

# Tecniche di analisi ed elaborazione immagini digitali da SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto)

Massimo Micieli<sup>1</sup> e Mirco Taranto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Università della Calabria – Facoltà di Ingegneria DINCI e DLATIC – Docente a contratto, Pilota/Operatore SAPR

<sup>2</sup> Università della Calabria – Dipartimento DiBEST – Dottorando SLACE, Pilota/Operatore SAPR

## 1. L'evoluzione della fotogrammetria: da quella analogica a quella digitale

La fotogrammetria ha origini più antiche di quanto si possa pensare, sembra che sia stata già adottata come tecnica nella seconda metà dell'ottocento, ma un dato è certo: la sua vera evoluzione è da ricercarsi nei primi decenni del XX secolo, in parallelo allo sviluppo delle tecnologie aeronautiche che l'hanno resa l'assoluta protagonista nella realizzazione di mappature cartografiche territoriali di ogni ordine e grado. Inizialmente gli interi processi fotogrammetrici si basavano sull'uso di immagini e di strumenti restitutori analogici, alquanto complessi, che richiedevano personale altamente qualificato, a garanzia di una elevata attendibilità dei risultati finali.

Successivamente il progresso tecnologico ha facilitato, velocizzandole, le procedure fotogrammetriche, passando attraverso metodi analitici, con l'invenzione dei calcolatori elettronici, fino al pc dell'era digitale moderna. Importantissimo è stato il passaggio dalle fotocamere con pellicola a quelle digitali, che hanno semplificato ulteriormente gli "step" elaborativi, facendo di conseguenza aumentare la produttività e rendendo l'intera strumentazione più economica ed accessibile anche a professionisti di altri settori. Quindi, entrano in gioco automatismi, rapidità esecutiva e low-cost, nonché maggiore flessibilità: tutti punti di forza della fotogrammetria digitale.

### 1.1. Le fotocamere digitali

L'avvento delle immagini digitali ha segnato inesorabilmente il mondo della fotogrammetria (e non solo), passando dalla pellicola ad immagini rappresentate da matrici di pixel.

Per quanto concerne le camere digitali, bisogna in primis distinguere tra quelle amatoriali e professionali; in fotogrammetria si impiegano camere metriche e semi-metriche, ma il loro peso ed il loro elevato costo ad oggi non ne consentono l'utilizzo sui droni. Pertanto, ci si "adatta" a quelle amatoriali ma con dovuti accorgimenti: scelta di obiettivi idonei, calibrazione del sistema camera-obiettivo, dimensione del sensore, peso.

Certamente l'elemento più importante nell'utilizzo con gli APR è il peso, infatti è in funzione della capacità di carico (payload) del drone che si sceglie la fotocamera più adatta. Sono utilizzati, a tal proposito, sia modelli di camere digitali compatte che le classiche reflex (DSLR). Le prime sono limitate per quanto riguarda le dimensioni del sensore e la tipologia di obiettivi, non intercambiabili, che montano (generalmente grandangolari di qualità mediocre), ma avvantaggiate da un peso molto ridotto; mentre le reflex, sono più pesanti e possono equipaggiare esclusivamente APR di alto livello, ma la tipologia delle lenti che possono utilizzare può essere scelta a seconda delle varie esigenze, senza dimenticare che hanno sensori full frame.

Tuttavia, attualmente il miglior compromesso è rappresentato dalle innovative fotocamere "mirrorless", che racchiudono la versatilità di una fotocamera compatta con la qualità di una fotocamera DSRL professionale, avendo un corpo macchina decisamente più piccolo e conseguentemente di peso inferiore (fig. 1). La differenza sostanziale sta, inoltre, nella mancanza del sistema a specchio e prisma nelle mirrorless (fig. 2).



Figura 1. Confronto fra reflex e mirrorless

Il grande vantaggio di queste eccezionali fotocamere è, dunque, a favore dell'autonomia di volo dei droni, senza rinunciare all'elevato numero di pixel (alte risoluzioni).

