

## Algoritmi di matching per estrazione di DSM in aree urbane da immagini satellitari ad alta risoluzione

Mattia Crespi, Paola Capaldo, Francesca Fratarcangeli, Andrea Nascetti, Francesca Pieralice

DICEA – Area di Geodesia e Geomatica – Sapienza Università di Roma, via Eudossiana, 18 – 00184 Rome, Italy  
<mattia.crespi,paola.capaldo, francesca.fratarcangeli, andrea.nascetti, francesca.pieralice>@uniroma1.it

### Riassunto

L'alta risoluzione e la buona qualità radiometrica delle immagini acquisite da sensori quali GeoEye-1 e WorldView-1, permettono di generare Modelli Digitali della Superficie (DSM) con accuratèzze comparabili con quelli ottenibili da immagini aeree a media scala.

L'accuratèzza di un DSM dipende dall'orientamento della stereo coppia e dalle strategie di *matching*. I modelli di orientamento adottati si dividono in modelli rigorosi e modelli generici. I primi utilizzano un approccio fotogrammetrico basato sulle equazioni di collinearità mentre nei secondi le coordinate immagine sono legate a quelle terreno mediante rapporti di polinomi di cui sono noti i coefficienti (RPC).

Riguardo al matching si distinguono due tipologie di algoritmi: l'*Area Based Matching* (ABM) e il *Feature Based Matching* (FBM). L'ABM si basa sulla ricerca della massima correlazione tra i valori della radianza nell'intorno di un punto fisso sull'immagine *master* e quelli nell'intorno di un punto mobile sull'immagine *slave*. Il FBM invece, ricerca prima le *features* (punti, angoli, bordi ecc.) in entrambe le immagini e poi ne analizza la corrispondenza.

Nel presente lavoro si è valutata l'accuratèzza di DSM generati con il software scientifico SISAR sviluppato dall'Università di Roma "La Sapienza", software per l'orientamento di immagini ad alta risoluzione ed in grado di generare RPC a partire dai propri modelli rigorosi.

Gli algoritmi di *matching* implementati in SISAR sono: il FBM e ABM; l'ABM è guidata dagli RPC generati ad hoc per l'area in esame. Con tale strategia sono stati generati due DSM, uno da una stereo coppia WorldView-1 della città di Augusta e confrontato con uno della stessa area acquisito da rilievo Lidar e il secondo da una stereo coppia della città di Roma acquisita dal sensore GeoEye-1 usando come DSM di riferimento una cartografia vettoriale 3D a scala 1:2000.

### Abstract

*Thanks to the very high resolution and the good radiometric quality of the images acquired by GeoEye-1 and WorldView-1, it seems possible to extract a Digital Surface Model (DSM) at accuracy level, comparable to those coming from middle scale aerial products. The accuracy level of DSM is strictly related both to the image orientation and to the matching process. The orientation methods can be classified in two categories: physically-based models (also called "rigorous" models) based on the well-known collinearity equations and generic models that consist in purely analytic functions linking image to terrain coordinates in the form of ratios of polynomial thanks to known Rational Polynomial Coefficients – RPCs.*

*As regards the image matching we can distinguish two basic techniques, the Area Based Matching (ABM) and the Feature Based Matching (FBM). In ABM method a small image window in the master image is opened and on the slave image a template window is shifted and in each position the high correlation coefficient is searched.*

*Whereas FBM searches basic features (like corners, edges, lines, etc) in the two images and after analyzes the correspondence.*

*In this work the accuracy level of DSM extracted with the scientific software SISAR developed by the University of Rome "La Sapienza" is evaluated; the software is able to orientate the high resolution satellite imagery and to generate the RPCs coefficients starting from own rigorous models.*

*The image matching algorithms, implemented in SISAR software, are the FBM and the ABM, the latter is guided by RPC extracted "ad hoc" for the interest area. With this strategy two DSMs are extracted: the first is extracted from WorldView-1 stereopair and covers the Augusta area (Sicily), it is compared with the Lidar ground truth, the latter is extracted from GeoEye-1 stereopair, it covers the Rome area and a 3D vector cartography at 1:2000 scale is used as ground truth for DSM accuracy assessment.*

## **Introduzione**

I modelli digitali del terreno sono ormai di fondamentale importanza per il loro utilizzo in diverse applicazioni, come la produzione di ortofoto, *change detection* spaziale e temporale, analisi spaziali, visualizzazione dei dati. Le tecniche per l'acquisizione del dato altimetrico sono varie: rilievi lidar, rilievi satellitari, fotogrammetria aerea. L'estrazione di DSM da stereo coppie satellitari ad alta risoluzione si presenta come un'alternativa molto vantaggiosa, grazie alla semplicità di acquisizione dei dati e alla disponibilità di numerosi software commerciali e di algoritmi in grado di estrarre modelli digitali 3D (Toutin,2000).

