

CONSIDERAZIONI SUGLI ERRORI NEL CALCOLO DELLA GEOREFERENZIAZIONE DIRETTA: INTERPOLAZIONE DEL DEM E CONTRODISTORSIONE DELL'OTTICA

Botond RÁDULY (*) (**), Claudio BELLI (***), Dario PAPALE (*)

(*) DISAFRI, Università degli Studi della Tuscia – Viterbo, Via San Camillo de Lellis SNC, 01100 Viterbo (VT), Italia,
tel: 0761357251 , fax, 0761357389 email: raduly@unitus.it; darpap@unitus.it

(**) Dept. of Tech. and Natural Sciences, Sapientia Hungarian University of Transylvania, Piata Libertatii nr.1,
530104 Miercurea Ciuc, HR, Romania, tel: (+40) 266 317121, fax: (+40) 266 372099,
email: radulybotond@sapientia.siculorum.ro

(***) Terrasystem S.r.l., via Pacinotti, 5 01100 Viterbo, Italia, tel: 0761250626; email: c.belli@terrasystem.it

Riassunto

La georeferenziazione diretta (DG) delle immagini telerilevate da piattaforma aerea viene effettuata calcolando la posizione esatta dell'area ripresa da ogni pixel, usando le equazioni di collinearità. Gli input sono dati dai parametri di orientamento esterno ed interno del sensore nel momento della ripresa ed il DEM della zona fotografata. In teoria, dato un set di input, il calcolo di DG dovrebbe portare ad un'unica soluzione. In pratica però, diversi software capaci di fare DG ortoproiettano immagini leggermente diverse tra loro. Lo sfalsamento è dell'ordine di qualche pixel e non costante all'interno delle immagini. Questo lavoro dimostra che tali sfalsamenti sono dovuti a diversi metodi di interpolazione del DEM. Immagini processate con diversi software di DG sono state comparate al fine di mettere in evidenza le differenze geometriche. Le prove dimostrano che i software commerciali lavorano con blocchi d'immagine invece di trattare il DEM pixel-by-pixel, causando così una discontinuità matematica al confine dei blocchi d'immagine ed introducendo spostamenti di ordine di qualche pixel.

Abstract

The direct georeferencing (DG) of aerial photographs uses the so called collinearity equations to calculate the position of the area seen by each pixel of the airborne sensor. The input of this calculus are the parameters of internal and external orientation of the sensor, together with the DEM of the photographed area. In theory, for a given set of inputs, the DG calculus should result in an unique solution. In practice, however, different DG software produce slightly different georeferenced images, the difference being of order of few to several pixels usually, not uniformly distributed over the image's area. In this work the source of the above mentioned errors is identified as being the interpolation method of the DEM. Images processed with three different DG-capable software are compared in order to show the geometrical differences. The results show that commercial software work with image blocks instead of pixel-by-pixel processing, introducing mathematical discontinuities at the border of image blocks, and consequently errors.

Georeferenziazione diretta

La DG è una georeferenziazione effettuata direttamente usando informazioni acquisite a bordo del veicolo di volo. Si tratta di un processo complesso che coinvolge acquisizione, sincronizzazione, integrazione e trasformazione dei dati di navigazione, ed il processamento dei dati. Questa catena di operazioni è soggetta a molti errori che poi influiscono sulla qualità globale del processo di DG.

Fattori di questo tipo sono per esempio l'accuratezza delle misurazioni, la determinazione della posizione e degli angoli di rotazione, le caratteristiche dei sensori, etc. L'accuratezza dei parametri di orientamento esterno dipende quindi dalla posizione e sincronizzazione dei sensori, dall'inizializzazione e dalla calibrazione del sistema (Skaloud, 1999; Skaloud 2006). L'imprecisione della DG dovuta a questi fattori e' quindi cosa nota e studiata. Questo lavoro invece considera solamente gli errori di calcolo che possono derivare nella fase di processamento dell'immagine.