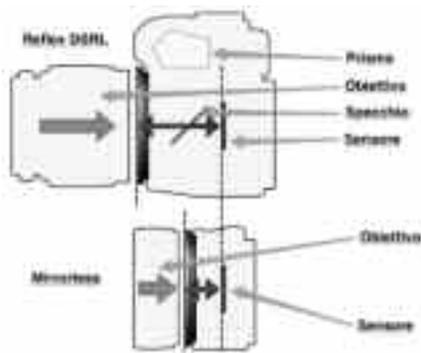


Figura 2. Mancanza dello specchio e del prisma nelle mirrorless

### 1.2. Le immagini digitali

Un'immagine digitale è costituita da una matrice bidimensionale composta da righe e colonne di pixel. Ogni pixel è individuato univocamente da due numeri interi che rappresentano la posizione in riga e colonna all'interno della matrice (i,j). Per convenzione nelle immagini digitali l'origine del sistema righe/colonne è posto nell'angolo in alto a sinistra.

Fissando un opportuno sistema di riferimento (x,y), spostato di mezzo pixel a sinistra e in alto rispetto all'origine righe/colonne, è possibile associare ad ogni pixel delle coordinate (fig. 3). Lo spostamento di mezzo pixel è finalizzato esclusivamente ad avere coordinate di numeri interi per la rappresentazione del baricentro dei singoli pixel.

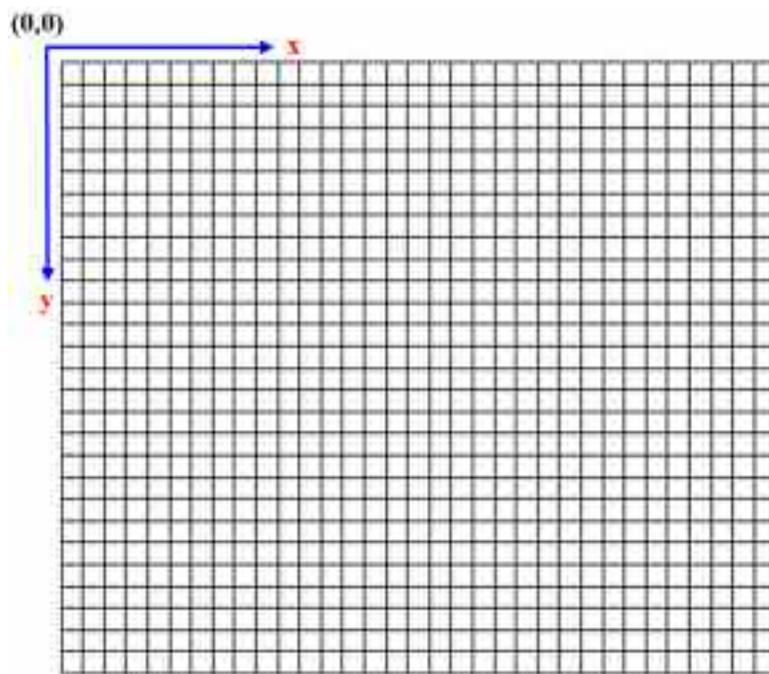


Figura 3. Matrice di pixel di un'immagine digitale

Una caratteristica delle immagini digitali è la risoluzione radiometrica, la quale è legata al numero di bit utilizzati per rappresentarne il valore. Nelle immagini digitali a colori per ogni pixel occorrono 24 bit per l'informazione colore (8 bit per ognuno dei tre canali fondamentali RGB), per cui l'immagine avrà un range di 16,7 milioni di possibili tonalità colore diverse. Altro parametro importante è la risoluzione geometrica legata, invece, alla dimensione del pixel, che indica il numero di pixel contenuti in un'unità di lunghezza *dpi* (*dot per inch* – punti per pollice, ovvero pixel contenuti in 2,54 cm).

## 2. Algoritmi della fotogrammetria digitale

È doveroso premettere che gli algoritmi tradizionali del processo fotogrammetrico restano tutt'ora validi, ma la grande novità è data dalla possibilità di eseguire (con opportuni software) operazioni, manuali e/o

automatiche, che prima venivano fatte in maniera interattiva da tecnici specializzati.