Grazie ai satelliti ad alta risoluzione lanciati in orbita nell'ultimo decennio i prodotti estratti da stereo coppie satellitari raggiungono accuratèzze elevate, confrontabili con quelle relative a prodotti estratti con rilievi aereofotogrammetrici.

Nel presente lavoro è stata posta l'attenzione sulle possibilità di estrarre DSM da immagini acquisite dai satelliti ad alta risoluzione quali WorldView-1 e GeoEye-1 utilizzando, sia per l'orientamento che per il processo di matching e infine per l'estrazione del DSM, sia il software scientifico SISAR sviluppato presso l'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma che il software commerciale *OrthoEngine* v:10.2. Per valutare la precisione degli algoritmi implementati all'interno del software scientifico e l'accuratezza dei DSM estratti, quest'ultimi sono stati confrontati con DSM di riferimento di elevata accuratezza.

La prima parte del lavoro è dedicata a considerazioni riguardanti l'orientamento delle stereo coppie WorldView-1 e GeoEye-1, eseguite sia con il software commerciale *OrthoEngine* v.10.2 che con il software scientifico SISAR utilizzando entrambi i modelli di orientamento (modello rigoroso e modello RPC). La seconda parte è invece dedicata alla fase di estrazione del DSM e alla valutazione della sua accuratezza, attraverso i confronti con i rispettivi DSM di riferimento.

## **Orientamento delle stereo coppie WorldView-1 e GeoEye-1**

La stereo coppia acquisita in modalità *in-track* dal satellite WorldView-1 copre un'area di circa 400 km<sup>2</sup> nella zona della città di Augusta (Sicilia - Sud Italia); è stata acquisita nel Giugno del 2008. Le due immagini inoltre sono acquisite una in modalità "*forward*", ossia da Nord a Sud, con angolo di off-nadir di 66° e l'altra in modalità "*reverse*", ossia da Sud a Nord, con angolo di off-nadir di 82°, con una risoluzione spaziale media a terra di 0.55 m.

La stereo coppia acquisita dal sensore GeoEye-1, anche essa in modalità *in-track* e "*Reverse*", copre l'area della città di Roma, il suo GSD è di 0.50 m, inoltre è stata acquisita nel mese di Dicembre del 2009 alle 8:00 del mattino con inclinazione del Sole di 24° (Toutin,2004).

Entrambe le immagini sono state orientate con il software commerciale *OrthoEngine* e con il software scientifico SISAR utilizzando il modello rigoroso e il modello RPC. L'orientamento con il modello rigoroso è stato eseguito utilizzando rispettivamente 9 dei 16 *Ground Control Points* – GCPs per l'immagine di WorldView-1 e 10 dei 29 GCPs per l'immagine di GeoEye-1. Per l'orientamento della stereo coppia GeoEye-1 con il modello RPC, utilizzando gli RPC forniti insieme al file di metadata, le prove sono state eseguite senza l'utilizzo di punti a terra e con 1 e 3 GCPs, numero necessario per la stima rispettivamente di una traslazione e di una trasformazione

affine. Si vuole far notare che mentre per la prima immagine i punti sono uniformemente distribuiti sull'intera stereocoppia per la seconda i GCP a disposizione si trovano nell'angolo Nord Ovest dell'immagine per cui solo quella parte dell'immagine è stata analizzata (Fig.1). Tutti i punti sia quelli di Augusta che quelli di Roma sono stati acquisiti con rilievi GPS in modalità RTK con accuratezza media dell'ordine di 0.1 m in planimetria e 0.2 m in quota (Crespi et al., 2009).

