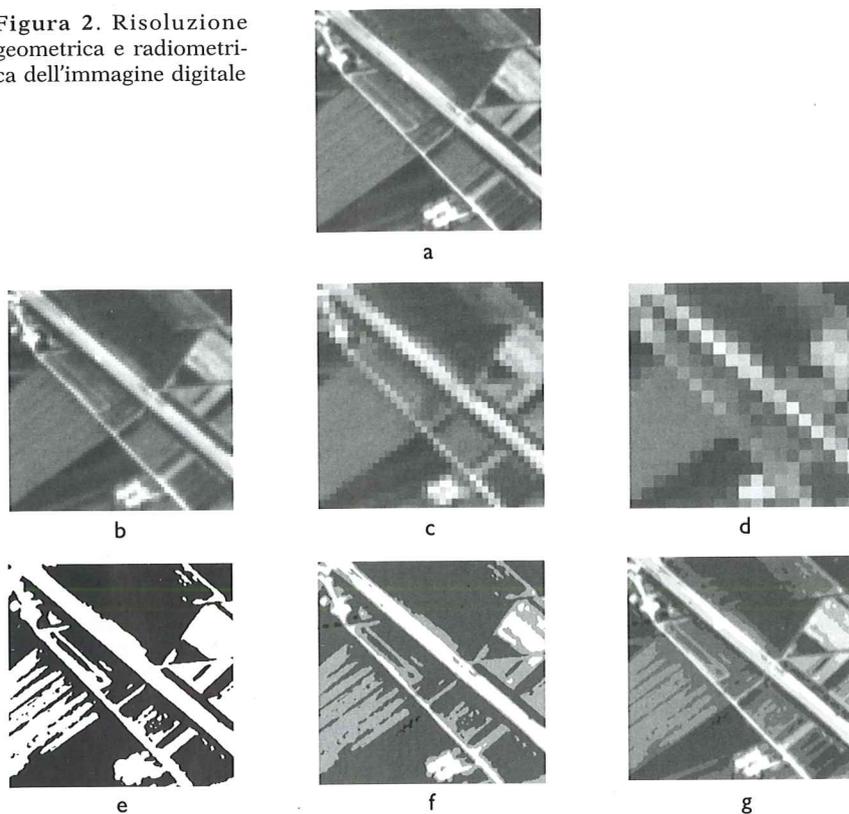
In questi dispositivi ogni elemento del sensore ha, per costruzione, una posizione nota con estrema precisione ed assai stabile. Si noti però che a questa stabilità fisica del sensore non corrisponde necessariamente una stabilità nell'acquisizione: ad esempio, nelle videocamere la dimensione del pixel nell'immagine dipende sia dalle modalità di trasmissione sia da quelle di campionamento del segnale. Esistono sul mercato alcuni sistemi di acquisizione digitale diretta dedicati alla fotogrammetria, dotati di certificato di calibrazione. Pur in presenza di un notevole sviluppo tecnologico, che porta ad avere camere con numero di pixel sempre maggiore, il formato utile (cioè l'area sensibile sul piano immagine) è ancora largamente inferiore rispetto alle camere analogiche, e pertanto le risoluzioni sono insufficienti. Per aumentare la risoluzione e/o il formato sono state adottate soluzioni differenti che, per quanto tecnologicamente notevoli, presentano tutte lo svantaggio di tempi di acquisizione dell'ordine di parecchi secondi (o decine di secondi), limitando lo spettro di applicabilità: il *macro-scanning* (che consente di aumentare il formato dell'immagine) ed il *microscanning* (che consente di aumentare la risoluzione dell'immagine).

La Reseau-Scanning-Camera Rsc della Rollei, è un esempio del primo tipo di architettura. Basata su un sensore a matrice che si muove su guide non calibrate, essa è in grado di effettuare automaticamente la mosaicatura dell'immagine con una particolare modalità di acquisizione, che sfrutta il reticolo (reseau) di calibrazione senza però sovrapporlo all'immagine. Il formato raggiungibile è di 4200x6250 elementi, pari a 55x55 mm.

La Line-Scanning-Camera Lsc della Rollei può essere adattata al corpo e al sistema di lenti del modello 6008 realizzando la registrazione di immagini digitali a colori di 5000x5000 elementi; con riproducibilità dei pixel pari a 2 µm.

Analogo sistema è quello della UMK 1318 della Carl Zeiss Jena, realizzato per applicazioni di fotogrammetria *close range*. Il dispositivo di scansione comprende quattro matrici di sensori, montate su guide con movimento calibrato. Il formato immagine è di 120x166 mm, con risoluzione di circa 14000x11000 elementi pari a circa 170 Mbyte per immagine. Un'immagine completa viene acquisita in circa 10 minuti.