In particolare l'automazione delle procedure fotogrammetriche digitali si basa principalmente sugli algoritmi di autocorrelazione (*image matching*), che attraverso il riconoscimento di punti omologhi (o corrispondenze) con precisioni inferiori alle dimensioni del pixel consentono di ottenere risultati validissimi in termini di precisione e dettaglio.

Sulle immagini possono essere eseguite correlazioni su entità differenti, quali ad esempio: valori radiometrici, elementi geometrici (punti, linee, superfici), relazioni spaziali tra gli elementi. In ambito fotogrammetrico ci si basa logicamente sui valori radiometrici. Il metodo più utilizzato è l'ABM (*Area Based Matching*), basato sul confronto statistico dell'intensità di grigio tra i pixel.

In pratica, analizza due piccole porzioni di immagine: una detta matrice sagoma (o *template*), tenuta fissa su un'immagine e l'altra chiamata matrice di ricerca (o *search window*) che viene fatta muovere sull'altra immagine fino a quando non rivela l'esatto punto omologo di riferimento (scelto secondo criteri prestabiliti).

### 2.1. Tecniche di correlazione

Esistono due tecniche per individuare i punti omologhi sui quali effettuare la correlazione:

- 1 *Cross-Correlation*
- 2 *Least-Squares-Matching (LSM)*

La prima si basa sul criterio della massima correlazione tra i livelli di intensità di grigio dei punti di corrispondenza sulle due matrici suddette, ma è "limitata" ad una precisione al livello del pixel. La seconda, che permette di ottenere precisione maggiore (a livello sub-pixel), considera anche le distorsioni radiometriche e le deformazioni geometriche esistenti tra due immagini dello stesso oggetto ripreso da due punti di prospettiva diversi, funzioni molto importanti nell'aerofotogrammetria. Di fatto, le diverse condizioni di illuminazione degli oggetti ripresi da angolazioni differenti possono determinare distorsioni radiometriche, così come le variazioni dell'assetto del drone, piuttosto che dell'altezza di volo o l'irregolarità del terreno, producono distorsioni geometriche. Necessita pertanto tenerne conto ed apportare adeguate correzioni geometriche e radiometriche alla matrice sagoma e a quella di ricerca.

La tecnica LSM è stata ampiamente sperimentata ed usata in molteplici applicazioni; tuttavia soffre ancora di alcune problematiche legate sia al grado di incertezza della posizione dei punti omologhi che a difetti sulle immagini dovuti a malfunzionamenti del sensore. Su ciò diversi studiosi stanno sperimentando possibili soluzioni (es. L'altro metodo considera invece il principio della "geometria epipolare" secondo il quale i fotogrammi si trovano sullo stesso piano ed i punti omologhi giacciono lungo delle linee (dette epipolari). Questa è una condizione, che per ovvi motivi, non si riscontra nella realtà, dato che gli APR non garantiscono una posizione nadirale perfetta. Però, attraverso i dati di assetto del drone (yaw, pitch e roll) forniti dalla sensoristica montata a bordo, è possibile apportare le dovute correzioni che permettono di imporre la condizione suddetta, limitando la ricerca degli omologhi lungo singole direzioni. (2011), Wu *et al.* (2007), Zhang *et al.* (2011), ecc.) ai quali si rimanda per i dovuti approfondimenti.

Spesso le due tecniche descritte vengono utilizzate insieme in quanto è necessario che i valori della posizione della matrice di ricerca siano molto precisi al fine di ottenere una corretta correlazione.

## 3. Procedure automatiche di elaborazione immagini digitali

Attualmente la completa automazione dei processi elaborativi in fotogrammetria, già eseguibile con diversi software, non porta a risultati ad elevato dettaglio geodetico, tuttavia si stanno sperimentando diversi sistemi automatici basati su algoritmi di correlazione sempre più precisi.

Le fasi del processo di autocorrelazione possono essere schematizzate nel seguente modo:

- selezione dei punti che meglio si prestano alla correlazione;
- individuazione degli stessi sull'altra immagine;
- calcolo della posizione spaziale dei punti;
- valutazione della qualità della correlazione.

Prima fase: individuare sui fotogrammi i punti più idonei alla correlazione. I software utilizzano, a tal fine,

i cosiddetti “operatori di interesse” che sono degli operatori matematici in grado di identificare su ogni fotogramma entità generalmente puntuali o lineari.

