

# SISAR: UN MODELLO RIGOROSO DI ORIENTAMENTO DI IMMAGINI STEREO ACQUISITE DA SENSORI PUSHBROOM

Marola CORSETTI, Mattia CRESPI, Francesca FRATARCANGELI, Francesca GIANNONE

DITS - Area di Geodesia e Geomatica, "Sapienza" Università di Roma – v. Eudossiana, 18 – 00184 Roma  
Tel. ++39-0644585087 - Fax ++39-0644585515 - E-mail [francesca.fratarcangeli@uniroma1.it](mailto:francesca.fratarcangeli@uniroma1.it)

## Riassunto

Dal 2003, il gruppo di ricerca dell'area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma "La Sapienza" ha sviluppato un modello rigoroso per orientare immagini singole sia "Basic" (livello 1A) che pre-processate (livello 1B) acquisite dalle piattaforme satellitari *EROS A*, *QuickBird* ed *Ikonos II*. Tale modello è stato implementato in un software scientifico scritto in linguaggio C++ (*SISAR* - Software Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione).

In questo lavoro si vuole descrivere ed analizzare una nuova funzione del software *SISAR*: la possibilità di orientare immagini stereo acquisite dalla piattaforma satellitare *QuickBird*.

Il nuovo modello rigoroso è stato testato su una stereocoppia *QuickBird Basic* della zona di Augusta (Sicilia). La sperimentazione è stata condotta eseguendo una valutazione dell'accuratezza dell'immagine; i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti con il modello rigoroso implementato nel software commerciale *OrthoEngine v. 10*, ampiamente accreditato in ambito scientifico.

## Abstract

*Since 2003, the research group at DITS University of Rome "La Sapienza" (Geodesy and Geomatics Area) has been developing and implementing a specific and rigorous model for the orientation of "raw" (1A level) and projected (1B level) imagery, acquired from EROS A, QuickBird, Ikonos II satellite, in a C++ software (SISAR - Software Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione); the model may be used to orientate both single image and stereopairs.*

*Here the module attaining to stereopairs is mainly considered and its main features are described. To point out the effectiveness of the new model, the results related to a Quickbird Basic stereopair are compared with the corresponding obtained by the commercial software OrthoEngine 10.0 (PCI Geomatica), where Thierry Toutin's rigorous model is implemented.*

## Introduzione

Le immagini satellitari ad alta risoluzione hanno un ruolo rilevante per le applicazioni cartografiche, per la produzione di ortofotocarte, per la generazione di modelli digitali del terreno e della superficie (DTM e DSM) e per estrazioni di caratteristiche 3D (city modeling).

La reale possibilità di usare immagini satellitari per l'uso cartografico dipende da diversi fattori quali le caratteristiche del sensore, il tipo di prodotti forniti dalle compagnie che gestiscono i diversi satelliti, i costi e tempi necessari per ottenere tali prodotti e il costo dei software adeguati per il processamento delle immagini stesse.

Le immagini satellitari per essere utilizzate per scopi cartografici devono subire un processo di orientamento per l'eliminazione delle distorsioni introdotte dalla posizione del satellite rispetto alla Terra, dall'assetto e dalle caratteristiche ottico-geometriche del sensore.

Dal 2003 il gruppo di ricerca dell'Area di Geodesia e Geomatica della "Sapienza" Università di Roma ha sviluppato un modello rigoroso per l'orientamento di immagini acquisite da sensori

pushbroom montati su piattaforme satellitari quali *EROS A*, *QuickBird* e *IKONOS II*. Questo modello è stato implementato nel software *SISAR* (Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione) (Baiocchi et al., 2004) (Crespi et al., 2007) (Fratarcangeli, 2006).

In questo lavoro viene presentato l'algoritmo per l'orientamento, con il modello rigoroso, di immagini stereo acquisite dal satellite *QuickBird*.

### Il modello di *SISAR*

Il modello implementato in *SISAR* per l'orientamento di immagini stereo prevede la determinazione delle equazioni di collinearità, due per ogni immagine, considerando un set di parametri necessari per definire la posizione e l'assetto del satellite, l'orientamento interno e l'autocalibrazione del sensore. In particolare la posizione del satellite è descritta dai parametri Kepleriani che ricostruiscono il segmento orbitale durante l'acquisizione dell'immagine; l'assetto del sensore è descritto da tre angoli, ognuno dei quali può essere rappresentato come la somma di un termine noto, dipendente dal tempo, e di un polinomio del secondo ordine anch'esso dipendente dal tempo; le caratteristiche ottico geometriche del sensore sono descritte dalla distanza focale e dai parametri di autocalibrazione.