Figura 2. Risoluzione geometrica e radiometrica dell'immagine digitale



Tra le migliori camere microscanning, la Kontron ProgRes, disponibile con sensori bianco/nero e colori, produce immagini digitali con circa 3500x2300 elementi; mentre la camera Jeanscan 4500, sviluppata dalla Rheimetal Jenoptik Metrology per misure di precisione, fornisce immagini digitali con 4500x3500 elementi, a partire da un sensore Sony ICx024 con 756x581 elementi.

Con questi sistemi di acquisizione sono state raggiunte precisioni relative (rapporto tra le dimensioni dell'oggetto e la precisione di posizionamento) fino a 1:80000.

Il problema che si incontra nell'uso di una camera digitale è quello dell'archiviazione del dato. Le versioni più semplici hanno una capacità interna di archiviazione che va da 1Mb a 4Mb. Oggigiorno queste camere sono equipaggiate con una *memory card* che può essere inserita direttamente in un Personal Computer. Le memory card hanno differenti usi e formati, con una capacità che va da 2Mb, 8Mb fino a 100 Mb e persino 340 Mb. La moderna tecnologia ha reso possibile persino l'uso del floppy disk da 3.5", più versatile e standardizzato, per il trasferimento dei dati su computer. E' possibile addirittura connettere la camera direttamente ad un computer e, mediante software dedicato all'elaborazione delle immagini, trasferire le stesse più facilmente anche se più lentamente. Ci sono poi camere che addirittura effettuano il trasferimento di immagini senza una connessione diretta con il computer, utilizzando la tecnologia a raggi infrarossi (es. la camera Sony DSC - F1).

Per controllare, impostare, ottenere immagini di ottima qualità, le camere sono dotate

di selezionatori sia manuali che automatici, utilizzabili sia direttamente sulla camera che attraverso un computer. Alcune camere sono equipaggiate con un sensore LCD video che può essere usato come display per inquadrare l'oggetto da fotografare o per rivedere le immagini archiviate.

La tecnologia delle camere digitali è in continua evoluzione, trascinata dall'espansione del loro mercato, il che assicura maggiori prestazioni e prezzi più bassi.

Acquisizione indiretta: scanner

Se si ricorre alle tradizionali immagini fotografiche di tipo analogico, il processo di digitalizzazione avviene successivamente allo sviluppo del film, tramite l'impiego di scanner.

Gli scanner hanno risoluzioni assai variabili, da un minimo di 100 sino ad un massimo di 4000 dpi, ovvero da 250 a 6.25 µm. Il primo valore non si presta ad usi fotogrammetrici; quello più elevato, comunque pari a 2-4 volte le dimensioni dell'emulsione all'alogeno d'argento, si adatta maggiormente alla richiesta di precisione fotogrammetrica che va da 25 a 5 µm, ma è tuttora impraticabile in termini di gestione dei dati.

Gli scanner sono convenzionalmente divisi in due classi: fotogrammetrici e DTP.

Gli scanner fotogrammetrici hanno un'altissima risoluzione geometrica e un'elevata accuratezza (2-5 µm); quasi tutti sono correddati di un *software* per l'orientamento interno attraverso il riconoscimento delle marche fiduciali, con ricampionamento dell'immagine nel sistema fotogramma e hanno un modulo per scansione continua del rullo, ma necessitano di una macchina dedicata con

Scansione (dpi)	Pixel metrico (μm)	Scala immagine	Scala restituzione	Dimensione pixel sull'oggetto (cm)
1.000	25	1:70	1:10	0.18
800	32	1:300	1:50	0.96
800	32	1:1.200	1:200	3.84
800	32	1:3.000	1:500	9.6
600	43	1:5.000	1:1.000	21.5
500	51	1:8.000	1:2.000	40.8
300	85	1:13.000	1:5.000	110.5
200	128	1:20.000	1:10.000	256

dischi in linea da decine di Gbyte. Gli svantaggi sono relativi all'elevato costo che supera il centinaio di milioni di lire.

Il formato degli scanner fotogrammetrici è sempre almeno di 24x24 cm, la risoluzione radiometrica varia fra 8 e 12 bit, quella geometrica è variabile fra 600 e 4000 dpi. I tempi di acquisizione di un fotogramma aereo sono consistenti (dai 15' ai 45' per risoluzioni geometriche di 15 μm); tali prestazioni possono essere notevolmente migliorate con l'utilizzazione di schede *real-time* in grado di lavorare con *file* compressi.

Gli scanner DTP (*Desktop Publishing*) nascono per applicazioni totalmente differenti da quelle fotogrammetriche. Essi hanno avuto subito una maggiore diffusione e un rapido sviluppo in termini tecnologici grazie proprio all'elevato rapporto tra prestazioni e prezzo.

Gli scanner DTP sono usualmente piani (*flatbed scanner*) e dotati di uno o più sensori CCD lineari. Esistono oggi scanner DTP a prezzi poco superiori al milione, capaci di acquisire solitamente in formato A4 (le versioni in formato A3 hanno un costo superiore alla decina di milioni), sia fotogrammi su carta fotografica che su negativo (quindi in trasparenza) con una risoluzione radiometrica da 8 a 12 bit e risoluzione geometrica da 400 a 1200 (2400) dpi.

