

UN MODELLO RIGOROSO PER L'ORIENTAMENTO DI STEREOCOPPIE: APPLICAZIONI CON IKONOS, EROS-A E QUICKBIRD

M. CRESPI, F. FRATARCANGELI, F. GIANNONE, F. PIERALICE

DITS – Area di Geodesia e Geomatica – Sapienza Università di Roma– via Eudossiana 18 – Rome, Italy -
<attia.crespi,francesca.fratarcangeli,francesca.giannone,francesca.pieralice>@uniroma1.it

Riassunto

Dal 2003, il gruppo di ricerca del DITS (Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade - Area di Geodesia e Geomatica) sta sviluppando il software scientifico SISAR (Software Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione) per l'orientamento di immagini satellitari. Attualmente il *software* è in grado di gestire le immagini acquisite dalle piattaforme QuickBird, IKONOS, EROS-A e Cartosat-1, utilizzando sia il modello rigoroso che il modello RPC (*Rational Polynomial Coefficient*).

Nel presente lavoro saranno descritti i risultati ottenuti applicando il modello rigoroso implementato in SISAR per l'orientamento di stereocoppie QuickBird, IKONOS ed EROS-A. Tale modello è in grado di gestire sia stereocoppie *along-track*, cioè coppie di immagini acquisite durante lo stesso passaggio orbitale, che stereocoppie *across-track*, cioè coppie di immagini acquisite durante differenti passaggi orbitali.

Il modello di SISAR è stato testato su tre stereocoppie: una stereocoppia *along-track* QuickBird relativa alla zona di Augusta (Sicilia); una stereocoppia *along-track* IKONOS relativa alla zona di Bagnoli (Napoli); una coppia di immagini EROS-A relative alla zona di Roma acquisite a distanza di 1 anno.

I risultati di SISAR sono stati confrontati con quelli ottenuti con il *software* OrthoEngine 10.0 (PCI Geomatica) in cui è implementato il modello rigoroso sviluppato da Thierry Toutin.

Abstract

Since 2003, the research group of DITS (Department of Hydraulic, Transportation and Street-Geodesy and Geomatic Area) has developed and implemented the scientific software SISAR (Software Immagini Satellitari Alta Risoluzione) for the satellite imagery orientation. At the moment this software is able to treat the images acquired by several platforms (QuickBird, IKONOS, EROS-A, EROS-B and Cartosat-1), using the rigorous model and RPC model (Rational Polynomial Coefficient).

In this paper the attention is focused on the orientation of QuickBird, IKONOS and EROS-A stereopairs using the rigorous model. This model is able to manage along-track stereopairs acquired in the same orbital passage and also across-track stereopairs, that are a couple of images acquired during different orbital passage.

The SISAR model is tested on three stereopairs: a QuickBird along-track stereopair of Augusta (Sicily), an IKONOS along-track stereopair of Bagnoli (Naples) and a couple of EROS-A images of Rome acquired with a temporal delay of one year.

SISAR results are compared with the corresponding ones obtained by the software OrthoEngine 10.0 (PCI Geomatica), where Thierry Toutin's rigorous is implemented.

Introduzione

Le stereocoppie di immagini satellitari ad alta risoluzione trovano applicazione in molti campi, prima tra tutti la generazione di Modelli Digitali del Terreno o delle Superfici (DTM/DSM) e l'estrazione di caratteristiche 3D in ambito urbano.

Affinché le immagini satellitari possano essere utilizzate per scopi metrici e cartografici, è di fondamentale importanza rimuovere le distorsioni da cui sono affette le immagini grezze, che devono subire quindi un processo di orientamento (definizione, stima e valutazione del modello di correzione) e di ortorettificazione (generazione di una nuova immagine corretta).

