Auto-calibrazione di fotocamere digitali amatoriali applicata a tecniche di acquisizione multi-scala in fotogrammetria dei vicini

Digital camera self-calibration for multi-scale acquisition technique in close-range photogrammetry

Emanuele Tufarolo*,**

Riassunto

La calibrazione di fotocamere ed ottiche si va ad inserire in quella che è la primissima fase del processo "di elaborazione, produzione e manutenzione dei prodotti cartografici"; ovvero la fase del rilievo fotogrammetrico che porta alla produzione delle ortofoto necessarie alla restituzione cartografica qualsiasi sia la scala richiesta dal lavoro. Due sono gli obiettivi principali che si sono voluti conseguire: aumento dell'accuratezza generale; diminuzione del numero di punti di controllo misurati a terra, con conseguente risparmio di risorse, sia in termini economici sia in termini di tempo.

Questi obiettivi sono stati perseguiti, lavorando su immagini disponibili ed acquisite in un area test. L'acquisizione è avvenuta grazie ad una fotocamera Nikon D80 abbinata ad un obiettivo grandangolare 18 mm ed a una stazione totale Leica. L'aumento dell'accuratezza è stato ricercato attraverso il processo della self-calibration, diventato estremamente utile con la grande diffusione delle fotocamere digitali amatoriali, commercializzate senza certificato di calibrazione, nel campo del rilievo fotogrammetrico in particolare nel caso di "quote di volo" ridotte. Questa fase è stata eseguita integrando software open-source e commerciali: in particolare ERDAS/LPS e ESRI ArcGIS. La diminuzione del numero di GCP misurati è stata ottenuta attraverso l'implementazione di tecniche di acquisizione multiscala. Delle immagini generali dell'area test sono state georeferenziate attraverso un esiguo numero di punti di controllo misurati topograficamente. Sono state estratte le coordinate di punti notevoli (mediante tie point) visibili in una serie di immagini di dettaglio acquisite a una quota di volo molto minore di quelle del dataset generale. La triangolazione aerea di queste fotografie è stata eseguita utilizzando le coordinate estratte come tie dalle immagini a piccola scala.

Abstract

The lenses and camera calibration are the begin of the very first step in the process "of processing, production and maintenance of cartographic products": the phase of the photogrammetric survey that leads to the production of orthophotos necessary for cartographic production, whatever the scale required by the job. There are two main goal: increased overall accuracy; decrease in the number of control points measured on the ground, with consequent savings in resources, in economic terms and in terms of time.

These objectives were pursued, working on available images and captured in a test area. The acquisition was made through a Nikon D80 coupled with a 18 mm wide-angle lens and a Leica total station. The increase in accuracy has been sought through the process of self-calibration, became extremely important with the widespread use of consumer digital cameras, marketed without calibration certificate, in the field of photogrammetry, in particular in the case of lows "flight altitudes". This phase was carried out by integrating the open-source and the commercial software: in particular ERDAS / LPS and ESRI ArcGIS. The decrease in the number of GCP measured was achieved through the implementation of multi-scale acquisition techniques. General image of the test area were georeferenced through a small number of control points measured topographically. Were extracted coordinates of notable points (using tie points) visible in a number of detail images acquired at a flight altitude much lower than the overall dataset. The aerial triangulation of these photographs was performed using coordinates extracted from the images as a tie point on small scale's photo. This technique has allowed to obtain orthophoto to large scale and with high accuracy, reducing the number of control points that was necessary to measure topographically from about 300 to about 30.

* Università di Siena, Centro di Geotecnologie, Via Vetri Vecchi 34, 52027, San Giovanni Valdarno, Arezzo, Italy – tufarolo@cgt-spinoff.it

** Premio AIC 2013

Questa tecnica ha permesso di ottenere ortofoto a grandissima scala e con elevata accuratezza portando il numero di punti di controllo che è stato necessario misurare topograficamente da circa 300 a circa 30. La bontà del processo presentato è stata confermata da alcuni controlli eseguiti attraverso il confronto degli RMSE delle varie triangolazioni aeree e mediante analisi GIS dei DEM e delle ortofoto ottenuti prima e dopo la calibrazione della fotocamera sia nelle immagini a grande scala sia nelle immagini a piccola scala. Lo scarto tra le coordinate misurate topograficamente e le coordinate calcolate sull'ortofoto, nel caso delle set di immagini a grande scala diminuisce fino ad oltre il 52%, portando ad un significativo aumento dell'accuratezza. L'utilità della calibrazione risulta evidente in ogni caso: nel caso di utilizzo di tecniche multiscala si rende assolutamente consigliabile.

Parole chiave

Fotogrammetria, ortofoto, auto-calibrazione, accuratezza, tecniche multi-scala

The goodness of the process presented has been confirmed by some checks carried out by comparing the RMSE of the various aerial triangulations and through GIS analysis of the DEM and orthophotos obtained before and after the calibration of the camera: both in the pictures on a large scale and in the images at small scale.
The difference between the measured coordinates and the coordinates calculated sull'ortofoto, in the case of the set of images to large-scale decreases to more than 52%, leading to a significant increase in accuracy. The utility of the calibration is evident in each case: in the case of use of techniques multiscale it is absolutely advisable.

Keywords

Photogrammetry, ortophoto, self-calibration, accuracy, multi-scale technique

1. Premessa

Gli argomenti trattati nel seguito dell'articolo, pur inserendosi nel mondo della produzione cartografica, si concentrano su un settore molto specifico: quello della fotogrammetria[1].

La fotogrammetria, rappresenta una tecnica di rilievo metrico basata sull'utilizzo di coppie di fotogrammi stereoscopici. La conoscenza dei parametri fisici della camera utilizzata, della posizione e orientamento della stessa al momento dello scatto, e della differenza di parallasse tra le due immagini che compongono la stereocoppia permette di ottenere informazioni metriche dalle immagini fotografiche.

I fotogrammi stereoscopici aerei, oppure i fotogrammi acquisiti da distanze ravvicinate sempre con asse verticale rispetto alla superficie del terreno, sono una delle principali fonti d'informazioni per la produzione cartografica moderna.

A livello geometrico l'area d'interesse è coperta mediante una serie di strisciate parallele. Ogni strisciata è formata da vari fotogrammi che presentano tra loro un ricoprimento (longitudinalmente alla direzione di acquisizione) tale da permettere una visione stereoscopica continua (~60%). Le singole strisciate sono, inoltre, affiancate in modo tale da presentare una ricopertura laterale solitamente compresa tra il 30% ed il 50%.

Conoscendo quindi i vari parametri di ripresa e di volo, tra cui la quota, grazie alla condizione di collinearità è possibile stabilire una relazione geometrica rigorosa tra ogni singolo punto sul fotogramma e il corrispondente punto sul terreno. Questo passaggio permette di passare dalle coordinate immagine alle coordinate terreno mediante una rototraslazione con variazione di scala.

Terminato il processo di orientamento, spesso eseguito utilizzando anche punti di controllo a terra misurati con metodi topografici, diventa possibile utilizzare le immagini all'interno di stazioni fotogrammetriche stereoscopiche, a oggi essenzialmente digitali, e collezionare le *feature* necessarie alla restituzione topo-cartografica.

Importanti prodotti derivati dalla fotogrammetria digitale sono i modelli digitali di elevazione e le ortofoto. La generazione dei DEM si basa sulla possibilità di calcolare la quota Z di ogni punto della stereocoppia sfruttando la loro differenza di parallasse. Sfruttando le informazioni che si ottengono dal DEM e dai punti in comune, è possibile ortorettificare e georeferenziare i diversi fotogrammi, in modo tale che la scala di rappresentazione dell'immagine sia uniforme.

2. Procedura di calibrazione

Lo scopo della fase di calibrazione di una fotocamera è quello di stimarne i parametri fisici intrinseci (lunghezza focale, *offset* dal punto principale e fattori di distorsione dell'obiettivo) e di individuare la posizione del piano di riferimento solidale con la fotocamera. Con la tecnica della *self-calibration* l'operazione viene svolta, generalmente, posizionando una scacchiera analogica di dimensioni note sul piano di riferimento e fotografandola da posizioni e con inclinazioni diverse.

Pur integrati con successivi studi e sviluppi, alla base di quasi tutti gli attuali software di *camera calibration* che sfruttano l'approccio della *self-calibration*, si pongono i lavori di Tsai (Tsai, 1987, pp. 323-344) e di Zhang (Zhang, 1999, pp. 666-673 e 2000, pp. 1330-1334). Questi algoritmi sono implementati a livello software sfruttando le librerie *OpenCV (Open-Source Computer Vision)* per la loro capacità, tra le altre, di riconoscere pattern ed angoli (Bradsky, 2000, pp. 120-126).