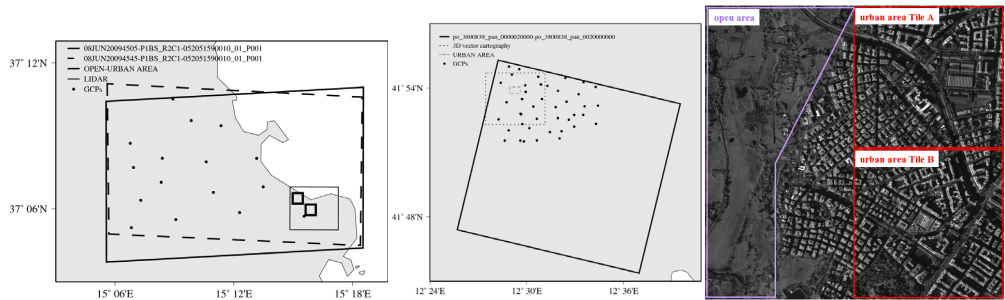


Fig. 1 – Stereo coppie WorldView-1 (a) e GeoEye-1 (b), loro copertura e distribuzione dei GCP.

Modello Rigoroso							
		RMSE CP					
		SISAR			OrthoEngine		
Sensore	# GCP	Est [m]	Nord [m]	Quota [m]	Est [m]	Nord [m]	Quota [m]
WorldView-1	9	0.61	0.32	1.08	1.55	1.65	3.37
GeoEye-1	10	0.50	0.87	1.14	1.24	0.71	1.59
Modello RPC							
Sensore	# GCP	Est [m]	Nord [m]	Quota [m]	Est [m]	Nord [m]	Quota [m]
GeoEye-1	0	3.81	3.59	4.58	Non disponibili		
	1	0.54	0.62	1.45			
	3	1.04	0.56	1.51			

Tabella 1 – Risultati dell'orientamento delle stereocoppie acquisite da WorldView-1 e GeoEye-1 usando il modello rigoroso e il modello RPC.

I risultati dell'orientamento con il modello rigoroso, riportati in Tabella 1, mostrano ottime accuratezze ottenute con il software SISAR per quanto riguarda l'immagine Worldview-1 dell'ordine del 0.5-1 pixel in planimetria e 1.5 pixel in quota mentre il software *OrthoEngine* mostra accuratezze dell'ordine 1.5 pixel in planimetria e molto elevate in quota (circa 6.5 pixel) dovute probabilmente a un'errata modellizzazione della modalità di acquisizione delle immagini; infatti si ricorda che le due strisciate sono state acquisite una in modalità "forward" e l'altra in modalità "reverse". Il livello di accuratezza per l'immagine di GeoEye-1 è circa dello stesso ordine di grandezza per entrambi i software (leggermente più accurato è SISAR nella componente Est e in quota mentre lo è *OrthoEngine* nella componente Nord).

Per quanto riguarda il modello RPC, utilizzato esclusivamente per orientare la stereo coppia GeoEye-1, sono riportati le accuratezze ottenute utilizzando rispettivamente zero, uno, tre GCPs. Non è stato possibile effettuare un confronto tra i due software in quanto con *OrthoEngine* non è possibile visualizzare i risultati delle accuratezze della stereo coppia sui CPs.

### Generazione dei DSM dalle stereo coppie WorldView-1 e GeoEye-1 e valutazione dell'accuratezza

L'*image matching* e l'estrazione dei DSM sono state eseguite sia con il software commerciale *OrthoEngine* v.10.2 che con il software scientifico SISAR.

Le tecniche di matching utilizzate all'interno del software *OrthoEngine* non sono note mentre all'interno del software SISAR è stato implementato un *tool* per la ricerca dei punti omologhi, la metodologia di matching è basata sulla combinazione dell'ABM con il modello di orientamento RPC servendosi di un set di punti (circa 5 uniformemente distribuiti) collimati sulle due immagini. La corrispondenza tra punti omologhi è trovata con il processo di cross-correlazione e raffinata con il *Least Square Matching* (LMS); sono considerati corrispondenti tutti quei punti in cui il coefficiente di correlazione supera una certa soglia scelta per entrambe le immagini pari a 0.60. I punti sono poi restituiti con il software SISAR: per la stereo coppia WorldView-1 con il modello rigoroso mentre per la stereo coppia GeoEye-1 con il modello RPC. La nuvola di punti ottenuta è stata interpolata su griglia regolare a maglia quadrata di passo 2 m sia per l'immagine di Augusta che per quella di Roma.

I DSMs ottenuti dalla stereo coppia WorldView-1 sono stati confrontati con il DSM derivante da un rilievo Lidar interpolato con metodo bilineare con maglia avente un passo di 1.5 m e con accuratezze dell'ordine di 10 cm sia in planimetria che in quota, al DSM estratto dalla stereo coppia di GeoEye-1 è stato confrontato con una cartografia 3D a scala 1:2000 con passo di 2 m e accuratezze dell'ordine di 40 cm.

La valutazione dell'accuratezza dei DSM estratti è eseguita servendosi del software DEMANAL (Crespi et al., 2008) sviluppato dal Prof. K. Jacobsen dell'Università di Hannover. Il programma esegue una interpolazione bilineare dei punti del DSM estratto sul DSM di riferimento. I valori di RMSE sono stati calcolati al 95% di probabilità (LE95).

Per valutare il DSM estratto dalla stereo coppia di WorldView-1 sono stati selezionati 2 *tiles* uno costituito solo da area rurale, uno da area urbana al fine di valutare la dipendenza dell'accuratezza dalla copertura del suolo (Fig.2). Come si può osservare nell'immagine (Fig. 2b) rappresentante i DSMs dell'area urbana, l'algoritmo utilizzato nel software scientifico SISAR permette un riconoscimento più dettagliato degli edifici mentre nel DSM estratto con *OrthoEngine* le strade vengono rilevate con molta difficoltà (Crespi et al., 2010b).



Fig. 2 – (a) SISAR DSM (left) e OrthoEngine DSM (right) di Augusta open area (b) SISAR DSM (left) e OrthoEngine DSM (right) di Augusta urban area.

I valori dell'accuratezza in quota, ottenuti con i due software, risultano paragonabili nella *open area* mentre nella *urban area* i valori dello RMSE Z sono dell'ordine dei sei *pixel* per il DSM estratto con SISAR e di nove *pixel* per quello estratto con *OrthoEngine* (Tabella 2).

Per quanto riguarda la zona test di Roma, per entrambi i software sono stati estratti tre *tiles* e la stereo coppia è stata orientata utilizzando rispettivamente zero, uno, tre GCPs. Per tutti le prove effettuate i risultati degli RMSE ottenuti sono riportati in Tabella 3.

Open area				
	% removed points	bias [m]	$\sigma$ [m]	RMSE Z [m]
OrthoEngine	5	-0.04	1.79	1.79
SISAR	5	-0.76	1.50	1.68
Urban area				
	% removed points	bias [m]	$\sigma$ [m]	RMSE Z [m]
OrthoEngine	5	-1.02	4.57	4.68
SISAR	5	0.11	3.06	3.09

Tabella 2 – Confronto risultati DSMs estratti dai due tiles di Augusta.

I valori dell'accuratezza sono sensibilmente superiori rispetto alla *urban area* di Augusta, ciò è dovuto in parte alla morfologia più complicata della zona ma soprattutto alle ombre presenti nelle immagini acquisite con un valore di *sun-elevation* di 24°. Nella Fig. 3 sono evidenziati i contorni degli edifici estrapolati dalla cartografia, anche in questo caso l'algoritmo implementato in SISAR riesce, anche se con difficoltà, a trovare punti omologhi anche nella superficie stradale (Crespi et al., 2010a).

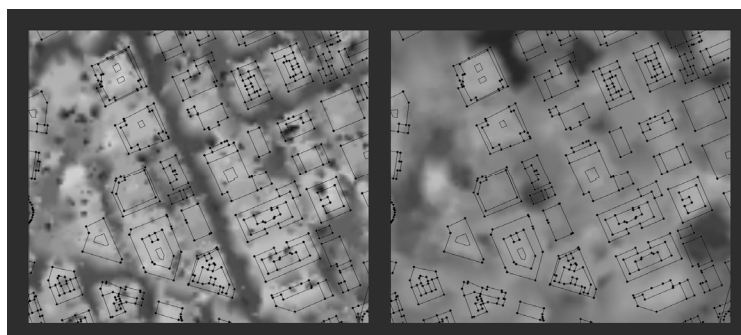


Fig. 3 – SISAR DSM (left) e OrthoEngine DSM (right) di Roma.