I modelli di orientamento per le immagini satellitari si dividono in due gruppi principali: i modelli fisicamente basati e i modelli analitici (detti anche modelli neri). Appartiene alla prima categoria il modello rigoroso, che prevede la ricostruzione della geometria della presa e del segmento orbitale al momento dell'acquisizione. Fa parte invece della seconda categoria il modello RPF (Funzioni Polinomiali Razionali) dove il rapporto tra coordinate terreno e coordinate immagine è stabilito da funzioni puramente analitiche; i coefficienti dei polinomi possono essere stimati sulla base di un set di punti di controllo a terra o possono essere forniti insieme all'immagine nel file RPC.

Nel presente lavoro l'attenzione è stata rivolta al modello rigoroso per l'orientamento delle immagini satellitari ad alta risoluzione implementato in SISAR e alla sua applicazione con stereocoppie acquisite dai satelliti QuickBird, IKONOS and EROS-A.

Il modello orienta sia stereocoppie *along-track*, cioè coppie di immagini acquisite durante lo stesso passaggio orbitale con un intervallo temporale di pochi secondi, che stereocoppie *across-track*, cioè coppie di immagini acquisite durante differenti passaggi orbitali.

In particolare, lo studio delle informazioni geometriche estraibili da una stereocoppia acquisita in differenti passaggi orbitali e con intervalli temporali piuttosto lunghi risulta essere di notevole interesse in quanto le stereocoppie *along-track* hanno generalmente costi elevati.

È importante ricordare che i prodotti IKONOS sono preventivamente sottoposti ad una proiezione su un ellissoide di riferimento, mentre le immagini grezze EROS-A e QuickBird non subiscono alcuna correzione geometrica; per questa ragione il modello rigoroso per le immagini IKONOS è diverso da quello sviluppato per EROS-A e QuickBird.

Il modello rigoroso per le immagini QuickBird ed EROS-A

Il modello è basato, secondo il classico approccio fotogrammetrico, sulla ricostruzione delle equazioni di collinearità. La posizione del satellite è descritta attraverso i parametri kepleriani che permettono di ricostruire il segmento orbitale percorso dal satellite al momento della presa; i tre angoli che rappresentano l'assetto del satellite sono modellizzati attraverso funzioni del secondo ordine dipendenti dal tempo; inoltre si tiene conto anche degli effetti della rifrazione atmosferica. Altri parametri di orientamento sono la distanza focale e due parametri di autocalibrazione che tengono conto di eventuali distorsioni indotte dal sensore (Crespi et al., 2008).

I valori approssimati di tutti questi parametri vengono inizialmente ricavati dai file di metadata che corredano l'immagine, in seguito attraverso una stima ai minimi quadrati ne vengono stimate delle correzioni, utilizzando un set di punti di controllo, cioè punti di cui sono note le coordinate immagine e le coordinate a terra (Ground Control Points).

Si vuole sottolineare che non tutti i parametri sopra descritti sono stimabili; infatti non è possibile stimare alcuni parametri kepleriani poiché l'arco orbitale connesso al periodo dell'acquisizione di una immagine è estremamente corto rispetto alla lunghezza totale dell'orbita, mentre altri parametri non sono stimabili perché strettamente correlati tra loro e con i parametri di assetto del sensore (Giannone, 2006). Per riuscire ad individuare quali siano i parametri realmente stimabili, è stata implementata in SISAR una procedura basata sulla *Singular Value Decomposition* (SVD) e sulla *QR Decomposition* (Golub, 1993), che permette di selezionare nel processo di stima ai minimi quadrati solamente i parametri realmente stimabili. Inoltre viene effettuato anche un test di significatività del tipo t-Student, in modo tale che solo i parametri realmente stimabili e significativi entrino a far parte della stima definitiva.