Sia gli elementi Kepleriani che i parametri che descrivono le caratteristiche del sensore sono uguali per entrambe le immagini perchè sono acquisite dallo stesso sensore durante lo stesso passaggio orbitale (Tabella 1).

POSIZIONE DEL SATELLITE	a: semi asse maggiore e: eccentricità $\Omega$ : ascensione retta del nodo ascendente i: inclinazione dell'orbita $\omega$ : argomento del perigeo v: anomalia vera (dipende dal $T_p$ , tempo di passaggio al perigeo)
ASSETTO	$\varphi = \varphi_0(t) + a_0 + a_1 t + a_2 t^2$ (roll) $\theta = \theta_0(t) + b_0 + b_1 t + b_2 t^2$ (pitch) $\psi = \psi_0(t) + c_0 + c_1 t + c_2 t^2$ (yaw)
CARATTERISTICHE OTTICO/GEOMETRICHE DEL SENSORE	f: distanza focale $d_1, d_2$ : parametri di auto-calibrazione

Tabella 1 – set di parametri per il modello di *SISAR*

Quindi nel caso di una stereocoppia il set di parametri necessari per l'orientamento è costituito da: i parametri kepleriani, 18 coefficienti d'assetto (9 per ogni immagine), 1 parametro di orientamento interno e 2 parametri di autocalibrazione.

I valori approssimati di questi parametri sono calcolati grazie alle informazioni contenute nei metadata file e devono essere corretti con un processo di stima a minimi quadrati basato su un opportuno numero di punti di controllo a terra (GP - *Groud Point*). Oltre ai parametri del modello, nel processo di stima vengono anche raffinate le coordinate dei GP (GCP - *Groud Control Point* e TP - *Tie Point*).

Si vuole sottolineare che non tutti i parametri descritti in Tabella 1 sono realmente stimabili; infatti alcuni parametri kepleriani (come a, e ed  $\omega$ ) non sono stimabili perché l'arco orbitale relativo all'acquisizione di ogni singola immagine è corto rispetto all'intera lunghezza dell'orbita, altri parametri (come i,  $\Omega$ ,  $T_p$ ) non sono stimabili perché altamente correlati tra loro e con l'assetto del sensore.

L'alta correlazione tra i parametri genera una pseudo-singularità della matrice disegno nel processo di stima a minimi quadrati, per cui per individuare il numero di parametri realmente stimabili si è concentrata l'attenzione su tre aspetti:

- ✓ stima della dimensione del range di A (matrice disegno) cioè il rango di A
- ✓ calcolo di una base ortonormale nel range di A
- ✓ identificazione dei parametri significativi ai fini del processo di stima

Tali aspetti sono stati risolti rispettivamente con l'implementazione della SVD (Singular Value Decomposition), della decomposizione QR (Golub, Van Loan 1993) e con il test t – Student (Giannone, 2006).

Le equazioni di collinearità per la generica immagine e per un generico punto sono [1]:

$$x_s = f \frac{R_1 |X_{It} - X_{SI}|}{R_3 |X_{It} - X_{SI}|} \quad y_s = f \frac{R_2 |X_{It} - X_{SI}|}{R_3 |X_{It} - X_{SI}|} \quad [1]$$

dove  $(x_s, y_s)$  sono le coordinate immagine (in metri),  $f$  è la distanza focale,  $R_1, R_2, R_3$  sono le righe della matrice di rotazione da sistema inerziale "I" ( $X_I, Y_I, Z_I$ ) al sistema sensore "s" ( $x_s, y_s, z_s$ ) e  $(X_{It}, X_{SI})$  sono le coordinate del punto a terra e del satellite nel sistema inerziale.

Con semplici considerazioni geometriche è possibile scrivere le equazioni di collinearità (2 per ogni immagine) anche in funzione delle coordinate immagine (I, J) (in pixel):

$$\begin{cases} \frac{x_s}{f} = \text{tg}\beta = \frac{d_{\text{pix}}}{f} [J - \text{int}(j) - J_0] \\ \frac{y_s}{f} = \text{tg}\alpha = \frac{d_{\text{pix}}}{f} [d_1(I - I_0) + d_2(I - I_0)^2] \end{cases} \quad [2]$$

dove  $d_{\text{pix}}$  rappresenta la dimensione del pixel,  $(I_0, J_0)$  sono le coordinate del punto principale in pixel.

Tali equazioni sono valide per entrambe le immagini tenendo conto che (I, J) sono le coordinate immagine della prima o della seconda immagine a seconda se si considerano le due equazioni di collinearità relative all'una o all'altra immagine rispettivamente.

### Calcolo delle coordinate dei TP

All'interno dell'algoritmo per l'orientamento delle stereocoppia è stato implementato un modulo per il calcolo delle coordinate a terra approssimate dei *Tie Point* (TP).

La procedura utilizzata prevede l'orientamento separato delle due immagini, il calcolo quindi delle coordinate ECEF del punto 1  $(X, Y, Z)_1$  e del punto 2  $(X, Y, Z)_2$  attraverso l'intersezione rispettivamente della retta r (equazioni di collinearità relative alla prima immagine) e della retta s (equazioni di collinearità relative alla seconda immagine) con l'ellissoide WGS84.

Attraverso semplici considerazioni geometriche, espresse dalle formule che seguono, si è ricavata l'informazione approssimata sulla terza dimensione (Figura 1).

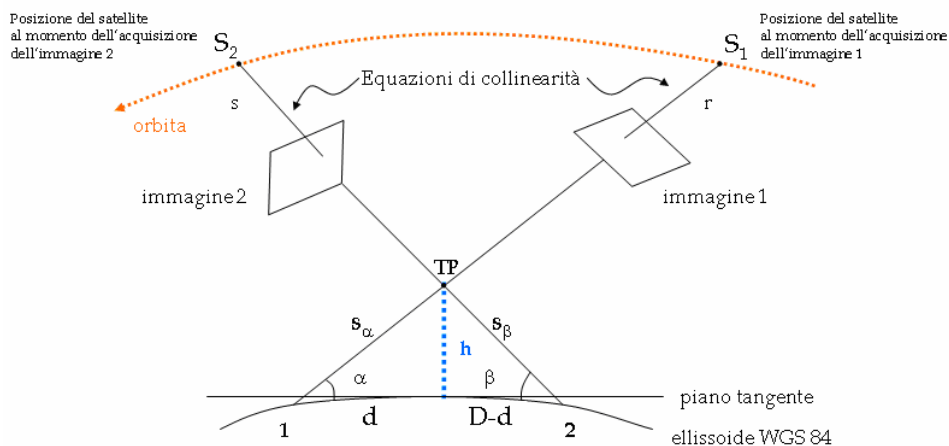


Figura 1 – Rappresentazione grafica che consente il calcolo delle coordinate dei TP

Infatti, sapendo che  $h \cong d \text{tg}\alpha$  e  $h \cong (D-d) \text{tg}\beta$  si ottiene

$$h \cong \frac{D \cdot \text{tg}\alpha \cdot \text{tg}\beta}{(\text{tg}\alpha + \text{tg}\beta)} \quad [3]$$

dove  $D$  è la distanza tra i punti 1 e 2,  $\alpha$  e  $\beta$  sono gli angoli che l'ellissoide forma con le rette  $r$  e  $s$ ; tali angoli sono ricavati tramite la formula [4] descritta per il solo angolo  $\alpha$

$$\sin \alpha = \frac{a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2}{\pm \sqrt{(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2) \cdot (a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)}} \quad [4]$$

dove  $a_1, b_1, c_1$  sono i coseni direttori della linea di vista relativa all'immagine presa in considerazione,  $a_2, b_2, c_2$  sono i coseni direttori della retta ortogonale all'ellissoide.