In un modello ideale, un fotogramma coincide con una prospettiva centrale, geometricamente rigorosa, dell'oggetto fotografato. L'operazione di restituzione fotogrammetrica si basa proprio su questo fondamento per ricostruire la posizione di un punto, cioè le sue coordinate oggetto, partendo dalle coordinate immagine corrispondenti, misurate su due o più fotogrammi. Per fare questo è però necessario ricostruire l'orientamento interno del fotogramma, in altre parole si deve conoscere la posizione del centro di presa relativamente al piano dell'immagine.

La definizione della prospettiva centrale, richiede quindi, la determinazione di 9 parametri incogniti: 6 dell'orientamento esterno (determinati con metodi topografici diretti, o indiretti mediante l'utilizzo di punti

1 Per una trattazione dettagliata degli aspetti teorici e pratici della fotogrammetria, impossibile in questa sede, si rimanda alla vasta bibliografia sull'argomento. Tra gli altri, il manuale di fotogrammetria edito dalla American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (McGlone, 2013)

d'appoggio con una compensazione ai minimi quadrati) più 3 parametri dell'orientamento interno riferibili alla coordinate immagine del centro di presa e alla distanza principale. Questi ultimi parametri, caratteristici della camera da presa utilizzata, vengono desunti dal certificato di calibrazione, e quindi forniti dalla ditta che ha eseguito la ripresa, oppure si possono calcolare con opportune procedure di calibrazione, procedura da adottare con le moderne fotocamere digitali commerciali.

In un modello ideale, il punto oggetto, il centro di presa e il punto immagine corrispondente sul fotogramma, come detto, devono essere allineati, cioè devono appartenere alla stessa retta immaginaria ed essere, appunto, collineari (da qui il concetto delle equazioni di collinearità alla base della fotogrammetria analitica).

Prescindendo dal modello matematico ideale, in quello fisico reale, si devono inevitabilmente considerare gli errori sistematici indotti dalla camera che provocano uno spostamento del punto immagine, dalla posizione teorica giacente sulla retta collineare al punto oggetto. Per poter utilizzare le equazioni di collinearità è dunque necessario, ed indispensabile, introdurre delle opportune correzioni alle coordinate immagine.

Da notare è che se solitamente in fotogrammetria le equazioni di collinearità sono espresse esplicitando le coordinate terreno, nel caso della calibrazione sono esplicitate le coordinate immagine. Questo è un aspetto essenziale, infatti, se nel processo fotogrammetrico le coordinate immagine sono note grazie all'utilizzo di alcuni punti d'appoggio e da queste si vuole ricavare le coordinate oggetto di ogni singolo punto P, nel processo di calibrazione di una camera si va in un certo senso a compiere il processo inverso; conoscendo la geometria reale del *target* di calibrazione e le sue coordinate oggetto, si ricavano le coordinate immagine da cui trovare la deviazione rispetto alle coordinate teoriche attese per ogni P'. Questa deviazione dalla previsione teorica rappresenta l'oggetto del processo di calibrazione.

3. Self-calibration e parametri addizionali di Brown

Tipicamente, nel caso di utilizzo di camere digitali amatoriali, tutti i parametri di orientamento interno, esterno e coordinate oggetto dei punti sono incognite. La procedura di calibrazione che meglio si adatta a questo situazione è la cosidetta SCBA, ovvero, *self-calibration* con *bundle-adjustement* (Grün & Beyer; 2001, pp. 163-193).

Questa procedura considera gli errori sistematici dovuti al processo di acquisizione dei fotogrammi; tali errori vengono calcolati ed esperessi mediante l'utilizzo dei cosidetti parametri addizionali.

Tra i diversi modelli per il calcolo dei parametri addizionali uno largamente utilizzato in fotogrammetria dei vicini e quello indicato da Brown (1971, pp. 855-866), che consta di 10 parametri (APs) relativi a:

- orientamento interno della camera (Δxp, Δyp, Δc)
- incertezza sulla forma del pixel (*skew factor* S_x)
- non ortogonalità del sistema di riferimento (*shear factor* Λ)
- distorsione simmetrica radiale delle lenti (k_1, k_2, k_3)
- distorsione tangenziale delle lenti (p_1, p_2)

Secondo questo modello i termini di correzione Δ_x ed Δ_y che compaiono nelle equazioni di collinearità estese assumono i valori (Equazione 1):

$$\Delta x = -\Delta x_0 + \frac{\Delta c}{c}\bar{x} + \bar{x}S_x + \bar{y}A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)\bar{x} + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y}$$

$$\Delta y = -\Delta y_0 + \frac{\Delta c}{c}\bar{y} + \bar{x}A + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)\bar{y} + 2p_1\bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2)$$

$$con: \quad \bar{x} = x - x_0\,, \quad \bar{y} = y - y_0 \; e \;\; r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$$

Tutti i termini di queste equazioni possono essere attribuiti ad errori dovuti a cause fisiche reali, per questo il sistema prende il nome di "modello fisico".

Risolvere una *Self-Calibration* con *Bundle adjustment* significa stimare i parametri addizionali nelle equazioni e contemporaneamente i parametri di orientamento esterno di ogni immagine e le coordinate oggetto dei punti per mezzo della collimazione di un certo numero di punti omologhi in tutte le immagini. Anche se Brown indica 10 APs, oggi non tutti questi parametri vengono considerati perché modellano errori che si possono assumere assenti o comunque irrilevanti (soprattutto nell'era digitale). Tra questi, ad esempio, non verrà considerato lo *skew factor* S_x, perché i sensori digitali moderni presentano alla nascita un rapporto tra i lati pari ad 1:1 (ovvero il *form factor* del pixel è quadrato). Prove svolte con diversi software confermano che il fattore *Sx* è praticamente ininfluente ed in certi casi il suo utilizzo

potrebbe addirittura portare ad una *sovra–parametrizzazione* con conseguente diminuzione dell'accuratezza.

4. La calibrazione in laboratorio

Per ottenere i parametri di orientamento interno è stata eseguita la procedura di calibrazione in laboratorio ed in condizioni controllate. La fase ha preso il via sfruttando il software *GML C++ Camera Calibration*, sfruttando scacchiere di *pattern* regolari di varie dimensioni ma sempre costituite da quadrati con lati di 30 mm. I *pattern* vengono posizionati su superfici rigide in quanto un eventuale deformazione della scacchiera verrebbe corretta dal software come se si trattasse di deformazione dell'ottica e quindi verrebbero restituiti coefficienti di correzione errati, introducendo nuove deformazioni invece che eliminare quelle presenti (Vezhnevets *et alii*, 2011).

Per un'accurata calibrazione con *GML* è necessario scattare le fotografie seguendo un metodo abbastanza preciso e rispettare rigorosamente alcune condizioni: le celle dei *pattern* non devono presentare eccessive zone d'ombra, evitare il micro mosso e la presenza di pixel ambigui (utilizzando cavalletto, flash e tempi veloci), la scacchiera deve riempiere tutto il fotogramma: le distorsioni interessano principalmente le aree più esterne del fotogramma, le immagini devono essere scattate da tutte le posizioni e con tutti gli orientamenti possibili mantenendo fisso l'angolo tra piano del sensore e piano del *pattern*.

Importanti aspetti da tenere in considerazione sono (Remondino & Fraser, 2006, pp. 266-272): l'aumento della convergenza tra immagini porta ad un aumento dell'accuratezza della calibrazione, è necessario disporre di immagini scattate a diverse distanze, cercando per quanto possibile di presentare più variazioni di scala nell'immagine e tra le immagini. Si deve evitare il più possibile la co-planarità.

In laboratorio sono stati scattati 2 set di immagini. Un primo set utilizzando due griglie su piani differenti, mentre il secondo utilizzando la griglia di dimensioni maggiori (15x16) con cui, riuscendo a coprire tutto il fotogramma si prevede, in teoria, di ottenere risultati migliori. Scattando alcune immagini a scale diverse, mediante variazione della distanza tra griglia e fotocamera si risolve il problema della co-planarità. In totale vengono scattate 46 fotografie per il primo set, e 55 fotografie per il secondo (comprendendo le variazione di scala e le rotazioni di 90° della camera). Scattate le immagini vengono caricate sfruttando la procedura standard di GML Camera Calibration.

In GML, si inseriscono tutte le immagini del primo set, impostando come *Detection Method* il *Combined* e come *Calibration Type* il *New Method*, che fornisce i risultati come proposto da Zhang (2000). Avviando la *corner detection*, che per le 44 immagini utilizzate dura 8 minuti e 11 secondi (Dual Core 1.7 GHz ed 1 GB di RAM), il software mostra, con colori diversi, tutti i punti rilevati su tutte le foto (Figura 1). È sempre consigliato un ceck manuale.