Il modello rigoroso per le immagini IKONOS

Le immagini IKONOS sono soggette ad un pre-processamento che prevede la proiezione dell'immagine su un ellissoide "gonfiato" ad una quota di riferimento ed una georeferenziazione in un sistema cartografico. In questo caso è possibile definire delle equazioni di collinearità [1] che stabiliscano un legame tra le coordinate terreno dei punti (X_T, Y_T, Z_T) e le rispettive coordinate lette sull'immagine (X_I, Y_I, Z_I), entrambe espresse nel sistema di riferimento ECEF (Crespi et al., 2007).

$$\begin{bmatrix} X_I - X_S \\ Y_I - Y_S \\ Z_I - Z_S \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X_T - X_S \\ Y_T - Y_S \\ Z_T - Z_S \end{bmatrix} \quad [1]$$

I termini X_S, Y_S, Z_S rappresentano le coordinate del satellite espresse nel sistema di riferimento ECEF, λ è un fattore di scala ed R una matrice di rotazione infinitesima [2], i cui termini a, b, c rappresentano i parametri di assetto del satellite.

$$R = I + \Delta R \quad \Delta R = \begin{pmatrix} 0 & a & b \\ a & 0 & c \\ b & c & 0 \end{pmatrix}$$

[2]

Si suppone che a, b, c possano essere modellizzati con funzioni del secondo ordine dipendenti dal tempo [3]. $a_0, b_0, c_0, a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ sono i parametri che vengono stimati con un sistema ai minimi quadrati per definire il modello di orientamento dell'immagine.

$$a = a_0 + a_1 \cdot Js + a_2 \cdot Js^2$$

$$b = b_0 + b_1 \cdot Js + b_2 \cdot Js^2$$

$$c = c_0 + c_1 \cdot Js + c_2 \cdot Js^2$$

[3]

Orientamento della stereocoppia

Le due immagini che costituiscono la stereocoppia devono essere orientate separatamente, stimando così i parametri del modello singolarmente per ognuna di esse. Tali parametri sono utilizzati per poter stimare le coordinate a terra di un certo numero di *Tie Point* (TP), cioè dei punti di legame. I punti di legame, di cui sono note soltanto le coordinate immagine, devono essere chiaramente individuabili su entrambe le immagini. Le coordinate a terra di questi punti possono essere calcolate valutando il punto di intersezione tra i due raggi omologhi relativi alle due immagini della stereocoppia (figura 1).

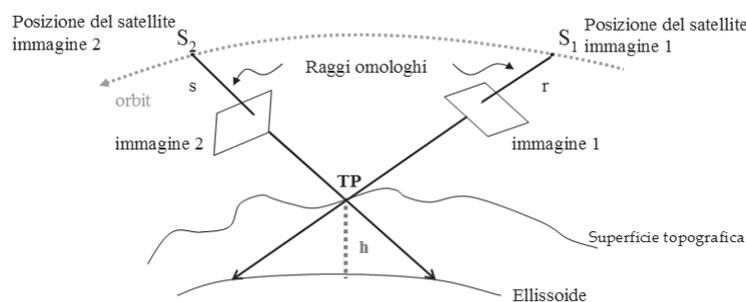


Figura 1 - Calcolo delle coordinate dei TP attraverso l'intersezione dei raggi omologhi

Le coordinate dei TP così calcolate saranno poi utilizzate insieme agli altri GCP per l'orientamento della stereocoppia, nel quale tutti i parametri del modello relativi alle due immagini sono stimati simultaneamente.

Risultati

Il set di dati utilizzato per testare il modello è costituito da tre stereocoppie con diverse caratteristiche (Tabella 2): una stereocoppia QuickBird *along-track* della zona di Augusta (Sicilia), una stereocoppia IKONOS *along-track* della zona di Bagnoli e una stereocoppia EROS-A composta da due immagini della zona di Roma acquisite con un intervallo temporale di circa un anno.

| ID Image | GSD [m] | Off-nadir angle (°) | | Scene coverage (Km*Km) | GPs |
|----------------------|---------|---------------------|------|------------------------|-----|
| | | Start | End | | |
| QuickBird | | | | | |
| Augusta (*P001) | 0.77 | 29.2 | | 20x19 | 39 |
| Augusta (*P002) | 0.75 | 28.2 | | 20x19 | |
| IKONOS | | | | | |
| Bagnoli1 | 1.00 | 25.6 | | 9x13 | 25 |
| Bagnoli2 | 1.00 | 27.1 | | 9x13 | |
| EROS A | | | | | |
| ITA1-e1038452 (Rome) | 1.80 | 9.1 | 9.4 | 13x10 | 49 |
| ITA1-e1090724 (Rome) | 2.60 | 31.0 | 40.1 | 17x12 | |