Presupponiamo quindi di avere un set di input per il calcolo di DG, composto dai parametri di orientamento interno (distanza focale dell'obiettivo, dimensioni sensore, dimensioni pixel, spostamento punto principale, parametri di distorsione dell'ottica utilizzata), parametri di orientamento esterno (le coordinate X, Y e Z del sensore al momento della presa, insieme agli angoli di rotazione acquisiti tramite un sistema inerziale IMU). Visto che non vengono trattati gli errori di misurazione, considereremo in questo articolo che gli angoli di rotazione siano stati precedentemente convertiti nel formato fotogrammetrico (Ω, Φ, k), così come le coordinate GPS, solitamente acquisite nel sistema di riferimento ECEF, siano state convertite in coordinate UTM (est, nord) (Bäumker and Heimes, 2001). Questo set di parametri è sufficiente per calcolare esattamente le coordinate dell'area a terra ricadente in ciascun pixel del sensore. Per il calcolo si utilizzano le equazioni di collinearità, prima "top-down" per calcolare l'ingombro atteso dell'immagine a quota zero, poi per questo ingombro si applicano le equazioni di collinearità "bottom-up" (equazioni[1],[2]) per ottenere l'ortofoto. Praticamente per l'ingombro atteso si crea una matrice vuota che possiamo considerare come un grigliato poggiato al suolo con una risoluzione geometrica che sarà dipendente dalla quota di volo rispetto alla linea del terreno. Per ogni maglia di questa griglia (pixel) si ricava la quota Z, noto il DEM, poi con le equazioni [1] e [2] si calcola la posizione di ogni maglia sul piano immagine (pixel del sensore). Verificato questo, si attribuisce (secondo diversi metodi di ricampionamento, di solito nearest neighbour, bilinear o bicubic) alla maglia il valore DN del pixel del piano immagine (o della media di un numero di pixel attorno al punto).

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_L) + m_{12}(Y - Y_L) + m_{13}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} + x_0 + x_d \quad [1]$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_L) + m_{22}(Y - Y_L) + m_{23}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} + y_0 + y_d \quad [2]$$

dove: x, y – coordinate pixel
 x₀, y₀ – spostamento punto principale
 x_d, y_d – spostamento dovuto alla correzione dei distorsioni (se conosciuto)
 f – distanza focale della ottica usata
 m₁₁...m₃₃ – elementi della matrice di rotazione (Michail et al., 2001)
 X, Y, Z – coordinate del punto a terra
 X_L, Y_L, Z_L – coordinate del sensore

I parametri x_d ed y_d sono relativi allo spostamento del pixel dovuto alle distorsioni radialisimmetriche e non simmetriche tangenziali dell'ottica utilizzata e non figurano nelle equazioni qualora l'immagine sia già stata corretta per questo tipo di distorsioni (immagine contro distorta).

Differenze geometriche dovuto all'interpolazione del DEM

Visto che il calcolo di DG deriva semplicemente dalla sostituzione dei parametri di entrata nelle equazioni di collinearità applicate in modo iterativo ad ogni pixel, in teoria dato un set di parametri di input come precedentemente descritto, si dovrebbe giungere ad un risultato di calcolo univoco a prescindere dal software utilizzato. In pratica, invece, se si processa un'immagine con diversi

software di DG, utilizzando gli stessi parametri di entrata, si ottiene sempre un'ortofoto geometricamente diversa. Per mettere in evidenza queste differenze, sono state comparate fra di loro immagini ottenute con tre diversi software di georeferenziazione. I tre software utilizzati sono PCI Geomatica 9.1.6 (PCI Geomatics), Z-map 3.5.5.0 (Mencisoftware) ed il terzo sviluppato nell'ambito del progetto CET-DOCUP promosso dal DISAFRI, Università degli Studi di Tuscia dedicato al processamento delle immagini multispettrali del nuovo sensore aereo multispettrale ASPIS-2. In figura 1 è mostrata la sovrapposizione in semitrasparenza dei risultati ottenuti con i 3 software per una porzione di ortofoto dove è possibile notare che le differenze nel posizionamento dei singoli pixel non è costante sull'immagine ed è dell'ordine di 1-3 pixel.