E' quindi possibile ricavare  $s_\alpha$  e  $s_\beta$ :

$$s_\alpha = \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{D \cdot \operatorname{tg} \beta}{\cos \alpha \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)} \quad [5]$$

$$s_\beta = \frac{h}{\sin \beta} = \frac{D \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)}$$

I valori di  $s_\alpha$  e di  $s_\beta$  sono moltiplicati per i coseni direttori delle rette  $r$  ed  $s$  rispettivamente e sono sommati alle coordinate  $(X, Y, Z)$  dei punti 1 e 2; infine mediati ottenendo le coordinate  $(X, Y, Z)$  dei TP, poi trasformate in coordinate geografiche  $(\varphi, \lambda$  e  $h)$

## Risultati

I dati su cui si è basata la sperimentazione sono rappresentati da: un'immagine stereo acquisita dal satellite *QuickBird* e i relativi GCP necessari per l'orientamento.

Le due immagini acquisite dal satellite *QuickBird* sono in modalità pancromatica relative alla città di Augusta e appartengono alla categoria Basic (radiometricamente corrette).

Le caratteristiche sono:

- ✓ 04JAN06093201-P1BS-000000130187\_01\_P001: Augusta acquisita il 06/06/2004 con angolo di off-nadir medio di 29.2°, con risoluzione media nominale a terra di 0.772 metri, estensione di circa 21x21km<sup>2</sup>;
- ✓ 04JAN06093307-P1BS-000000130187\_01\_P002: Augusta acquisita il 06/06/2004 con angolo di off-nadir medio di 28.2°, con risoluzione media nominale a terra di 0.750 metri, estensione di circa 20x20km<sup>2</sup>;

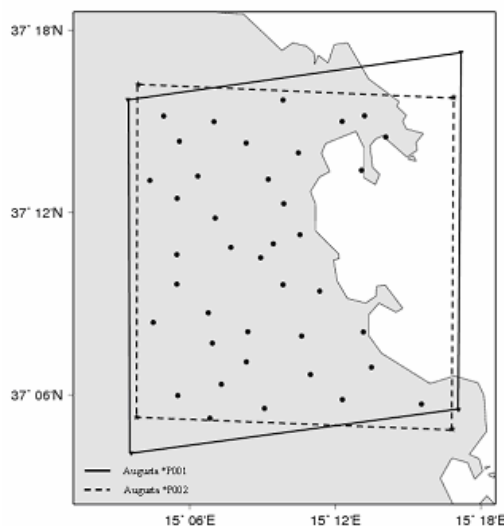


Figura 2 – Distribuzione dei punti a terra

I punti sono stati acquisiti tramite un rilievo GPS in modalità RTK; la precisione media delle coordinate è di 5-10 cm rispettivamente in planimetria e in quota. Le quote ortometriche sono state ricavate utilizzando l'ondulazione del geoide nota nel punto di riferimento (modello ITALGEO 95). La metodologia scelta per valutare i risultati è stata quella di variare il numero di GCP utilizzati per l'orientamento; in particolare, si sono effettuate prove aumentando il numero di GCP di quattro in quattro cercando di mantenere una loro distribuzione uniforme all'interno dell'area coperta dalla

stereocoppia. Per ogni prova è stata valutata l'accuratezza dell'immagine tramite lo RMSE degli scarti residui sulle coordinate Nord, Est e Up per punti di controllo (CP- *Check Point*).

Conseguentemente per analizzare i risultati si sono graficate le curve che relazionano lo RMSE dei residui sui CP, espresso in metri, con il numero di GCP utilizzati per orientare l'immagine; tutto ciò è stato messo a confronto con le stesse curve relative ai dati ricavati dal software OrthoEngine v. 10.0 (Toutin, 2004).