Tabella 2 – Caratteristiche delle immagini utilizzate nei test

Si intende richiamare l'attenzione su alcune delle problematiche incontrate lavorando sulla stereocoppia EROS-A del tipo *across-track*; infatti le due immagini, acquisite ad un anno di distanza, sono molto diverse dal punto di vista delle condizioni di illuminazione e della copertura del suolo, inoltre le due immagini hanno anche un diverso valore di risoluzione spaziale (rispettivamente 1.8 m e 2.6 m). Tutti questi fattori possono rendere piuttosto difficile il riconoscimento di particolari corrispondenti sulle due immagini e quindi rendere complicata la scelta e la collimazione dei punti di controllo. In figura 3 è mostrato un esempio: un particolare chiaramente visibile su una delle due immagini è praticamente irriconoscibile sull'altra.

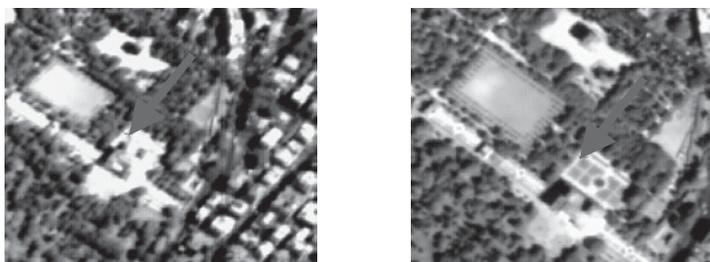


Figura 3 – Un particolare delle due immagini EROS-A a confronto (ITA1-e1038452 gsd= 1.8 m a sinistra e ITA1-e1090724 gsd= 2.6 m a destra)

Le coordinate a terra dei punti di controllo sono state acquisite attraverso rilievi GPS. In particolare per le immagini di Augusta è stato effettuato un rilievo in modalità RTK con ricevitore Leica System 1200. I punti di Bagnoli sono stati acquisiti con ricevitori TOPCON Legacy in modalità *post processing*. I punti di controllo su Roma sono stati acquisiti con ricevitore Trimble 5700 utilizzando come *master station* la stazione permanente MOSE collocata presso l'Università di Roma "Sapienza". L'accuratezza orizzontale delle coordinate dei punti di controllo è di circa 10 cm, mentre quella verticale è di circa 20 cm.

I risultati ottenuti con il software SISAR sono stati messi a confronto con quelli ottenuti utilizzando il software commerciale PCI Geomatica 10.0 (modulo OrthoEngine), nel quale è implementato il modello rigoroso sviluppato da Toutin. Sono stati riportati i risultati delle prove effettuate sulle diverse stereocoppie in termini di RMSE dei residui sui *Check Point* (CP) nelle diverse componenti; tale indice statistico è utile a valutare l'accuratezza estraibile dall'immagine. Ogni stereocoppia è stata orientata con entrambe i software più volte incrementando il numero dei punti utilizzati come *Ground Control Point* (GCP); nei seguenti grafici è mostrato l'andamento dei risultati al variare delle prove. Per quanto riguarda la stereocoppia QuickBird (figura 4) il modello implementato in SISAR permette di ottenere una migliore accuratezza, sia nelle componenti planimetriche che in altimetria.

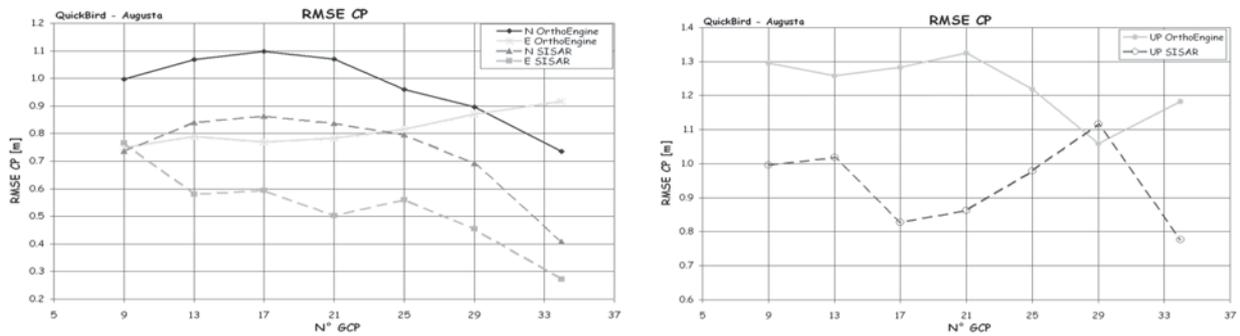


Figura 4 – RMSE sui CP relativi alla stereocoppia Quickbird, componenti planimetriche (sinistra) e componente altimetrica (destra)

I risultati ottenuti sulle immagini IKONOS sono soddisfacenti (figura 5); in particolare si può notare che nella componente Nord il trend è molto simile per entrambe i software e che SISAR permette di ottenere una migliore accuratezza, mentre è il contrario per componente Est, dove il valore di RMSE si assesta attorno al metro. Anche per la componente altimetrica il trend per i due software è molto simile, ma con OrthoEngine si ottengono dei risultati migliori.

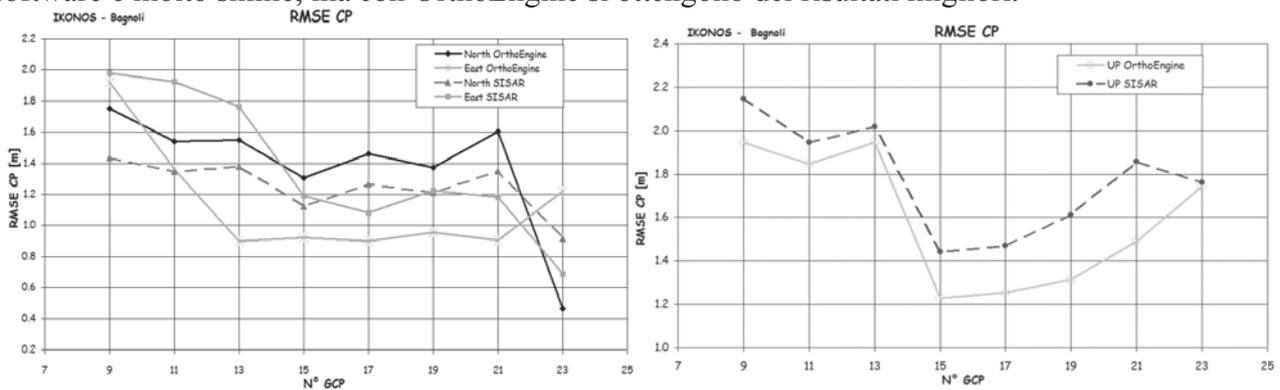


Figura 5 - RMSE sui CP relativi alla stereocoppia IKONOS, componenti planimetriche (sinistra) e componente altimetrica (destra)

Molto interessanti sono i risultati ottenuti sulla stereocoppia EROS-A (figura 6), dove sono ottime le prestazioni di SISAR, soprattutto nella componente Nord, per la quale si hanno valori di RMSE di circa 2.8 m contro i 4.0 m di OrthoEngine. Anche l'altimetria i risultati ottenuti con SISAR sono molto buoni con accuratezze migliori rispetto ad OrthoEngine.