Terminato il processo per entrambi i set, come previsto il secondo set presenta errori molto più bassi rispetto alla calibrazione precedente, anche di un ordine di grandezza nel caso della distorsione (con riferimento essenzialmente ai parametri di incertezza più che ai valori in sé). Infatti, la scacchiera più grande ed il maggior numero di variazioni di scala hanno permesso di avere un maggior numero di punti noti ottimali per l'effettuazione dei calcoli necessari (Figura 2).

Terminati i necessari perfezionamenti vengono restituiti i parametri di calibrazione, dove la lunghezza focale è restituita come vettore scomposto nelle componenti x e y, il PP come posizione assoluta relativa al pixel [0,0] e la distorsione secondo i coefficienti nel formato $[k_1\ k_2\ p_1\ p_2]$, il tutto affiancato dalla stima dell'incertezza.

La notazione della matrice relativa alla *camera matrix*, una matrice quadra 3x3, per semplificazione grafica è riportata in forma linearizzata, in cui la seconda e la terza riga seguono la prima, tra di loro separate mediante il simbolo "; ":

Focal Leght: [3004.060 3006.058] + [0.401 0.382]

Principal Point: [1937.727 1350.062] + [0.420 0.475]

Distortions: [-0.111351 0.049320 0.001153 -0.000112] + [0.000683 0.003979 0.000035 0.000038]

Camera Matrix: [3004.060 0 1937.727; 0 3006.058 1350.062; 0 0 1]

Pixel Error : [0.55 0.56]

FIGURA 1 – Punti rilevati da GML sulle scacchiere di calibrazione

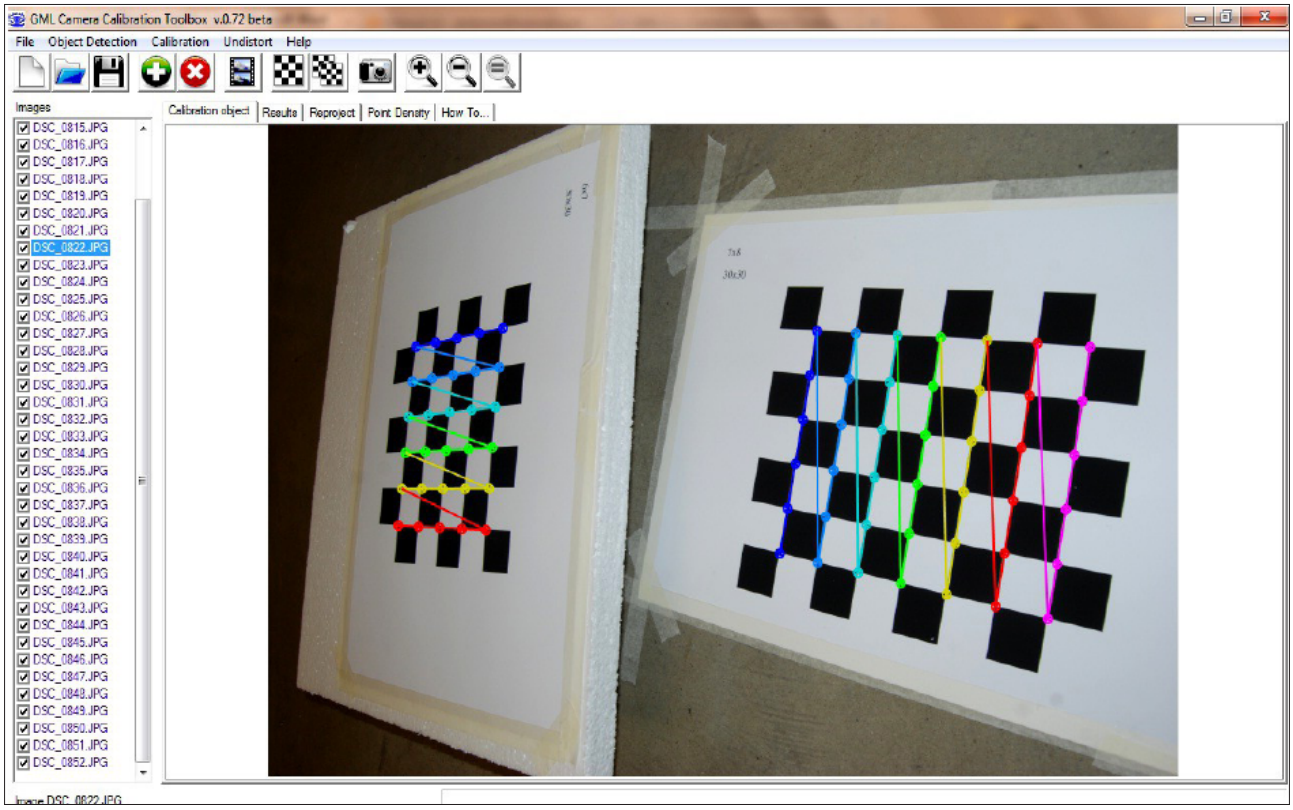


FIGURA 2 – Posizione dei centri di presa dei fotogrammi di calibrazione

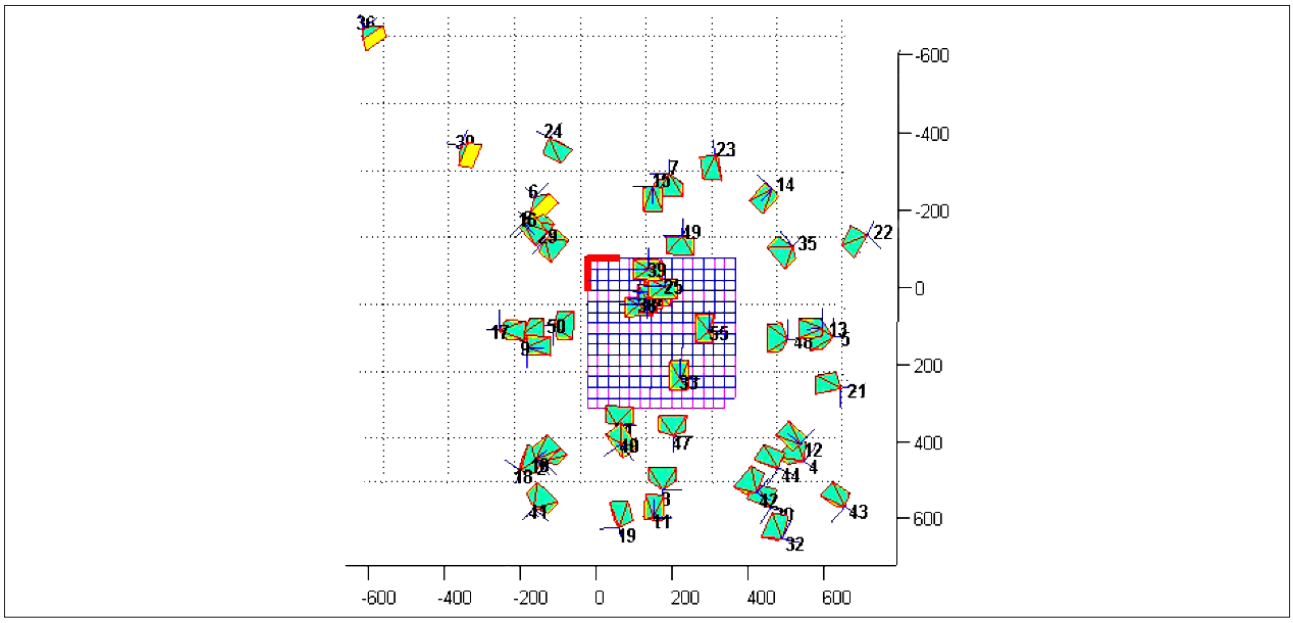
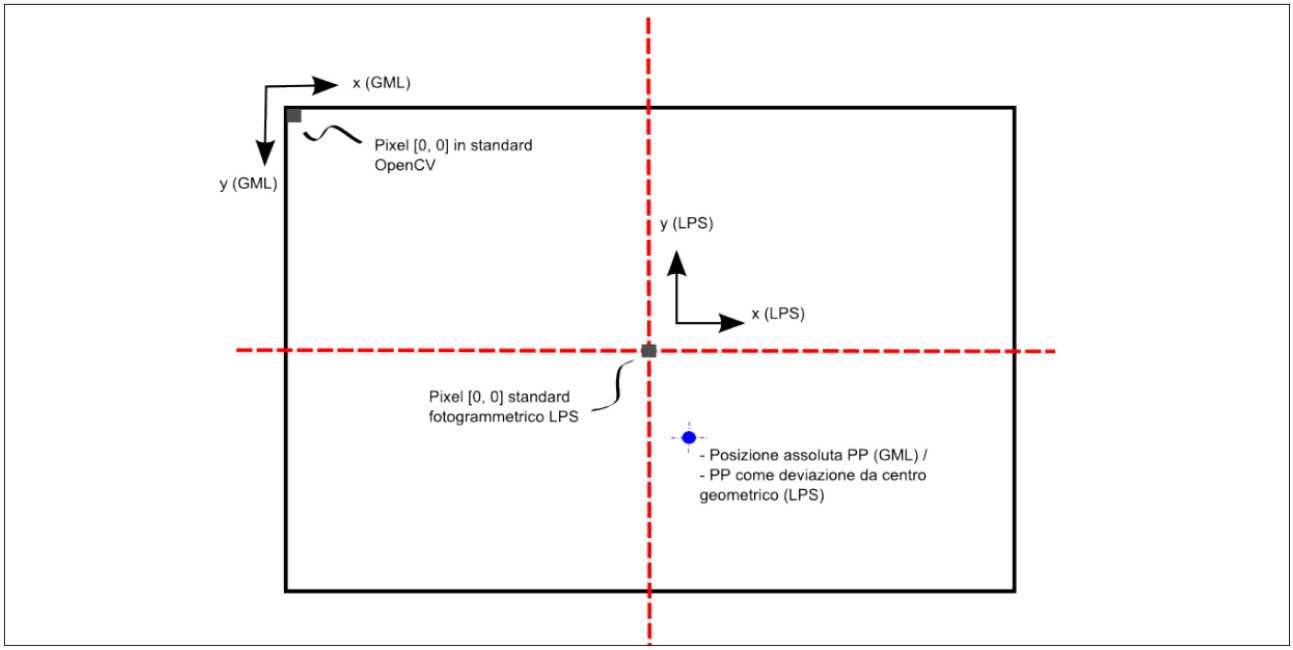