Fig.1: Ingrandimento di un'area visualizzata in semitrasparenza su 3 ortofoto sovrapposte (ottenute con i 3 software citati nel testo) per mettere in evidenza le differenze geometriche. Come si vede, l'errore di calcolo e' dell'ordine di qualche pixel, non costante sulla superficie dell'immagine. Nell'angolo basso a sinistra dell'area ingrandita non si vedono differenze significative, mentre nella parte centrale si trovano spostamenti visibili.

Per trovare la causa di tali scostamenti, sono state fatte diverse prove variando il metodo di interpolazione del DEM al fine di ricavare la quota dei pixel delle ortofoto. In questi ultimi anni infatti, grazie alla nascita di nuovi sensori aerei digitali ad alta risoluzione (Papale et al., 2008), ci si trova spesso nella condizione di avere risoluzioni di immagini acquisite molto più alte rispetto a quelle dei DEM disponibili ed a basso costo, che quindi necessitano di interpolazione bidimensionale per poter ricampionare il DEM alla stessa risoluzione dell'immagine. Senza questa interpolazione, infatti, serie di pixel dell'immagine ricadenti all'interno dello stesso pixel del DEM avrebbero associata sempre la stessa quota, con la conseguenza di creare discontinuità geometrica ai confini dei pixel del DEM. Questa interpolazione però è molto laboriosa, e rallenta il calcolo di DG. I software commerciali, per evitare il problema, di solito utilizzano un approccio semplificato che non prevede il ricampionamento di tutto il DEM alla risoluzione dell'immagine ma solo delle aree marginali dei pixel del DEM (Fig.2). Questo metodo di calcolo, però, oltre a causare una

discontinuità matematica come sopra riportato, introduce spostamenti che possono variare da zero, fino a qualche pixel. Non si ha alcun spostamento solo nel caso in cui si ha una superficie piatta (o per porzioni d'immagini dove il DEM risulta tale), mentre aumenta al crescere delle differenze di quota tra i pixel. Il software del DISAFRI calcola invece la quota pixel-by-pixel, restituendo un'immagine geometricamente continua. Si deve precisare, che i dati interpolati non riflettano la realtà, quindi non si può affermare che l'approccio di interpolazione pixel-by-pixel sia maggiormente corretto. Si può comunque asserire che tale approccio matematicamente risulta essere preferibile, visto che con l'interpolazione si cerca di sostituire dati mancanti. Lo svantaggio di tale procedura è l'impiego massiccio di memoria RAM, e il rallentamento del calcolo DG. Si fa notare comunque, che il tempo maggiore di processamento è dell'ordine di alcuni secondi considerando l'elaborazione di un'immagine di 6 MPixel lavorando in ambiente MATLAB, processore P4 3.6 GHz.

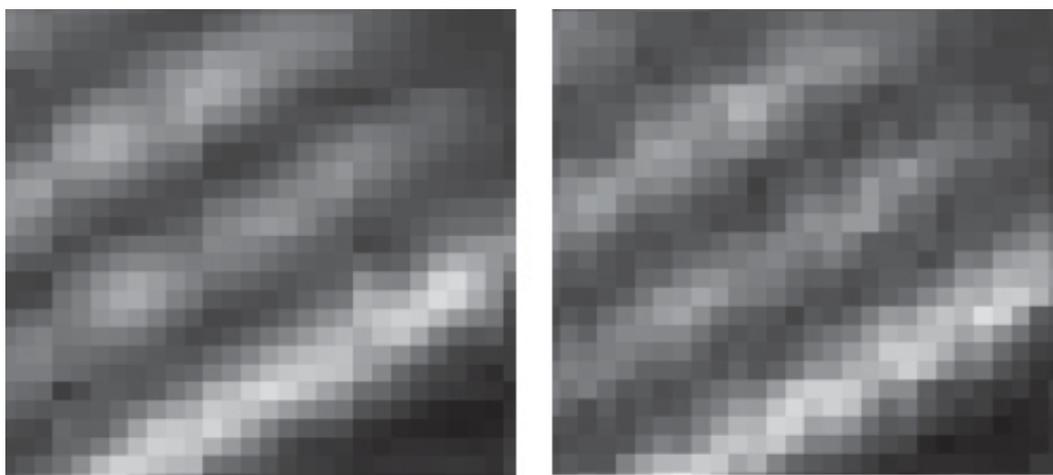


Figura 2. Ingrandimento di un pezzo di una ortofoto generata con Z-map (sinistra) e con il software DISAFRI (a destra). Nel primo caso si vede l'effetto di interpolazione DEM a blocchi (discontinuità verticali ogni 8 pixel)

La prova che tali scostamenti siano effettivamente dipendenti dall'interpolazione del DEM si è avuta ortoproiettando un'immagine con disegnata una griglia utilizzando un DEM piatto e un DEM con variazioni di quota. I diversi software hanno dato risultati identici per il DEM piatto e diversi, secondo la teoria sopra esposta, per il DEM con variazioni di quota. Usando il DEM piatto, i rettangoli si sovrappongono perfettamente, mentre usando un DEM con variazioni di quota si introducono in alcune aree spostamenti significativi (Fig.3). Si precisa che per evitare la sovrapposizione di eventuali effetti secondari tali prove sono state effettuate non utilizzando i parametri di contro distorsione, che verranno trattati nel paragrafo successivo.

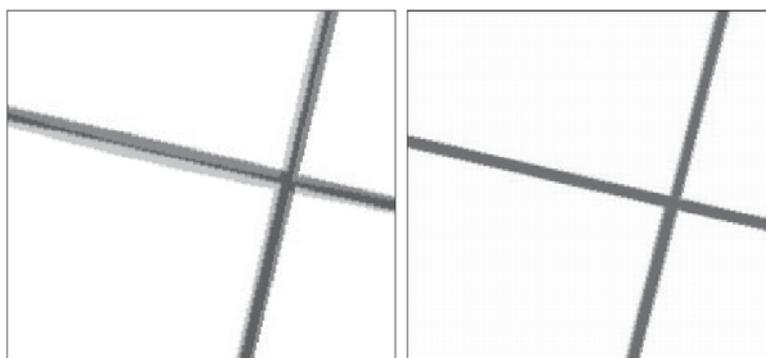


Figura 3. Ortofoto generate con diversi software, usando DEM a quote variabili (sinistra) e DEM piatto (destra). Senza variazioni di quota le immagini si sovrappongono perfettamente

Errori di calcolo dovuti alla controdistorsione

Sotto il termine di controdistorsione si intende la correzione delle distorsioni radial-simmetriche e tangenziali dell'ottica impiegata per la ripresa. Esistono diversi modelli di controdistorsione che portano allo stesso risultato (Brown, 1971; Weng et al., 1992, Michail et al., 2001). In ogni caso lo spostamento necessario per la correzione dell'immagine viene espresso tramite le componenti x_d ed y_d , come si vede anche nelle equazioni [1] e [2]. In teoria quindi anche la correzione delle distorsioni dovrebbe dare stessi risultati nel processo di DG. In pratica però il modo con il quale viene inserito il calcolo di controdistorsione nel processo di calcolo di DG può causare spostamenti di 1-1.5 pixel. Infatti, una volta calcolati i valori delle componenti x_d ed y_d , per correggere l'immagine si effettua il suo ricampionamento (*mapping*). Il processo di *mapping* consiste nel trasferire i pixel di un'immagine in un'altra immagine, calcolando la nuova posizione-pixel. Questa posizione assoluta viene poi arrotondata al più vicino numero intero.