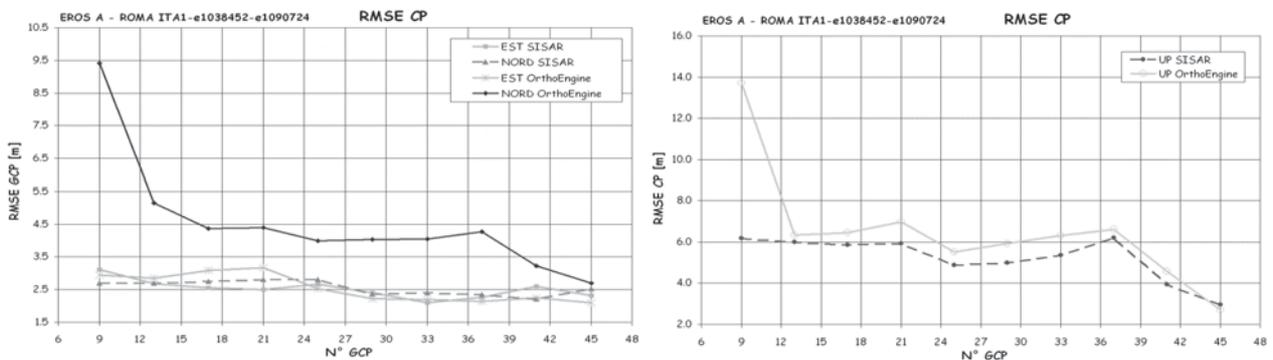


Figura 6 - RMSE sui CP relativi alla stereocoppia EROS-A, componenti planimetriche (sinistra) e componente altimetrica (destra)

La tabella 7 riassume i risultati ottenuti nelle diverse prove riportando per ciascuna stereocoppia e per ciascuna componente il valore di RMSE attorno al quale si assestano i risultati.

| | ACCURACY (RMSE of CP) | | | | | |
|-----------|-----------------------|--------------|-----------|-------------|--------------|-----------|
| | OrthoEngine | | | SISAR | | |
| | East [m] | North [m] | Up [m] | East [m] | North [m] | Up [m] |
| EROS A | 2.53 | 4.00 | 5.52 | 2.67 | 2.81 | 4.89 |
| QuickBird | 0.77 | 1.10 | 1.28 | 0.59 | 0.86 | 0.83 |
| IKONOS | 0.90 | 1.46 | 1.25 | 0.98 | 1.34 | 1.41 |

Tabella 7 – Tabella riassuntiva delle prove effettuate

Conclusioni

Il modello rigoroso implementato nel software scientifico SISAR è stato applicato su tre stereocoppie acquisite dai satelliti ad alta risoluzione QuickBird, IKONOS ed EROS-A; le stesse immagini sono state orientate utilizzando anche il modello rigoroso implementato nel software commerciale OrthoEngine (PCI Geomatica 10.0) e i risultati ottenuti con i due software sono stati confrontati.

I risultati, in termini di RMSE dei residui sui CP, hanno rivelato le buone potenzialità del software SISAR, le cui prestazioni sono certamente al livello del software commerciale OrthoEngine 10.

L'accuratezza raggiungibile con la stereocoppia QuickBird è al di sotto del metro, compatibile con prodotti cartografici alla scala 1:5000. Accuratezze minori si possono ottenere con le immagini IKONOS ed EROS-A, ma cmq dell'ordine della risoluzione spaziale delle immagini.

Tra le prospettive future si intende estendere il modello all'orientamento di blocchi di immagini e all'orientamento di immagini acquisite da altre piattaforme (come Prism ed EROS-B).

Bibliografia

Crespi M., Fratarcangeli F., Giannone F., Pieralice F., 2007. Orientamento di immagini satellitari Ikonos: implementazione di un modello originale nel software scientifico SISAR. 11° Conferenza Nazionale Asita, Torino (Italy)

Crespi M., Fratarcangeli F., Giannone F., Pieralice F., 2008 Orientation of QuickBird, IKONOS and EROS-A stereopairs by an original rigorous model. International Calibration and Orientation Workshop, EuroCOW 2008. Castelldefels (Spain)

Giannone F., 2006. A rigorous model for High Resolution Satellite Imagery Orientation. PhD Thesis, Area di Geodesia e Geomatica Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade, Sapienza Università di Roma.

Golub G. H., Van Loan C. F., 1993. *Matrix Computation*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore and London.