FIGURA 3 – Termini di conversione GML/LPS



Sulla base di quanto ottenuto, per cercare una conferma quantitativa dei risultati della calibrazione, questa è stata ri-effettua, utilizzando le stesse immagini ed un software alternativo, in questo caso FAUCCAL: scritto in codice MATLAB, presso il Laboratorio di Fotogrammetria della National Technical University of Athens da Douskos et alii (Douskos *et alii*, 2009). Si imposta inoltre la *Type of Distorsion* come *Ground-based*, come gli autori consigliano di fare nel caso della fotogrammetria digitale (Hartley & Zisserman, 2000). I risutlati ottenuti vengono confrontati con i precedenti: al netto degli errori calcolati e necessarie conversioni di notazione per alcuni parametri, i risultati di entrambi gli applicativi sono coincidenti. La scelta di GML come software di lavoro è dovuta essenzialmente all'esistenza nativa di una versione stand-alone, alla maggior velocità computazionale, automazione ed al facile accesso per un eventuale modifica del codice senza l'uso di ambienti di sviluppo gravati da licenze proprietarie (MATLAB).

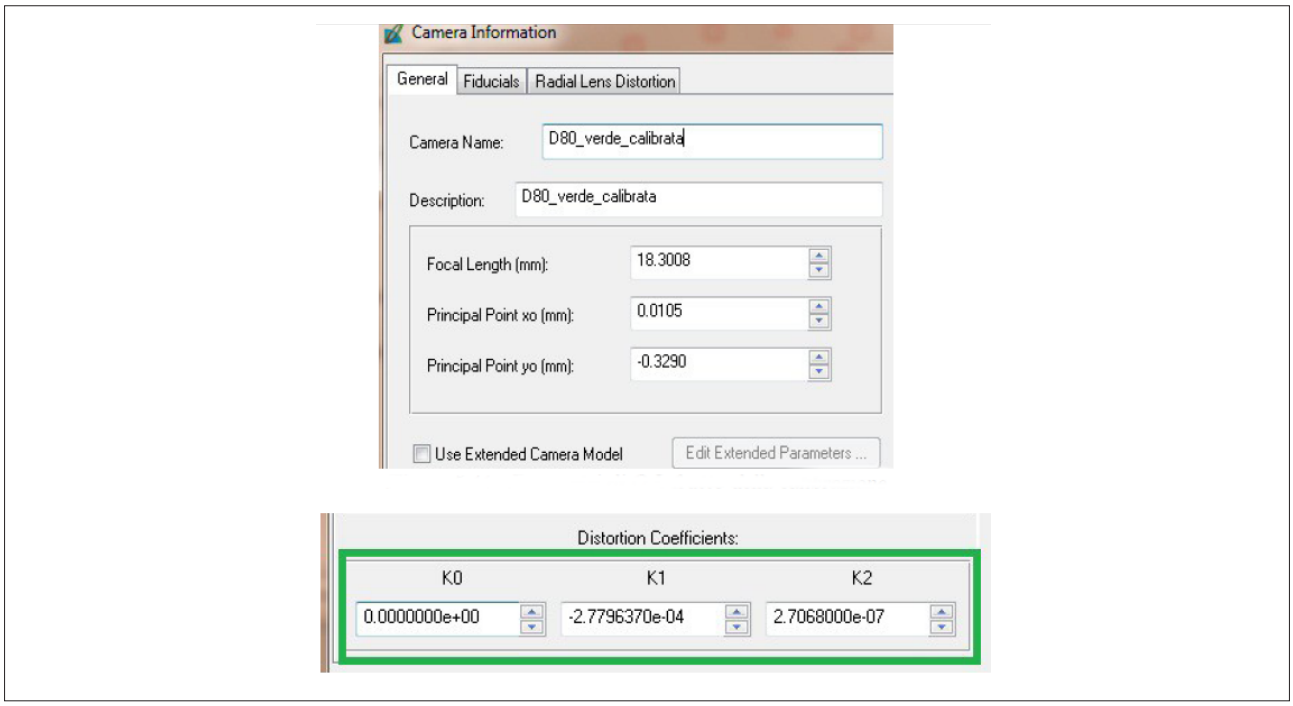
Il formato dati ottenuto da GML non è direttamente compatibile con la notazione utilizzata da ERDAS/LPS 2010, il software scelto per portare a termine il progetto, per cui alcune conversione sono state effettuate per ottenere la *camera matrix* in formato LPS (Figura 3, Equazione 2):

$$CM(LPS) = \begin{bmatrix} 18.3008 & 0 & 0.0105 \\ 0 & 18.3008 & -0.329 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sfruttando i parametri relativi al sensore e utilizzando una procedura di triangolazione re-iterativa con la quale LPS permette di considerare un modello con parametri addizionali. Per questo lavoro viene usato il modello *Lens Distortion Model (2),* progettato espressamente per la SCBA di camere amatoriali. I parametri k_1 e k_2 vengono progressivamente raffinati fino ad ottenere un deciso miglioramento dell' RMSE sfruttando una serie di equazioni (Lps, Erdas, 2009, pp. 355-362), fermandosi nel momento che si presenta una sovra-correzione e quindi un inversione di tendenza nella diminuzione dell'RMSE.

La procedura termina con la creazione di un file .cam, contenente tutte le informazioni di calibrazione nella notazione LPS (*Focal Lenght*, pp_x, pp_y, k0, k1, k2), da utilizzare durante tutte le successive fasi di orientamento dei fotogrammi. K0 è posto pari a zero (Lps, Erdas, 2009, pp. 379-283) perché essendo K0 un para-

FIGURA 4 – Paramtri di calibrazione in formato LPS



metro strettamente correlato alla focale, il suo effetto, che nella pratica è uguale alla variazione di *c*, viene implicitamente ricompreso nella focale corretta (Figura 4).

Per rendere l'idea dell' accuratezza raggiunta, si specifica che l'*RMSE* ottenuto di 0.3550, corrisponde ad uno scarto medio di meno di 2.15 *micron* sul sensore. Inoltre, la dimuzione dell'errore tra inizio e fine calibrazione è stata significativa, la diminuzione di RMSE si è stabilizzata a -21.55%.