Seconda fase: operazione che diventa particolarmente impegnativa per il calcolatore se si considera per ogni potenziale punto di correlazione l'intera immagine, dato che ad oggi si lavora su immagini di 24-42

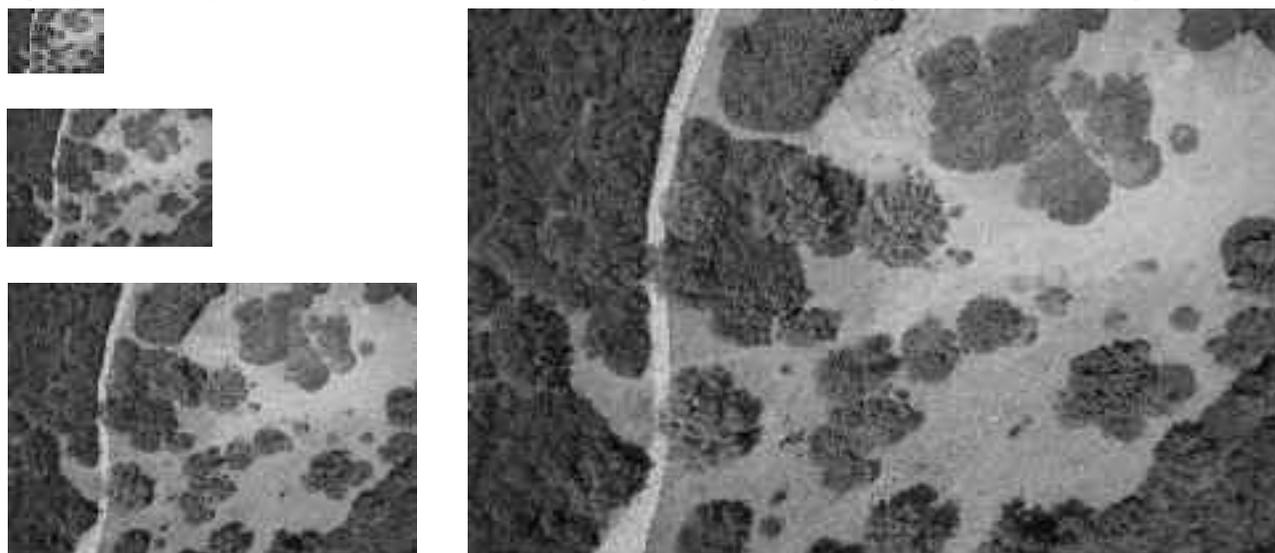


Figura 4. Scomposizione piramidale di un'immagine digitale

Mpx; è necessario, dunque, ovviare a tale inconveniente attraverso alcune tecniche. Una di queste, denominata “scomposizione piramidale”, consiste nello scomporre le immagini digitali in immagini sempre più piccole a risoluzione ridotta (fig. 4); cosicché il processo di correlazione inizia, con approccio di tipo gerarchico, dalle immagini a più bassa risoluzione, limitando notevolmente l'area di ricerca e di conseguenza i tempi elaborativi (fig. 5).

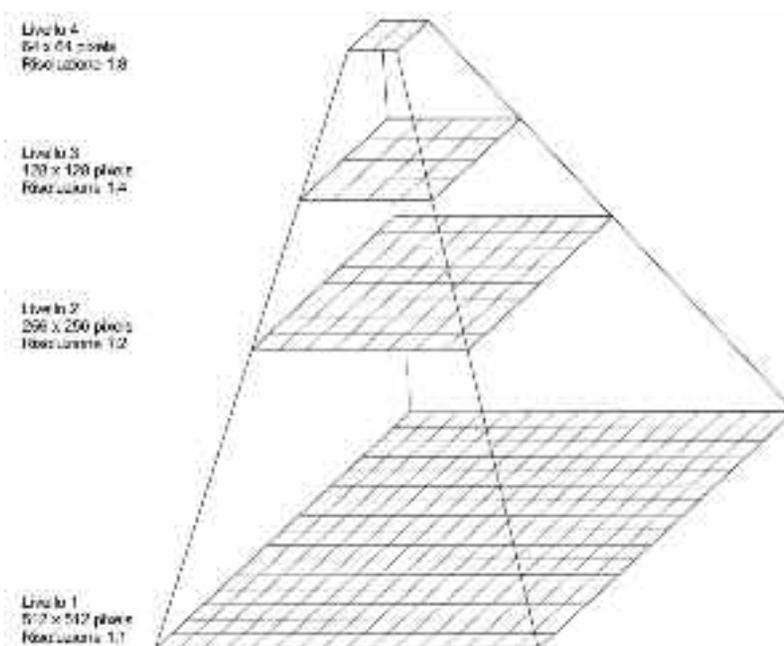
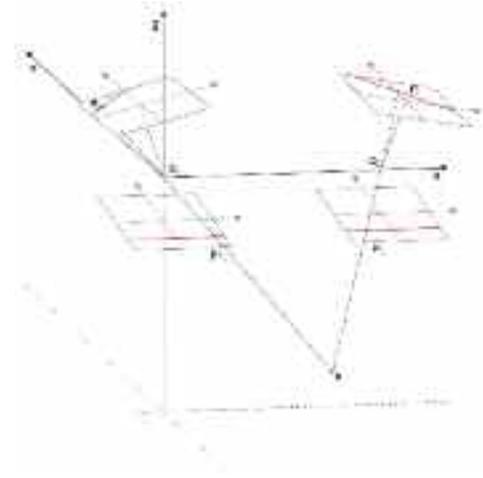


Figura 5. Gerarchizzazione seguita dal processo di correlazione

Terza fase: la posizione spaziale dei punti viene calcolata con gli algoritmi di image matching già descritti e adoperando i classici principi geometrici della visione stereoscopica.

Quarta fase: l'indice di correlazione è un parametro fondamentale per la buona riuscita dell'intero processo elaborativo. Gli errori dovuti a pixel “difettati” del sensore della fotocamera, nonché la qualità generale delle immagini, possono inficiare l'attendibilità di tale indice, rendendo poco affidabile il risultato finale.



**Figura 6.** Geometria epipolare di due fotogrammi da drone

Pertanto i software specifici devono essere in grado di segnalare esaurientemente questi possibili errori, in particolar modo nei processi interamente automatizzati.

L'automazione dei processi fotogrammetrici ha, tra l'altro, l'obiettivo di:

- ridurre i tempi rispetto alle classiche procedure interattive;
- produrre risultati ad elevato dettaglio;
- avere la possibilità di operare con immagini di diversa origine (aeree, satellitari, terrestri) e di qualità anche mediocre;
- poter utilizzare differenti tipi di informazioni per le operazioni di orientamento e di controllo.

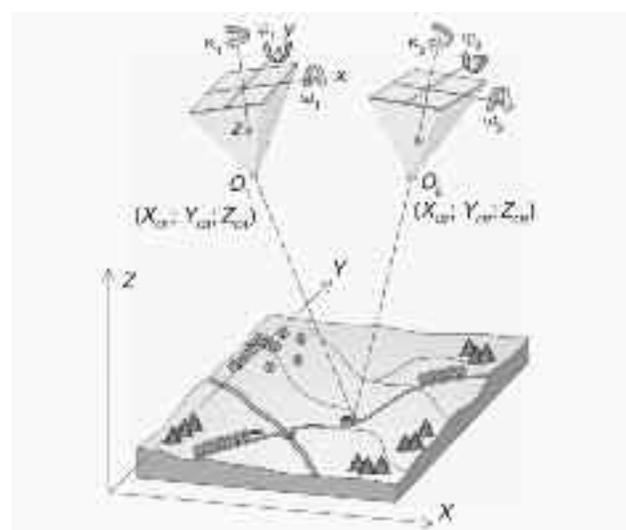
### 3.1. Orientamento interno ed esterno

Nel workflow relativo alla fotogrammetria sono fondamentali le operazioni di orientamento dei fotogrammi, che consentono di ricollocarli spazialmente nella esatta posizione che avevano all'atto di presa; ciò al fine di poter ottenere, con la tecnica della stereo visione, le informazioni di profondità per la corretta ricostruzione tridimensionale della scena ripresa. Nei fotogrammi aerei tradizionali la procedura prevede il riconoscimento e la digitazione delle "marche fiduciali", che può essere condotto sia manualmente che automaticamente. Nel caso di foto da drone, tali marche non sono disponibili, pertanto il processo va a considerare punti omologhi sulle immagini digitali utilizzando le tecniche di image matching.