open area												
DSM	0 GCP				1 GCP				3 GCPs			
	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]
OrthoEngine	3.45	1.85	-2.92	5.35	1.84	1.84	0.04	5.25	1.92	1.90	-0.30	5.31
SISAR	3.45	1.85	-2.91	5.50	2.08	1.87	0.91	5.70	1.97	1.92	0.44	5.70
urban area Tile A												
DSM	0 GCP				1 GCP				3 GCPs			
	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]
OrthoEngine	14.42	9.33	10.99	22.10	12.01	9.07	-7.88	21.50	11.87	9.08	-7.64	21.50
SISAR	10.30	7.85	-6.67	20.00	8.02	7.55	-2.73	19.80	8.11	7.55	-2.95	19.80
urban area Tile B												
DSM	0 GCP				1 GCP				3 GCPs			
	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	$\sigma$ [m]	bias [m]	LE95 [m]
OrthoEngine	17.52	10.49	-14.03	21.20	14.76	10.06	-10.80	20.00	14.87	9.98	-11.02	19.70
SISAR	11.93	8.94	-7.90	21.50	9.50	8.54	-4.15	20.80	9.77	8.54	-4.75	20.80

Tabella 3 – Confronto risultati DSMs estratti dai tre tiles di Roma.

## Conclusioni

L'alta risoluzione e la buona qualità radiometrica delle immagini acquisite da sensori quali GeoEye-1 e WorldView-1, permettono di generare Modelli Digitali della Superficie (DSM) con accuratezze comparabili con quelli ottenibili da immagini aeree a media scala. L'accuratezza di un DSM dipende dall'orientamento della stereo coppia e dalle strategie di *matching*, entrambe questi processi sono stati approfonditi per migliorare le potenzialità delle immagini satellitari ad alta risoluzione. I risultati ottenuti con i modelli di orientamento sviluppati nel software SISAR sono paragonabili e in alcuni casi migliori di quelli ottenuti con *OrthoEngine*. Ad esempio SISAR per quanto riguarda l'immagine Worldview-1 i risultati dell'orientamento con il modello rigoroso sono dell'ordine di 0.5-1 pixel in planimetria e 1.5 pixel in quota mentre il software *OrthoEngine* mostra accuratezze dell'ordine 1.5 pixel in planimetria e molto elevate in quota (circa 6.5 pixel) dovute probabilmente a un'errata modellizzazione della modalità di acquisizione delle immagini.

L'algoritmo sviluppato per effettuare il *matching*, implementato in SISAR, è stato testato nelle varie aree scelte, si è notato come sia promettente il comportamento soprattutto nelle aree urbane, dove normalmente i classici algoritmi di *matching* incontrano difficoltà nel trovare la correlazione. Nella stereo coppia di WorldView-1 l'accuratezza raggiunta con SISAR si attesta intorno a 3 pixel nella *open area* e 6 pixel nella *urban area*. Altri test saranno necessari per valutare al meglio le potenzialità del sensore GeoEye-1 in quanto entrambi i software generano dei DSMs con una accuratezza di circa 10 metri, sicuramente non rappresentativi rispetto alle risoluzioni delle immagini.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano e-Geos S.p.A., Roma (Italia) per averci fornito le immagini di WorldView-1 e di GeoEye-1, e il Prof. K. Jacobsen per aver reso disponibile il software DEMANAL.

## Bibliografia

- M. Crespi, P. Capaldo, F. Fratarcangeli, A. Nascetti, F. Pieralice, *Geometric potentiality of GeoEye-1 in track stereo pairs and accuracy assessment of generated digital surface model*. (2010a) Proceedings EARSel Symposium, Parigi, Francia.
- M. Crespi, P. Capaldo, F. Fratarcangeli, A. Nascetti, F. Pieralice, *Stereo image matching strategies: implementation of algorithms based on corner detection and dynamic programming*. (2010b) Proceedings IEEE gold remote sensing conference, Livorno, Italia.
- M. Crespi, F. Fratarcangeli, F. Giannone, F. Pieralice, Chapter 4 - *Overview on models for high resolution satellites imagery orientation*. (2009) In: D. Li, J. Shan, J. Gong (Eds.) *Geospatial Technology for Earth Observation data*. Springer, Heidelberg, (ISBN/ISSN: 978-1-4419-0049-4)T.
- M. Crespi, F. Fratarcangeli, F. Giannone, G. Colosimo, F. Pieralice, K. Jacobsen, *Geometric Potential Of Cartosat-1 Stereo Imagery*. (2008) Proceedings of XXI ISPRS Conference, Beijing, China
- T. Toutin, *Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods* (review paper). *International Journal of Remote Sensing* 10 (2004), 1893-1924
- T. Toutin, *Elevation modeling from satellite data*. *Enc. of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation* 10 (2000), 8543-8572