5. Test di orientamento interno, esterno e creazione di DEM ed ortofoto

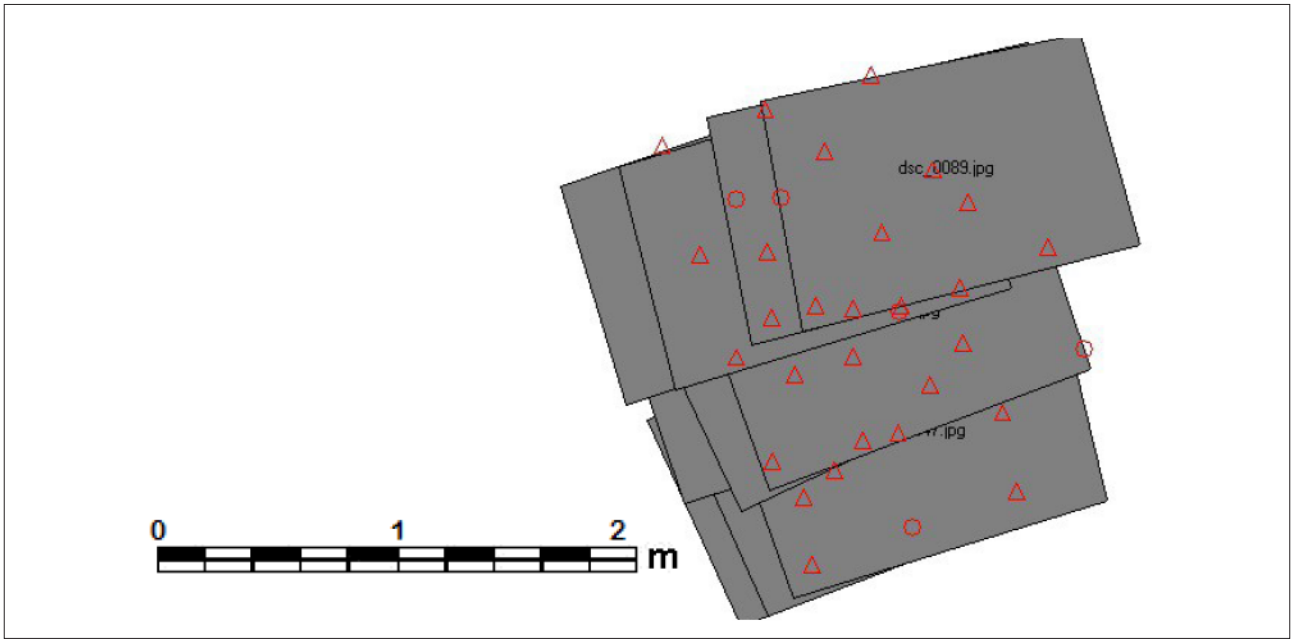
Una volta ottenuti i parametri di calibrazione, è possibile orientare i fotogrammi multi-scala acquisiti in un area test. Per tali fotogrammi è stato eseguito l'O.I. con e senza i coefficienti di calibrazione. Successivamente sono quindi state svolte le procedure di O.E. e produzione di DEM ed ortofoto (a 2 differenti scale di lavoro). In questo modo si vuole verificare dal punto di vista applicativo se, e in che misura, la procedura di calibrazione effettuata influisce sui risultati finali in termini qualitativi. Sono stati acquisiti inizialmente 10 fotogrammi generali in modo da coprire tutta l'area test. Gli scatti sono stati eseguiti mediante 3 strisciate successive orientate WSW-ENE. I fotogrammi di ogni singola strisciata sono stati acquisiti con un andamento W-E lungo un'unica direzione.

I dieci fotogrammi vengono caricati in LPS all'interno di un *block file* in sistema di riferimento locale. A questo blocco viene inizialmente associata una fotocamera non calibrata, utilizzando come unico parametro di orientamento interno il pixel size: 6.09 micron.

Il *block file* sarà orientato posizionando *ground control point* e *ceck point* misurati topograficamente (Figura 5).

Dalla fase di posizionamento dei punti di legame si è iniziato a tenere in considerazione il successivo uso di immagini di dettaglio (a scala maggiore) le cui coordinate dei GCP è stato scelto che dovessero essere estratte da questo set di immagini generali. Come primo passaggio è stata avviata la generazione automatica dei *Tie Point*, in modo da irrobustire il legame all'interno del blocco. A questi punti generati in automatico ne sono stati aggiunti altri manualmente posizionati in luoghi

FIGURA 5 – Block file generale



strategici. In questo modo, eseguita la triangolazione, anche i *Tie Point* potranno fornire le coordinate da utilizzare nelle foto di dettaglio come GCP.

La triangolazione di questo blocco senza i parametri di calibrazione, a seguito di alcuni aggiustamenti manuali su alcuni punti, viene risolta ottenendo un valore di RMSE finale pari a 1.1099 pixel.

Per permettere confronti nelle fasi successive, sulla base dell'orientamento appena eseguito, sono stati generati anche un DEM singolo (passo 1 cm) e delle ortofoto per ogni area di sovrapposizione significativa. Per prevenire errori dati dalle aree esterne delle immagini, l'area di correlazione è stata

ridotta del 5%, mentre i bordi sono stati tagliati del 10%; è stata inoltre generata una immagine di *DEM quality* ("*DTM point status*") utilizzata per i confronti quali-quantitativi successivi.

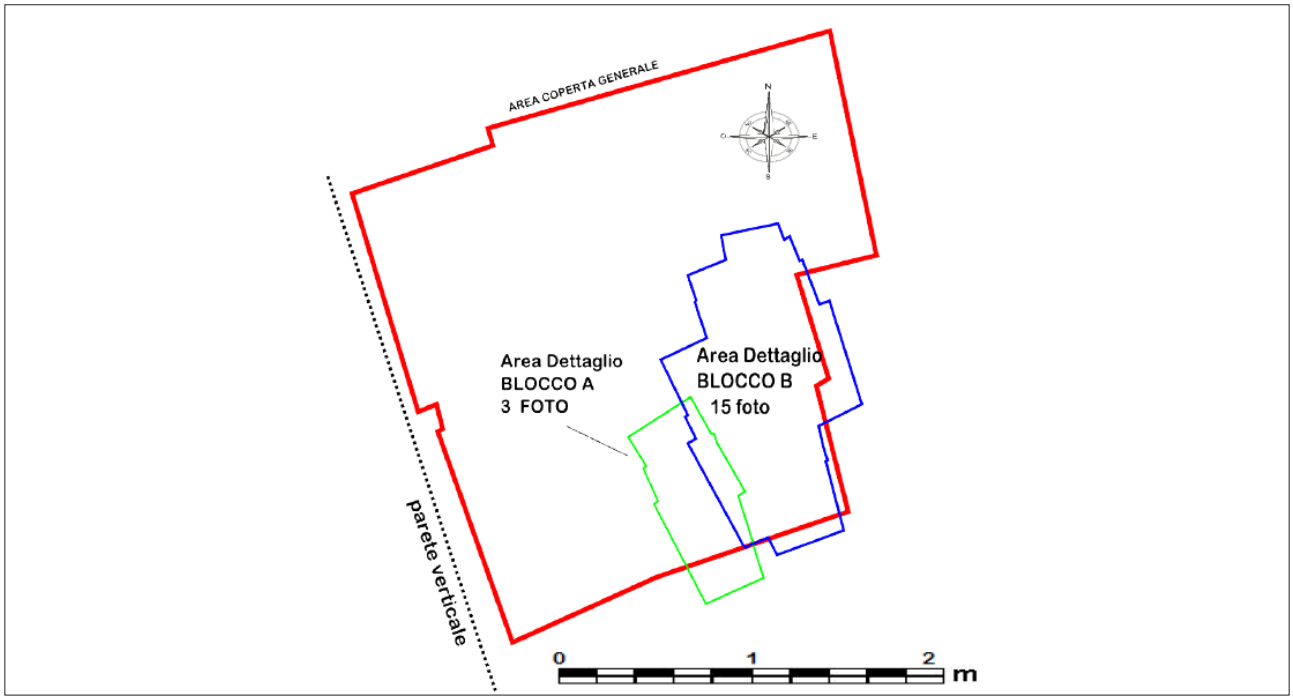
Le ortofoto sono state prodotte con un passo di ricampionamento (mediante interpolazione bilineare) di 2 mm. L'ortorettifica dei singoli file è avvenuta a partire dall'orientamento esterno e dal DEM.

L'intero procedimento è stato ripetuto in toto applicando i parametri di orientamento interno ottenuti con GML e i coefficienti di correzione della distorsione radiale ottenuti nella fase di *self-calibration* con LPS. Al *block file* già creato è stato quindi associato il file .cam salvato durante la calibrazione. Applicati i nuovi parametri relativi al sensore e all'ottica, il file di orientamento caricato perde le informazioni di orientamento esterno a causa della modifica delle coordinate immagine di ogni singolo pixel. Per questo motivo è stato necessario rieffetuare il *budle adjustment* in modo da creare un nuovo legame tra le coordinate immagine e le coordinate terreno mediante le equazioni di collinearità.