Il maggior svantaggio degli scanner DTP è rappresentato dall'insufficiente precisione geometrica, causata principalmente da:

- imperfetto allineamento dei sensori CCD;
- irregolarità nel movimento di scansione;
- distorsioni dell'ottica di acquisizione;
- discontinuità nell'acquisizione legate al meccanismo di scarico delle immagini, alle prestazioni ed alle capacità del *buffer* dello scanner.

Questi fenomeni possono essere in buona parte corretti mediante l'uso di reticoli di calibrazione.

Sono quindi preferibili a riguardo gli scanner DTP a singola passata e con buffer di dimensioni elevate (> 2Mb).

Si possono inoltre verificare anomalie radiometriche (dovute ad illuminazione non uniforme e alle differenti risposte dei singoli elementi sensibili) che possono essere in parte corrette tramite ricampionamenti e filtri.

Ricampionamento di immagini digitali

L'operazione di ricampionamento viene spesso usata in fotogrammetria digitale sia durante le operazioni di correlazione che nella generazione di fotopiani ed ortoimmagini, ovvero in tutte le operazioni che comportano una trasformazione geometrica (di forma) dell'immagine. Tale operazione consiste nella determinazione dei valori radiometrici da assegnare ai pixel della nuova immagine, sulla base di quelli dell'immagine originale. In pratica, si calcola attraverso la funzione di trasformazione geometrica, la posizione del centro di ogni pixel della nuova immagine rispetto a quella originale, ottenendo in generale una posizione non intera. Poiché la radianza è data come funzione discreta, il valore verrà ottenuto interpolando i valori di grigio dei pixel circostanti con un qualche criterio (il pixel più vicino, l'interpolazione bilineare, la convoluzione cubica). In generale si ha una diminuzione del contrasto nelle zone di discontinuità, mentre si preservano quelle con variazioni continue dei toni di grigio. La tecnica più usata, che rappresenta il miglior compromesso tra tempi di calcolo e degrado dell'immagine, è l'interpolazione bilineare dei valori di grigio dei 4 pixel circostanti.

La risoluzione geometrica nelle applicazioni fotogrammetriche

E' opportuno chiedersi quale sia la risoluzione geometrica più appropriata con cui lavorare nelle applicazioni fotogrammetriche. Un'immagine in scala 1:2000 con un pixel da 12.5 μm non produce lo stesso risultato di un'immagine in scala 1:1000 con un pixel da 25 μm , anche se matematicamente la dimensione del pixel sull'oggetto è sempre pari a 2.5 cm. Infatti una risoluzione da 25 μm produce un'immagine di qualità migliore, introducendo un degrado minore in fase di scansione dell'immagine originale. A riguardo, nella tabella, sono riportate alcune informazioni che possono essere utili per la scelta della risoluzione in base alle caratteristiche richieste dal rilievo fotogrammetrico.

Attualmente la risoluzione ottimale viene ricercata considerando un buon compromes-

so tra le precisioni raggiungibili nelle varie fasi del lavoro fotogrammetrico e l'occupazione di memoria consentita dagli strumenti.

Analizzando le esperienze riportate in letteratura in questi ultimi anni si possono sintetizzare i seguenti risultati:

- l'individuazione delle marche fiduciali è ottenibile con precisione più che soddisfacente con risoluzioni di 1200 dpi e con precisioni sufficienti a 600 dpi, utilizzando la correlazione ai minimi quadrati;
- la generazione automatica di DEM fornisce precisioni sufficienti con risoluzioni di 800 dpi;
- per la generazione di ortoimmagini si impiegano risoluzioni tra 20-40 μm con valore ottimale pari a 25 μm (1000 dpi).

Eva Savina Malinverni
Politecnico di Milano, DIAR

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Baltsavias E. P., Bill R.: *Scanners - A survey of current technology and future needs*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30/1, Como, 1994.

Baltsavias E. P.: *Test and calibration procedures for image scanners*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30/1, Como, 1994.

Baltsavias E.P.: *Test and calibration procedures for DTP scanners*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30/1, Como, 1994.

Godding R.: *High Resolution Digital Cameras for Photogrammetric Applications*.

In "Digital Sensors and Systems", B. Benciolini, D. Sguerso (eds.), Trento, 1993.

Leberl F.W.: *The promise of Softcopy Photogrammetry*. In: Digital Photogrammetric Systems, H.Ebner, D.Fritsch, C.Heipke (Eds.), Wichmann Verlag Karlsruhe, pp. 3-15, 1992.

Lenz R. K.: *Image Data Acquisition with CCD Cameras*. OMT, 1989.

Li X., Faig W.: *A survey on low-resolution digital cameras*, GIM International, 1, 1998.