L'orientamento interno consente di stabilire la giusta relazione geometrica tra il sistema di coordinate pixel dell'immagine e quello riportato dal certificato di calibrazione della fotocamera. Quest'ultimo riporta la reale distanza focale, la proiezione del centro di presa sul sensore (detto punto principale) e la curva di distorsione dell'obiettivo.

L'orientamento esterno consiste nella determinazione di tutti i parametri che definiscono la posizione di un corpo rigido nello spazio, in particolare: le coordinate del centro di presa ( $X, Y, Z$ ) e i dati di assetto della camera ( $\omega$ -roll,  $\varphi$ -pitch,  $\kappa$ -yaw) per ogni singolo fotogramma (fig. 7).

Una stima accurata di tutti i parametri detti è necessaria per mettere in relazione l'informazione che deriva dall'immagine (espressa in pixel), ottenuta dalla fotocamera digitale montata sul drone, con l'effettiva posizione ed orientazione nel sistema di riferimento adottato che la stessa aveva al momento degli scatti.



**Figura 7.** Parametri di assetto e posizionamento della camera

### 3.2. Restituzione del modello stereoscopico e dei modelli 3D

Una volta realizzati gli orientamenti interno ed esterno è possibile passare alla fase di restituzione, che consiste nell'insieme delle operazioni analitiche che consentono di passare dal modello stereoscopico dell'oggetto fotografato alle rappresentazioni grafico/numeriche:

- nuvole di punti
- modelli digitali del terreno (DTM, DSM, DEM)
- ortofoto
- cartografie
- rappresentazioni numeriche (coordinate di punti)
- modelli 3D generici
- altro...

In particolare, il processo di autocorrelazione è impiegato per la determinazione tridimensionale delle coordinate dei punti nel modello stereoscopico. L'individuazione automatica delle corrispondenze equivale sostanzialmente alla collimazione stereoscopica di un punto che effettua normalmente il tecnico specializzato. In realtà, nei processi automatici c'è il rischio di avere degli accoppiamenti di punti di corrispondenza ambigui (ovvero, di falsa corrispondenza), a causa di problematiche legate alle occlusioni (laterale o di secondo piano), errori nella texture, di diversa illuminazione della scena ripresa per le differenti posizioni della camera tra uno scatto e l'altro (distorsione fotometrica), distorsione prospettica e così via. Per questo motivo, è necessaria una fase di controllo ed eventualmente di editing dei punti, soprattutto nel caso di operatori inesperti che si affidano completamente agli automatismi. Controllo necessario specialmente nel caso in cui è prevista la realizzazione di carte topografiche di estremo dettaglio, ancor di più quando si è in zone dove la presenza di oggetti e ostacoli di vario tipo impedisce la visuale diretta della superficie del terreno.

### Bibliografia

- Guzzo F., Micieli M., Taranto M., 2017, "Governo e controllo del territorio - I Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR): il quadro di riferimento tecnico-evolutivo, normativo e gestionale". *Quaderno di Legislazione Tecnica* 2.2017.
- Lo Brutto M., 2005 "Elementi di fotogrammetria digitale", corso di "Geomatica e modellazione digitale del terreno" – Master Universitario di II livelli in *Sistemi Informativi territoriali*. Dispense corso.
- Micieli M., Taranto M., 2015, "Mappature e monitoraggio del territorio con Sistemi A.P.R. (Aeromobili a Pilotaggio Remoto)", in *GIS Day Calabria 2015 – VI edizione*, pp. 327 – 336, Map Design Project, Co-senza.
- Zeyu L., Jinling W, 2014, "Least Square Image Matching: a comparison of the performance of robust estimators". *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-1, 2014.