La triangolazione aerea è stata effettuata con le stesse impostazioni della fase precedente per rendere i risultati confrontabili. Anche la deviazione standard per i GCP è stata mantenuta pari a 0.01 metri. Osservando l'RMSE (0.9309 pixel) e il *report*, si nota un miglioramento nel risultato della triangolazione rispetto alla precedente con una diminuzione dell'errore generale pari a 0.179 pixel corrispondente, in percentuale, al 16%.

La presa di fotogrammi di dettaglio ha riguardato circa 100 foto scattate ad un metro dal piano di campagna con strisciate di direzione ortogonale rispetto

FIGURA 6 – Posizione dei blocchi di dettaglio rispetto al blocco generale



a quelle del blocco generale. A titolo esemplificativo, sono stati creati due blocchi rispettivamente di 3 e 15 fotogrammi (Figura 6).

Per l'orientamento dei blocchi di dettaglio A e B, si è proceduto seguendo lo schema descritto per il blocco delle immagini generali. Mentre per l'orientamento interno le caratteristiche della fotocamera non calibrata sono state mantenute assolutamente identiche a quelle inserite nella fase precedentemente descritta, per l'orientamento esterno sono stati utilizzati come GCP i punti, di coordinate note, estratti come *Tie Point* dal blocco delle foto a piccola scala.

Anche la triangolazione aerea è stata effettuata rispettando i parametri utilizzati precedentemente per il blocco generale non calibrato; la *standard deviation* per i GCP è stata mantenuta pari ad 1 cm e nessun parametro addizionale è stato inserito.

Seguendo lo schema di lavoro fin qui tracciato, a tutti i fotogrammi di dettaglio è stato collegato il file contenente i parametri di orientamento interno.

L'incremento di qualità, anche questa volta, è notevole: nel caso A corrisponde a 0.2538 pixel (il miglioramento percentuale è del 27%) e si attesta al 32% nel caso B.

6. Risultati e criticità del processo adottato

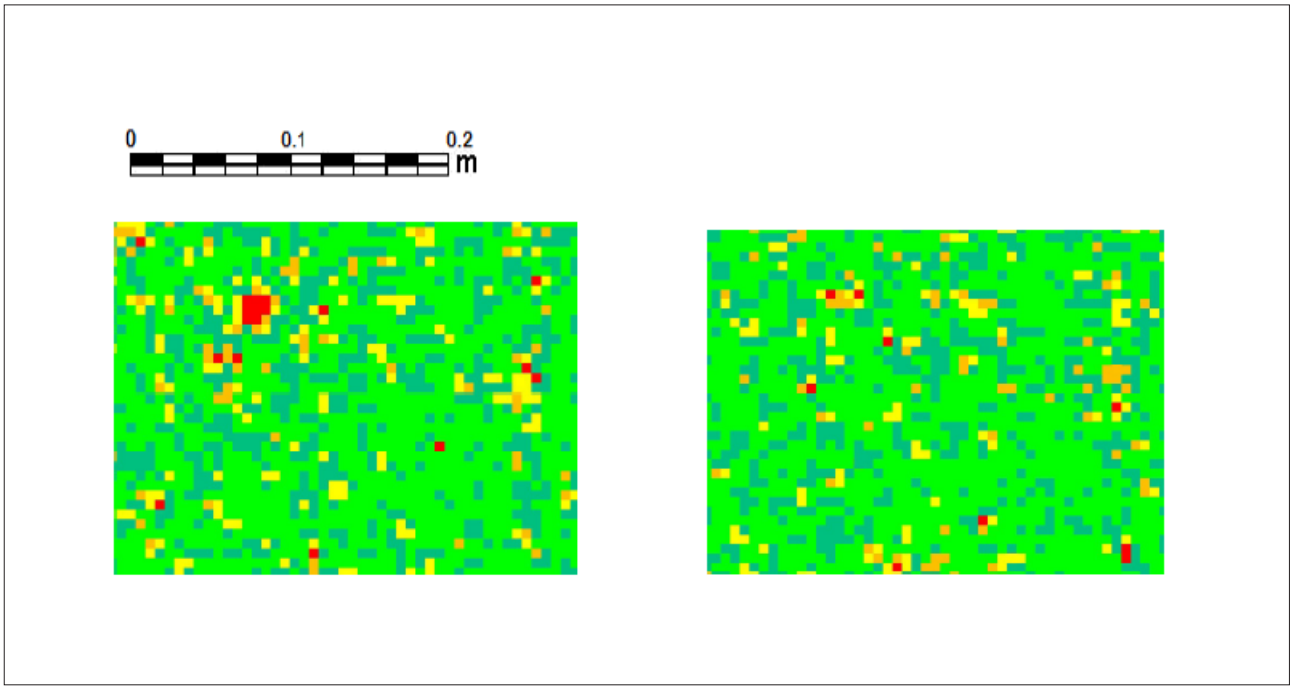
Il confronto dei risultati ottenuti utilizzando o meno la procedura di *self-calibration*, nel caso del blocco generale, ha portato ad una diminuzione dell'errore quadratico medio pari al 16%.

Relativamente agli scarti sui singoli punti misurati si nota una diminuzione per la maggior parte dei GCP e per tutti i *Check Point* dopo la fase di calibrazione.

È importante sottolineare che, se a livello planimetrico per alcuni punti non si hanno apprezzabili diminuzioni dello scarto, per quanto riguarda la quota si ha un miglioramento generalizzato, con scarti che diminuiscono anche di 2 ordini di grandezza.

Dai report si osserva che la media degli RMSE (scomposta per X, Y e Z) per i GCP diminuisce fino ad 1 ordine di grandezza su Z, mentre per i *Check Point* (CP) si dimezza in Z e rimane circa stabile sul piano x-y.

FIGURA 7 – DEM quality pre e post calibrazione



Il blocco A, quello composto da 3 fotografie di dettaglio, presenta anch'esso una sensibile diminuzione dell'errore (da 0.9378 a 0.6840 px). Il miglioramento dell'RMSE dopo la calibrazione, per il blocco A, si attesta al 27 %. Stessa diminuzione dell'RMSE totale trova conferma anche nel blocco di dettaglio B composto da 15 fotografie (da 1.0179 a 0.6963 px) con un miglioramento, in percentuale del 32%.

Il metodo scelto per la stima quantitativa della qualità dei DEM realizzati in automatico, con e senza il processo di calibrazione, si basa su un'analisi delle immagini di *DEM quality* ottenute durante l'estrazione ed effettuata attraverso il software GIS, ESRI™ ArcMap.

I pixel considerati *Excellent* hanno un coefficiente di correlazione compreso tra 1 e 0.85, quelli indicati come *Good* hanno coefficiente tra 0.85 e 0.7. I *Fairs* sono compresi tra 0.7 e 0.5, mentre i punti del modello che non presentano dei punti immediatamente vicini sono considerati *Isolated*. I pixel vengono invece classificati come *Souspicius* quando il risultato della sottrazione tra il valore noto e quello ricalcolato da una convoluzione con una maschera 3x3 è più elevato di 3 volte la *standard deviation* delle celle adiacenti (Leica Geosystem Geospatial Imaging, 2006).

Ad un primo livello visivo-qualitativo (Figura 7) si vede una diminuzione delle celle considerate *Souspicius* nel DEM creato in seguito alla calibrazione della fotocamera ed un aumento di quelle classificate come *Excellent* in alcune aree centrali. Per quantificare queste differenze si ricorre alle tabelle degli attributi.

La calibrazione della fotocamera ha comportato un aumento delle aree classificate come *Excellent* e *Good* pari 5% e al 3% rispettivamente. Di contro l'aumento delle aree *Fairs*, *Isolated* e *Souspicius* è stato rispettivamente del 7%, del 15% e del 28%. Questo è successo perché la correzione della distorsione a barilotto ha comportato una distensione dei punti dell'immagine che prima tendevano a convergere verso il centro della stessa. I punti individuati dal matching sono di più, meglio distribuiti e con migliore qualità. Le immagini diventano però più grandi (come confermato dalla somma dei valori del campo "*count*", 175648 contro 183140, +4%) e ai bordi le aree classificate con maggiore incertezza aumentano. È comunque da considerare che la somma

delle aree classificate come *Excellent* e *Good* corrisponde all'88% del totale prima e dopo la calibrazione della fotocamera. Il DEM generato è quindi considerabile di buona qualità e la correzione delle deformazioni geometriche della fotocamera adoperata ha comportato un miglioramento, seppur minimo, dei pixel classificati come *Excellent* e *Good*.

Nel modello di elevazione ottenuto dal blocco di dettaglio A, anche le celle *Souspicius* diminuiscono di 19 unità, mentre le celle *Excellent* e *Good* aumentano rispettivamente dell' 8.27% e del 5.74%.