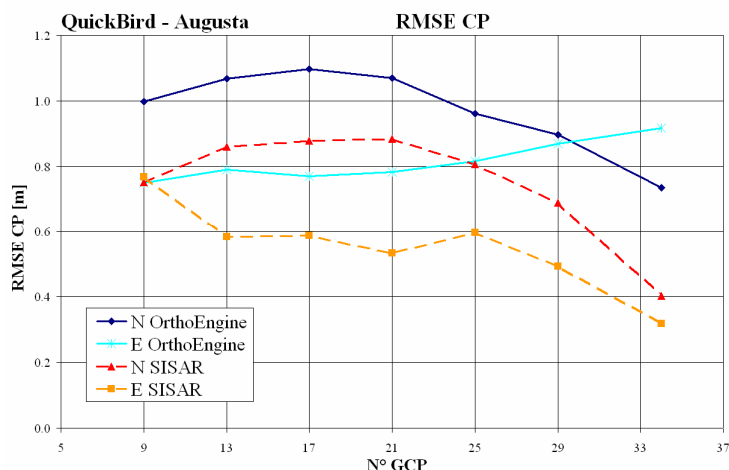


Figura 3 – Andamento dello RMSE (m) dei CP - coordinate Nord ed Est

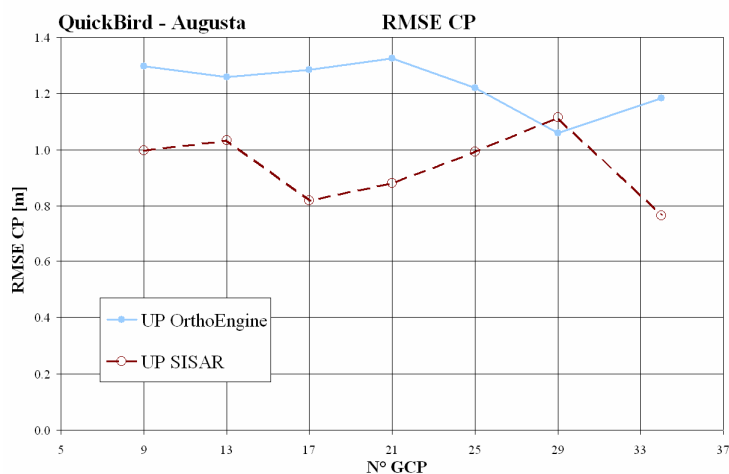


Figura 4 – Andamento dello RMSE (m) dei CP - coordinata Up

In Nord i due software hanno un comportamento analogo evidenziato dallo stesso andamento della curva anche se SISAR ha una maggiore accuratezza. In Est ed Up, al contrario, pur restando il fatto che SISAR è ancora una volta in grado di fornire una maggiore accuratezza, i due software hanno un comportamento diverso in termini di andamento della curva.

## Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato l'algoritmo implementato per l'orientamento, con il modello rigoroso, di immagini stereo acquisite dal satellite *QuickBird* che nel prossimo futuro potrà essere esteso anche ad altri satelliti tra i quali Cartosat-1. Il modello, implementato in SISAR (Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione) in corso di sviluppo dal 2003 presso l'Area di Geodesia e Geomatica della Sapienza Università di Roma, è stato testato su una stereocoppia relativa alla località di Augusta (Sicilia).

I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ottenuti con il software commerciale OrthoEngine v.10.0; le prove sono state utili per valutare l'accuratezza relativa alle immagini (espressa attraverso lo RMSE in metri sui CP) e le potenzialità del software.

I risultati ottenuti con il software SISAR hanno evidenziato risultati confrontabili con quelli ottenuti con il software OrthoEngine.

Gli sviluppi futuri prevedono l'estensione del modello per l'orientamento di immagini Cartosat-1, EROS B e Prism.

## **Bibliografia**

Baiocchi V., Crespi M., De Vendictis L., Giannone F. (2004) A new rigorous model for the orthorectification of synchronous and asynchronous high resolution imagery. *Proc. of the 24th EARSeL Symposium, Dubrovnik (Croatia), pp. 461-468*

Crespi M., Fratarcangeli F., Giannone F., Pieralice F. (2007), "SISAR: a rigorous orientation model for synchronous and asynchronous pushbroom sensors imagery", *Presentato a ISPRS Commision 1, Hannover*

Fratarcangeli F., 2006. Ortorettificazione di immagini satellitari ad alta risoluzione acquisite dalla piattaforma QuickBird: sviluppo di un modello rigoroso ed implementazione di un software. Degree thesis in Environmental Engineering (in Italian), Area di Geodesia e Geomatica Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade, Sapienza Università di Roma. (non pubblicata)

Giannone F., 2006. A rigorous model for High Resolution Satellite Imagery Orientation. Tesi di dottorato, Area di Geodesia e Geomatica Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade, Sapienza Università di Roma. Disponibile on line  
<http://w3.uniroma1.it/geodeom/personale.htm#DottoriRicerca>

Golub G. H., Van Loan C. F. (1993) *Matrix Computation*, The Johns Hopkins University Press.

Toutin T., 2004. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, *International Journal of Remote Sensing*, 25, pp. 1893-1924.