Se consideriamo la controdistorsione nel calcolo di DG, possiamo avere diverse situazioni:

- (1) l'immagine viene prima controdistorta, poi viene ortoproiettata. In questo caso esiste il rischio del doppio arrotondamento, il primo al ricampionamento della controdistorsione, il secondo relativo al ricampionamento dell'ortoproiezione;
- (2) lo spostamento risultante dalla controdistorsione viene incluso nelle equazioni di collinearità (prendendo la forma delle equazioni [1] e [2]), e quindi facendo un solo ricampionamento e di conseguenza un solo arrotondamento.

La dimensione dell'effetto del doppio arrotondamento si può capire dal seguente esempio: se dalla controdistorsione ci risulta lo spostamento di un certo pixel, pari a $x_d = 1.6$ pixel, per effetto dell'arrotondamento questo diventerà di 2 pixel. Nel ricampionamento dell'ortoproiezione si parte da un errore geometrico di quel pixel di + 0.4 pixel, che sommato ad un eventuale arrotondamento di pari entità porta ad un errore complessivo che può arrivare a un totale di 0.999 pixel. Tenendo conto che ci sono due diversi standard di riferimento di attribuzione coordinata pixel (centro pixel, o angolo pixel), si potrebbe aggiungere una differenza di un ulteriore mezzo pixel, per quindi arrivare ad un errore totale di 1.5 pixel. Per evitare l'effetto del doppio arrotondamento e minimizzare l'errore si dovrebbe optare per la situazione descritta al punto 2 come è implementato nel software di DG del DISAFRI.

Conclusioni

Questo lavoro mostra come diversi software di DG restituiscono risultati talvolta difforni geometricamente partendo da uno stesso set di dati di input. I risultati dimostrano che le cause di errore sono riconducibili al metodo con cui viene calcolato il valore della quota dall'area relativa ad ogni singolo pixel (i.e. il metodo di interpolazione del DEM) e quello con il quale viene integrato il calcolo di controdistorsione all'interno del processo di calcolo di DG. È stato dimostrato che l'approccio "più corretto" per il calcolo della quota è quello di effettuare un'interpolazione 'completa' del DEM, in modo da ottenere stessa risoluzione tra DEM e ortofoto, evitando di creare discontinuità sull'immagine ortoproiettata dovuta all'interpolazione 'parziale'. Oltre questo si evidenzia l'importanza di integrare correttamente la routine di controdistorsione nel calcolo di DG per evitare un doppio arrotondamento della posizione del pixel dovuta al doppio processo di ricampionamento.

Riferimenti bibliografici:

Bäumker, M. and Heimes, F.-J. (2001), "New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Navigation System". *Proceedings OEEPE-Workshop Integrated Sensor Orientation, Hannover, 17.-18. Sept. 2001.*

Brown, D.C.(1971): Close-range camera calibration. *PE&RS*, Vol. 37(8), pp.855-866

Mikhail E.M., Tehel J.S. and McGlone J.C. (2001), *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley & Sons,Inc, ISBN 0-471-30924-9

Papale, D., Belli, C., Gioli, B., Miglietta, F., Ronchi, C., Vaccari, F.P., Valentini, R. (2008), "ASPIIS, A Flexible Multispectral System for Airborne Remote Sensing Environmental Applications". *Sensors*, (8), pp. 3240-3256

Skaloud J. (1999), "Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment", *Invited Paper, ISPRS Workshop on 'Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation' WG III/1, Barcelona 25-26,, 1999*

Skaloud. J. (2006), "Reliability of Direct Georeferencing Phase 1: An Overview of the Current Approaches and Possibilities., checking and Improving of Digital Terrain Models / Reliability of Direct Georeferencing." *Technical report. EuroSDR Official Publication 51*, pp. 143-168.

Weng, J., Cohen, P. and Herniou, M. (1992), "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation". *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 14(10), pp. 965-980