Meritano una considerazione anche le singole celle di bassa qualità (*fair*, *isolated* e *souspicius*) sparse anche in alcune zone centrali: esse non sono dovute a coordinate errate della cella ma piuttosto ad errori dell'interpolatore che potrebbero essere corretti attraverso l'editing manuale in stereoscopia dei punti estratti (strada che permette di ottenere la massima accuratezza ma che richiede molto tempo ed hardware adatto), oppure, come in questo lavoro, attraverso l'applicazione di un filtro di convoluzione spaziale di tipo passa-basso con finestra mobile 3x3, che elimina le variazioni ad alta frequenza e quindi i passaggi bruschi tra celle, mantenendo però le forme. Il filtro ha effettuato essenzialmente uno *smoothing* del DEM ottenuto dal processo di *Automatic Terrain Extraction* da cui sono state successivamente prodotte le ortofoto.

Nonostante, nel caso del blocco B, l'acquisizione dei fotogrammi non sia stata perfetta (orientamento della fotocamera molto variabile) e la localizzazione di questo blocco agli estremi del blocco generale (con la conseguente diminuzione di accuratezza dei *Tie Point* derivati dal blocco generale ed utilizzati come GCP nell'orientamento esterno di quelli di dettaglio) si conferma un aumento delle celle *Excellent* dell'8.41%.

Molte delle celle *Souspicius* sono localizzate agli estremi dell'area di lavoro, e quindi all'esterno dell'area in cui sono stati misurati i GCP originali. I punti estratti indicano un coefficiente di correlazione superiore alla soglia (0.85 in questo caso) e l'aumento del loro numero totale è sinonimo, a parità di caratteristiche radiometriche, di un orientamento più accurato (Tabella 1).

Per analizzare la qualità delle ortofoto prodotte, si sono disegnati dei vettori spostamento relativi ai punti misurati per il blocco di immagini generali e per una parte significativa dei punti estratti come *Tie Point* per i blocchi di dettaglio A e B, in considerazione dell'esiguo numero di GCP disponibili per le foto di grande scala. L'analisi è stata effettuata con l'ausilio di ESRI™ ArcMap.

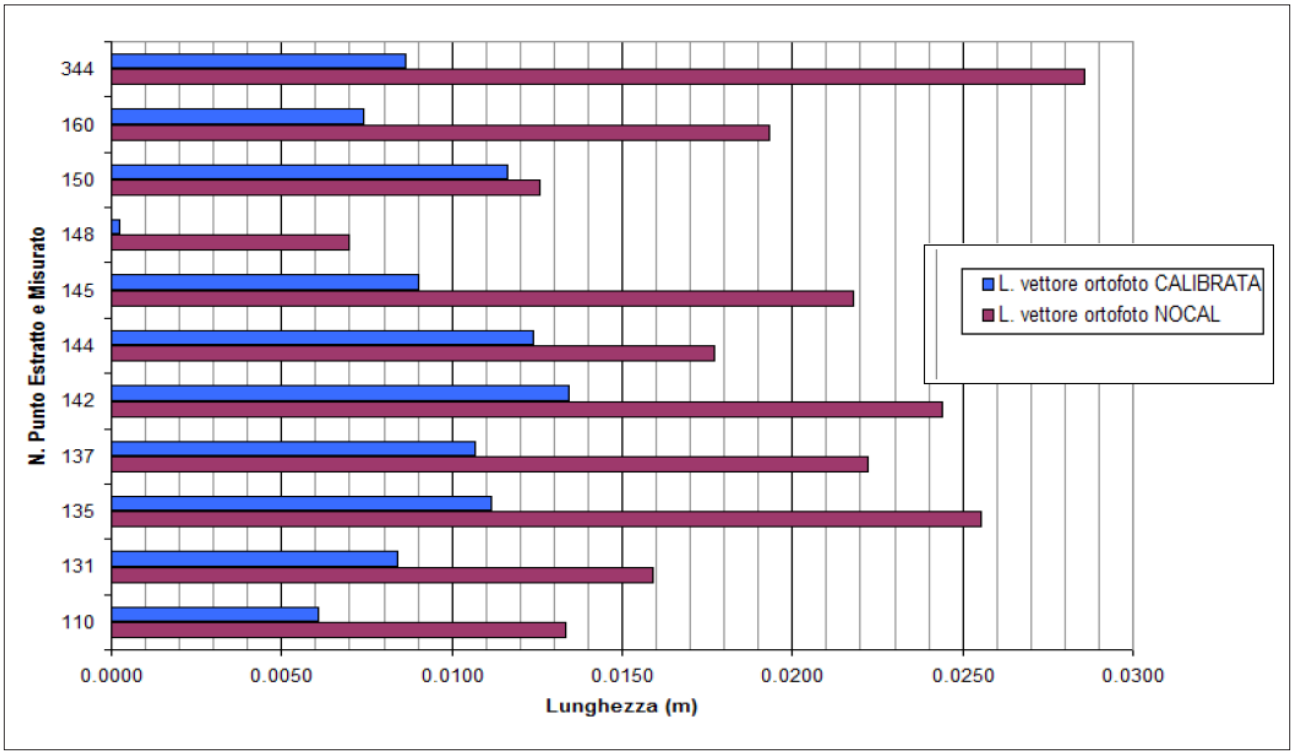
L'analisi è stata pertanto effettuata confrontando i vettori-spostamento tra la posizione reale dei GCP, e quella misurabile sulle ortofoto ottenute con e senza calibrazione della fotocamera. I GCP misurati e la loro posizione sulle ortofoto sono stati collegati con dei vettori mediante una *feature class* lineare, dove ad ogni linea sono stati associati tre attributi: il GCP di riferimento, il tipo di ortofoto (calibrata o non calibrata) e la *SHAPE_lenght*, ovvero il modulo del vettore, necessario ad effettuare i confronti.

Per tutti i GCP che ricadono all'interno dell'area del blocco generale, i vettori spostamento dopo la calibrazione presentano un modulo minore rispetto al vettore prima della calibrazione, indicando una maggior vi-

Tabella 1 – Confronto tra numero di punti 3d

Delta dei punti 3D estratti prima e dopo la SCBA			
Blocco	N. punti pre-cal	N. punti post-cal	Delta
Generale	125.856	128.516	+ 2.1 %
A	8.603	9.852	+ 14.5 %
B	52.511	55.241	+ 5.2 %

FIGURA 8 – Confronto tra la lunghezza dei vettori spostamento nel caso del blocco B



cinanza tra coordinate reali e coordinate calcolate. In base a questa considerazione l'ortofoto prodotta dopo la calibrazione della fotocamera presenta una maggiore vicinanza alla realtà. La diminuzione media dei vettori spostamento è pari al 28.47%.

È stato applicato lo stesso procedimento anche ai *block file* di dettaglio A e B, con la differenza, come anticipato, che i GCP di riferimento non sono stati misurati, ma ottenuti dall'estrazione dei *Tie Point* dal *general block file*.

La diminuzione media del modulo dei vettori-spostamento risulta essere del 36.5% per A.

Nel caso del blocco B, dato l'elevato numero di punti estratti in quest'area, sono stati utilizzati per il confronto solo una parte dei punti di appoggio utilizzati, in modo da non appesantire inutilmente la restituzione grafica; il numero di punti analizzati è comunque superiore al 25% di quelli utilizzati nella triangolazione aerea. Per questo motivo si è cercato di analizzare punti ben distribuiti spazialmente nel blocco, sia nelle aree centrali sia in quelle periferiche di ogni ortofoto.

Anche per il blocco di dettaglio B, il modulo di tutti i vettori-spostamento diminuisce in modo significativo quando misurati su ortofoto prodotte dopo la *camera calibration*. La diminuzione percentuale di lunghezza si attesta in quest'ultimo caso ad un valore medio del 52.59% (Figura 8).

La difficoltà principale incontrata nella fase della calibrazione risiede nelle differenti e molteplici notazioni ed equazioni che modellano la distorsione. Una prima differenza si evidenzia nel diverso approccio che presentano software sviluppati in origine per usi differenti. Infatti, se le stazioni fotogrammetriche digitali utilizzano coefficienti di correzione puri, i software che nascono per la *Computer Vision*, o in generale per l'ingegneria, presentano i coefficienti di distorsione normalizzati.

Il tentativo di passare tra una notazione e l'altra si scontra con la non esaustiva descrizione dei processi in-

terni impiegati dai software commerciali. Questa scarsità di documentazione è stata fortunatamente bilanciata dell'estrema cura con cui vengono descritti i *software open-source* (come GML e FAUCCAL, impiegati in questo lavoro), mediante i quali, attraverso opportune conversioni e con l'utilizzo congiunto di modalità avanzate di SCBA messe a disposizione da LPS, è stato possibile giungere ad una calibrazione soddisfacente senza la necessità di rivolgersi a costosi software di *camera calibration* aggiuntivi.

L'approccio multi-scala nella presa e orientamento dei fotogrammi si è dimostrato efficace e affidabile anche se qualche maggiore accortezza deve essere considerata preventivamente nella fase di presa.

Se l'orientamento del *block file* generale è giunto al termine senza particolari problemi, qualche difficoltà la si è riscontrata lavorando con i 2 block file di dettaglio. La prima difficoltà nasce nella fase di estrazione dei *Tie Point* dal blocco generale per essere utilizzati come GCP in quelli di dettaglio. Infatti, non tutti i punti notevoli in un blocco, erano evidenti anche negli altri 2. Questo è dovuto allo spostamento delle ombre, alla diversa prospettiva e al diverso orientamento della camera da presa. Il lavoro che si va a compiere è di principio valido, ma si deve considerare di disporre di un set di GCP sufficientemente ampio da permettere la TA dei blocchi di dettaglio, nei quali se ne possono riconoscere e utilizzare molti meno.

Quando i *Tie Point* rilevati dal blocco generale divengono GCP in quelli di dettaglio, è apparsa subito evidente l'impossibilità di creare un unico *block file*, non a causa della scarsa accuratezza dei punti, ma piuttosto della grande disomogeneità di orientamento con cui sono state scattate le immagini di dettaglio.

7. Osservazioni

I risultati di laboratorio hanno confermato l'utilizzabilità di tecniche multi-scala nella fotogrammetria dei vicini. Le accuratezze raggiunte nel *bundle adjustment* e nei prodotti ottenuti dai 2 blocchi di dettaglio, dimostrano che il processo di estrazione di *Tie Point* da immagini a piccola scala, con l'obiettivo di utilizzarli come *Ground Control Point* in immagini a scala più grande, rappresenta una buona soluzione per velocizzare l'acquisizione di coordinate in campagna, oltre che essere un modo veloce ed accessibile per disporre di un elevato numero di punti di coordinate terreno note in aree di modesta estensione, o di difficile accesso, ma con un elevato numero di dettagli da acquisire e restituire.

Durante tutti i passaggi che hanno accompagnato l'orientamento e la produzione di DEM e ortofoto multi-scala, positiva è stata l'influenza che il processo di *self-calibration* della fotocamera ha apportato ai risultati finali.

Infatti, si è dimostrato come gli orientamenti e i prodotti derivati senza e con l'utilizzo dei parametri di correzione, ottenuti dall'integrazione tra GML ed ERDAS/LPS, siano molto differenti a qualunque scala di lavoro. Durante la fase di triangolazione, l'RMSE generale tende sempre a diminuire in modo significativo quando si applicano i coefficienti di calibrazione della fotocamera.

Nella creazione automatica dei DEM in formato *raster*, a fronte di minimi aumenti di celle con bassa correlazione ai bordi dei blocchi fotogrammetrici, in aree che prima della calibrazione non venivano neppure estratte, si assiste ad un generale aumento di celle considerate di qualità *Excellent* e *Good*. La generazione degli stessi modelli di elevazione, in formato ESRI™ 3D *Shape*, conferma l'aumento di qualità generale quando si lavora con camera calibrata. Dopo la calibrazione, infatti, l'interpolatore riesce ad estrarre una nuvola di punti corretta e formata da un numero maggiore di elementi.

L'analisi dei vettori-spostamento, misurati sulle ortofoto ottenute al termine del processo fotogrammetrico, evidenzia come dopo la *self-calibration* le coordinate di punti calcolate a partire dai pixel che compongono le ortofoto sono molto più prossime a quelle misurate. I vettori spostamento tra punto misurato e punto calcolato hanno sempre modulo minore quando disegnati sopra ortofoto con immagini calibrate; lo scarto tra correzione geometrica dell'immagine e realtà misurata è, quindi, sempre minore.

La fase di calibrazione, importante in qualsiasi lavoro di fotogrammetria dei vicini, diviene essenziale quando la TA si basa su punti estratti con tecniche multi-scala e diviene proporzionalmente più importante con l'aumento di dettaglio delle immagini e la diminuzione dell'altezza di volo (la distorsione radiale, a bari-

lotto in questo caso, ha effetti sempre maggiori con la diminuzione della lunghezza focale dell'obiettivo).

Questo è provato dal fatto che, se nel *block file* generale la diminuzione dell'RMSE si ferma ad un pur ottimo 16%, nel blocco di dettaglio B arriva quasi al 33%. Lo stesso incremento si riscontra anche per DEM ed ortofoto, in cui si passa rispettivamente da un miglioramento del 2% al 14.5% e dal 28% a quasi il 53%.

8. Nota

Il lavoro presentato in questo articolo è tratto dal percorso di tesi magistrale dell'autore, svolta presso il Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena (San Giovanni Valdarno, AR) tra il 2012 ed il 2013. La versione completa della tesi è archiviata al seguente link: http://goo.gl/GzgujP.

Bibliografia

ABDEL-AZIZ Y. I. & KARARA H. M. (1971) – Direct linear transformation: From comparator coordinates into objects coordinated in close-range photogrammetry, "Symposium on close-range photogrammetry", 1-19-1971. Falls Church, VA. American Society of Photogrammetry.

BOUGET, J. Y. (2010) – Camera Calibration Toolbox for Matlab®. [online] Disponibile a: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html [Ultimo accesso 11 aprile 2013].

BRADSKY G. (2000) – The OpenCV Library,"Doctor Dobbs Journal", 25(11), 120-126. Miller Freeman Inc., San Francisco, USA.

BROWN D. C. (1971) – Close-range camera calibration, "Photogrammetric Engineering", Vol. 37(8), pp. 855-866.

DXO LABS (2012) – Guida alla lettura delle informazioni del Camera Sensor Database e del Lens Database, DxO Marks, Boulogne-Billancourt, Francia, [online], Disponibile a: http://www.dxomark.com/index.php/About/In-depth-measurements/ [Ultimo accesso: 7 aprile 2013].

DOUSKOS V., GRAMMATIKOPOULOS L., KALISPERKIS I., KARRAS G. & PETSA E. (2009) – FAUCCAL: An open source toolbox for fully automatic camera calibration, "XXII CIPA Symposium on Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage", Kyoto, Japan.

ERDAS (2010) – ERDAS Field Guide™, Erdas Inc., Norcross, USA.

GIRELLI V. A. (2007) – Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali. "Tesi di dottorato", Università di Bologna.

GOMARASCA M. (2004) – Elementi di geomatica. Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT) Edizioni, Milano, Italy, 618 pp.

GRÜN A. & BEYER H. A. (2001). System calibration through self-calibration. "Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision", pp. 163-193. Springer, Berlin Heidelberg.

HABIB A. F., MORGAN M. & LEE, Y. R. (2002) – Bundle adjustment with self calibration using straight lines, "The Photogrammetric Record", 17(100), 635-650, Blackwell Publishing & Remote Sensing and Photogrammetric Society [Disponibile presso *Wiley online library*. Ultimo accesso 30 marzo 2013]

HARTLEY R. I. & ZISSERMAN A. (2000) – Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

LEICA GEOSYSTEM GEOSPATIAL IMAGING (2006) – Leica Photogrammetry Suite Automatic Terrain Extraction, Norcross, USA.

LPS, ERDAS (2009) – LPS 2010 Project Manual, Intergraph Corporation, Madison, USA, pp. 355-362 e 379-383.

MCGLONE J. C. (Ed.) (2013) – Manual of photogrammetry, American Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, USA.

REMONDINO F. & FRASER C. (2006) – Digital camera calibration methods: considerations and comparisons "International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences", 36(5), 266-272, Dresden, Germany.

SANSONI G. (2006) – Misure ottiche. Modelli di telecamere che tengono conto delle distorsioni. Laboratory of Optoelectronics, Università di Brescia. [online] Disponibile a: www.optolab-bs.it/VISIONE_3D/Modelli_con_distorsioni.pdf [Ultimo accesso: 30 marzo 2013].

TSAI R. (1987) – A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, "Robotics and Automation, IEEE Journal of", 3(4), 323-344.

VEZHNEVETS V., CHETVERIKOV N. VELIZHEV A. & YAKUBENKO A. (2011) – GML C++ camera calibration toolbox 0.73b. [online] Disponibile a: http://graphics.cs.msu.ru/en/node/909 [Ultimo accesso: 11 aprile 2013]

ZHANG Z. (1999) – Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations, "Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference", Vol. 1, pp. 666-673. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.

ZHANG Z. (2000) – A flexible new technique for camera calibration, "Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions", 22(11), pp. 1330-1334. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA.