

SVILUPPO E IMPLEMENTAZIONE DI NUOVE STRATEGIE PER L'ESTRAZIONE DI MODELLI DIGITALI DELLA SUPERFICIE DALLE IMMAGINI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE

DSM GENERATION FROM HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGERY: DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A NEW MATCHING STRATEGY

Andrea Nascetti*

Riassunto

Negli ultimi anni sono stati fatti molti progressi tecnologici soprattutto nell'ambito della fotogrammetria satellitare, con la messa in orbita della seconda generazione di satelliti (EROS A e B, QuickBird, Ikonos II, WorldView, GeoEye-1, Cartosat dedicato all'acquisizione di stereocoppie), è possibile ormai utilizzare le immagini digitali ad alta risoluzione con precisione a terra dell'ordine del metro (varia da 0,40 m di GeoEye-1 a 2,5 m di Cartosat). Il telerilevamento satellitare ha dei pregi fondamentali come, per esempio, la possibilità di eseguire acquisizioni a intervalli regolari, garantendo così un monitoraggio continuo della zona, o la possibilità di acquisire dati in territori in via di sviluppo dove è più complicato e costoso organizzare dei voli fotogrammetrici. Viste le grandi potenzialità delle immagini pancromatiche satellitari ultimamente sono nati vari progetti di ricerca sull'interpretazione ed estrazione dei dati metrici. Una fondamentale operazione di elaborazione delle immagini satellitari è l'ortorettificazione. Questo processo consente di eliminare le distorsioni indotte dalla posizione e assetto del satellite rispetto alla Terra e dalle caratteristiche ottico-geometriche del sensore. Esistono due metodologie differenti per orto-rettificare le immagini, le funzioni polinomiali razionali (RPF-Rational Polynomial Function) o il modello rigoroso.

Oltre al prodotto bidimensionale ottenuto dalla singola immagine satellitare orto-rettificata è possibile utilizzare una stereo-coppia per estrarre un modello digitale del terreno (Digital Elevation Model). Il DEM è la rappresentazione dei valori continui di elevazione sopra una superficie topografica con un array regolare di valori di quota, riferiti allo stesso datum (definizione dell'ESRI).

Attualmente la realizzazione e l'utilizzo dei DEM ha subito un incremento sempre maggiore, dovuto al potenziale uso in molti campi di applicazione dalle cartografia alla geotecnica. Inoltre i DEM sono un'importante banca dati da cui poter ottenere molti prodotti secondari come curve di livello, profili, volumi e modelli di pendenza, ecc...

La sempre maggiore capacità di calcolo degli elaboratori unita alla grande richiesta interdisciplinare dei DEM ha incrementato enormemente la continua ricerca di nuovi e più complessi algoritmi.

Per l'estrazione dei DEM dalle immagini satellitari sono necessarie varie elaborazioni fotogrammetriche, si possono distinguere principalmente due fasi: l'orientamento delle immagini satellitari e il processo di matching.

* DICEA - Area di Geodesia e Geomatica – Università di Roma "La Sapienza" Via Eudossiana, 18 - 00184 Rome, Italy
andrea.nascetti@uniroma1.it

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).

Il matching è il processo che permette il riconoscimento dei punti omologhi fra le due immagini, ovvero dei medesimi punti a terra ripresi sui due fotogrammi. In questa maniera si ottiene una nuvola di punti corrispondenti nelle due immagini e così, conoscendo la geometria di acquisizione, si è in grado di costruire il modello tridimensionale del terreno.

Possiamo distinguere due classi principali di algoritmi per il matching l'*Area Based Matching* (ABM) e il *Feature Based Matching* (FBM). L'ABM si basa sulla diretta correlazione tra i valori della radianza fra l'intorno del punto fissato sull'immagine master e l'intorno di un punto mobile sull'immagine slave. In questo modo si ricercano i punti omologhi dove è massimo il valore della correlazione. Il FBM ricerca prima delle *features* (punti, angoli, bordi o anche poligoni) in entrambe le immagini e in un secondo momento analizza la corrispondenza fra esse.

Il tema principale della ricerca è stato quello di sviluppare una metodologia completa atta a processare il Matching, è stato quindi implementato un nuovo algoritmo nel quale la fase del Matching è stata combinata con quella di orientamento. La strategia usata per unificare le due fasi è stata quella di utilizzare i coefficienti RPC per caratterizzare le deformazioni delle immagini stimando una serie di trasformazioni affini e poi impiegare un Least Square Matching (una particolare tecnica di ABM) guidato da queste trasformazioni affini per la ricerca della correlazione.

Finita la fase di sviluppo, sono stati effettuati molti test, alcuni su di una stereo-coppia della zona costiera di Augusta (Siracusa - Sicilia - Italia) acquisita con il satellite ad alta risoluzione WorldView-1 e altri su una stereo-coppia di Roma acquisita con il sensore GeoEye-1. In questi test è stata valutata la robustezza, la precisione e l'accuratezza del nuovo software. Innanzitutto nei risultati è stata valutata l'accuratezza raggiunta tramite il confronto tra i DSM estratti e quelli di riferimento e inseguito sono state comparate le accuratèzze tra il nuovo software e il software commerciale *PCI Geomatics OrthoEngine*. Le accuratèzze raggiunte sono paragonabili o in certi casi inferiori rispetto a quelle ottenute con il software commerciale.

In conclusione il nuovo algoritmo implementato nel software ha dato i risultati sperati aprendo nuove possibilità per uno sviluppo futuro dei processi di matching, attualmente sono in corso ulteriori ricerche riguardo l'utilizzo di una programmazione dinamica e adattiva dell'algoritmo.

Abstract

Surface Models (DSMs) have large relevance in many engineering, land planning and environmental applications for a long time. At present, the data required for the DSMs generation can be acquired by several sensors/techniques, among which airborne LiDAR, aerial photogrammetry, optical and radar spaceborne sensors play the major role. In this respect, the availability of new high resolution optical spaceborne sensors offers new interesting potentialities for DSMs generation, among which low cost, speed of data acquisition and processing and relaxed logistic requirements, quite important for the areas where the organization of aerial flights can be difficult for several motivations.

Thanks to the very high resolution and the good radiometric quality of the images, it seems possible to extract DSMs comparable to middle scale aerial products; anyway, it has to be underlined that the DSM accuracy level is strictly related both to the quality of the stereo image orientation and to the effectiveness of the matching strategy.

Two different types of orientation models are usually adopted: the physical sensor models

(also called rigorous models or geometric reconstruction) and the generalized sensor models. The first one is based on a standard photogrammetric approach, where the image and the ground coordinates are linked through the collinearity equations, so that the involved parameters have a physical meaning. On the contrary, the generalized models are usually based on the Rational Polynomial Functions (RPFs), which link image and terrain coordinates through the Rational Polynomial Coefficients (RPCs) and eventual additional transformation parameters [Tao and Hu, 2001, 2002; Fraser and Hanley, 2003; Hanley and Fraser, 2004; Crespi et Al., 2009].

As regards the matching, it is well known that many different approaches have been developed in recent years. In all methods, the main step is to define the matching entity, that is a primitive chosen in the master image to be looked for in the slave image(s); basically, we can distinguish two techniques, the Area Based Matching (ABM) and the Feature Based Matching (FBM). In ABM methods, a small image window represents the matching primitive and the main strategies to assess similarity are cross-correlation and Least Squares Matching (LSM). FBM methods use, as main class of matching, basic features that are typically the easily distinguishable primitives in the input images, like corners, edges, lines, etc. [Gruen A. W. 1985; Jacobsen, 2006; Nascetti, 2009; Tang L. et al., 2002]. In addition, new matching strategies where ABM is used together with dynamic programming techniques were proposed during last decade [Birchfield S. and Tomasi C., 1998, 1999]; recently the quite promising technique of semi-global matching was proposed and applied to aerial imagery [Hirschmüller, 2008; Hirschmüller and Scharstein, 2009].

In this paper we present and discuss some results obtained with a new proprietary matching strategy for DSMs generation, which is implemented into the SISAR software developed at the Area di Geodesia e Geomatica – Università di Roma "La Sapienza". In order to assess the accuracy of the new strategy, some tests were carried out, using a stereo pair of Augusta coastal zone (Sicily, South Italy) acquired from WorldView-1 and one of the first available GeoEye-1 stereo pair, which was acquired over Rome. The results show that an accuracy at the level of about 2 m is achievable in open areas with both WorldView-1 and GeoEye-1 stereo pairs, whereas higher errors are displayed in urban areas. For WorldView-1 the results are still acceptable, being the accuracy at the level of 3 meters, but for GeoEye-1 the DSM extracted over a very dense urban area are much worse, with an accuracy at the level of 8-10 meters. Nonetheless, the new matching strategy has been proven effective, performing always better if compared with the one implemented into a well known and largely used software as PCI-Geomatics.

In order to evaluate the potentiality of the new matching strategy and the accuracy of the extracted DSMs, some tests were carried out. In details, two stereo pairs acquired by WorldView-1 and GeoEye-1 satellites have been used to compare the DSMs generated with the new strategy to those derived using the well known commercial software PCI Geomatics v.10.2 (OrthoEngine).

I. Introduzione

Per ottenere le principali informazioni metriche necessarie alla ricostruzione piano-altimetrica di un'area, profili e sezioni dell'opera si possono utilizzare sia metodi tradizionali di misura a terra come livelli, teodoliti, rilievi con GPS, sia metodi di telerilevamento. Il telerilevamento, in inglese Remote Sensing, è la disciplina scientifica che mediante misure di radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa permette di ricavare informazioni qualitative e quantitative sull'ambiente o su oggetti distanti.

Frequentemente data la vastità dell'area da indagare per la produzione della cartografia sono utilizzate tecniche di fotogrammetria aerea e satellitare. Negli ultimi anni sono stati fatti molti progressi tecnologici

soprattutto nell'ambito della fotogrammetria satellitare, con la messa in orbita della seconda generazione di satelliti (EROS A e B, QuickBird, Ikonos II, WorldView, GeoEye- I, Cartosat dedicato alla acquisizione di stereocoppie) è possibile ormai utilizzare le immagini digitali ad alta risoluzione con precisione a terra dell'ordine del metro (varia da 0.40m di GeoEye- I a 2.5m di Cartosat). Il telerilevamento satellitare ha dei pregi fondamentali come, per esempio, la possibilità di eseguire acquisizioni a intervalli regolari, garantendo così un monitoraggio continuo della zona, o la possibilità di acquisire dati in territori in via di sviluppo dove è più complicato e costoso organizzare dei voli fotogrammetrici.

Le immagini satellitari ad alta risoluzione si sono definitivamente affermate come strumento in grado di fornire dati preziosi nello studio della superficie terrestre. Tuttavia, le immagini acquisite dai sensori, prima di essere utilizzate a scopi metrici (per la produzione di ortofotocarte o di modelli digitali delle superfici), vanno corrette in quanto affette da una serie di deformazioni, dovute principalmente alla modalità di acquisizione e alla morfologia del terreno. Questo processo di rimozione delle distorsioni prende il nome di ortorettificazione.

Esistono due classi principali di modelli di orientamento delle immagini satellitari: il modello rigoroso, basato sulle equazioni di collinearità, e il modello generico in cui la trasformazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto viene descritta tramite una relazione funzionale di tipo matematico, non tenendo conto del processo fisico-geometrico di acquisizione dell' immagine (RPC). In seguito all'orientamento delle immagini, il passo necessario per l'estrazione di un modello digitale della superficie (DSM) è il *Matching* tra le immagini.

I modelli digitali della superficie 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-I e GeoEye- I utilizzando, per l'orientamento, 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 *PCI Geomatics OrthoEngine v10.2*. Per esplorare le potenzialità dell'algoritmo implementato all'interno del software scientifico l'accuratèzza dei DSM estratti è stata valutata effettuando confronti con DSM di riferimento di elevata accuratèzza.

La prima parte del lavoro è dedicata a considerazioni riguardanti l'orientamento delle stereo coppie WorldView-I e GeoEye- I, 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 accuratèzza, attraverso i confronti con i rispettivi DSM di riferimento.

2. Risultati dell'orientamento delle stereo coppie WorldView-I e GeoEye-I

La stereo coppia acquisita in modalità *in-track* dal satellite WorldView-I copre un'area di circa 400 km² nella zona della città di Augusta (Sicilia - Sud Italia); è stata acquisita nel Giugno del 2008. Le due immagini

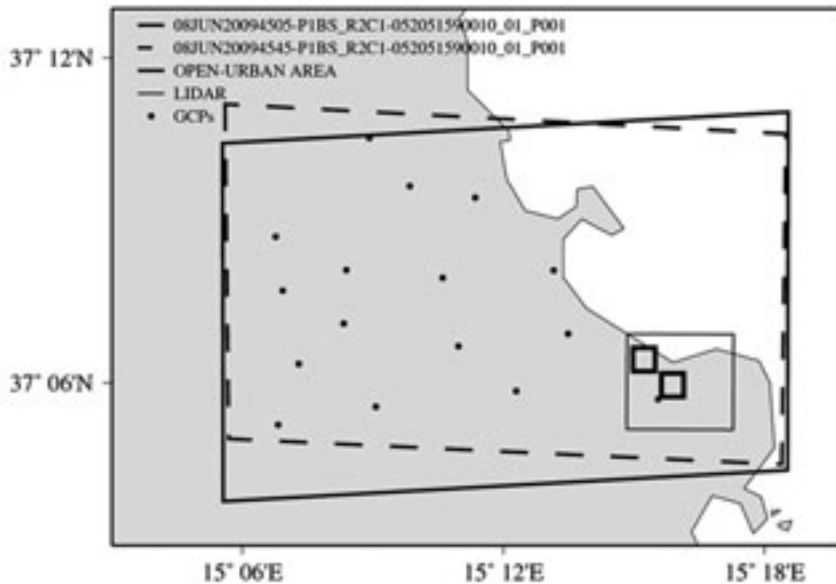


Fig. 1 - Area di Augusta, distribuzione dei GCPs e dei tiles.

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) disponibili per l'immagine di WorldView-1 e 10 dei 29 GCPs per l'immagine di GeoEye-1 (Fig. 1 e Fig. 2a).

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. 2a). 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).

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

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			

Tab. 1 - Risultati dell'orientamento delle stereo-coppie acquisite da WorldView-1 e GeoEye-1 usando il modello rigoroso e il modello RPC.

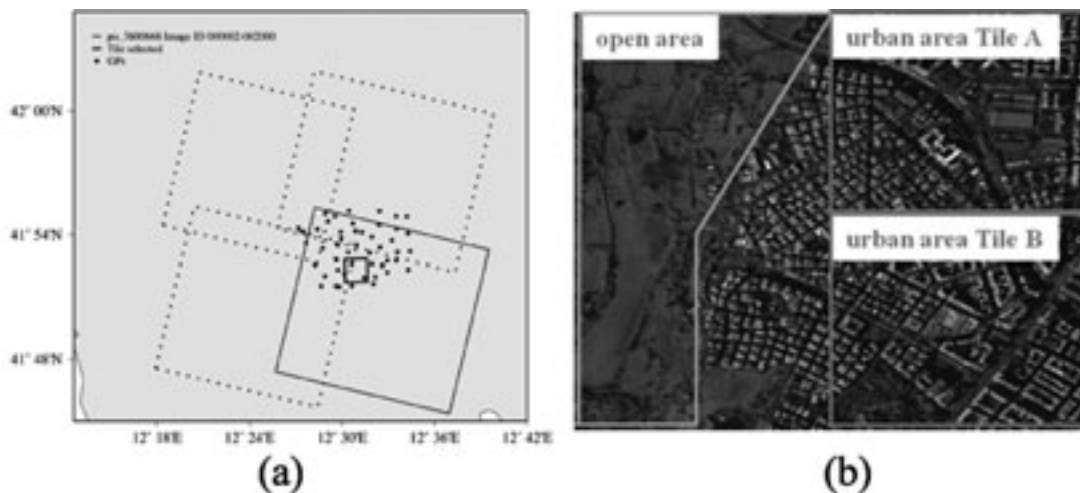


Fig. 2 - Area di Roma - (a) Distribuzione dei GCPs (b) tiles selezionati.

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 accuratze 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 accuratze della stereo coppia sui CPs.

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

Per quanto riguarda l'*image matching* il punto cruciale è definire una strategia per l'individuazione dei punti omologhi. Le tecniche classiche, di cui si è già parlato (ABM e FBM), non sembrano essere in grado di modellizzare correttamente le complesse deformazioni presenti nelle aree urbane. Qui di seguito viene presentato un metodo avanzato di *image matching* basato su una soluzione gerarchica, simile a quella già sviluppata da altri autori (Zhang and Gruen, 2006), con un'effettiva combinazione di un algoritmo di ABM con i vincoli geometrici imposti dal modello di orientamento.

Le deformazioni presenti nelle immagini satellitari vengono modellizzate utilizzando una serie di trasformazioni affini stimate a partire dai coefficienti RPC. Successivamente per trovare la corrispondenza tra punti omologhi vengono utilizzate le trasformazioni affini; sono considerati corrispondenti tutti quei punti in cui il coefficiente di cross-correlazione supera una certa soglia scelta. Infine per raffinare la posizione dei punti viene utilizzato un *Least Square Matching* (LMS), in questo modo è possibile raggiungere una precisione sub-pixel. In questa maniera è stato possibile, collegando la fase dell'orientamento a quella del *matching*, migliorare i risultati in termini di accuratezza dei DSM nelle aree urbane.

Per valutare le potenzialità della nuova strategia sviluppata, il processo di estrazione dei DSMs è stato eseguito sia con il software commerciale *OrthoEngine* v.10.2 che con l'algoritmo implementato all'interno del software scientifico SISAR. La tecnica di *matching* utilizzate all'interno del software *OrthoEngine* non sono note, comunque sia, osservando i DSM, si può presumere che la ricerca dei punti sia stata effettuata utilizzando una mappa di disparità ottenuta con una programmazione dinamica (Birchfield and Tomasi, 1998, 1999), sono ben visibili le "stripes" tipiche di questa tecnica.

Per valutare l'accuratezza sono stati effettuati vari test, selezionando diversi tiles, sia per la stereocoppia di Worldview-1 che per quella di GeoEye-1, al fine di investigare anche gli effetti dovuti alla diversa morfologia del terreno (Fig. 2b e Fig. 3).

Le coppie di punti omologhi vengono poi restituite con il software SISAR: per la stereo coppia WorldView-1 utilizzando il modello rigoroso mentre per la stereo coppia GeoEye-1 il modello RPC. La nuvola di punti a terra ottenuta è stata interpolata su griglia regolare a maglia quadrata di passo 2 m sia per la stereocoppia di Augusta che per quella di Roma.



Fig. 4 - Cartografia 3D scala 1:2000.

La valutazione dell'accuratezza di tutti i DSMs 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).

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 accuratze dell'ordine di 10 cm sia in planimetria che in quota; i DSMs estratti dalla stereo coppia di GeoEye-1 sono stati confrontati con una cartografia 3D a scala 1:2000 con passo di 2 m e accuratze dell'ordine di 40 cm (Fig. 4).

Open area				
	% removed points	bias [m]	σ [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]	σ [m]	RMSE Z [m]
OrthoEngine	5	-1.02	4.57	4.68
SISAR	5	0.11	3.06	3.09

Tab. 2 - Confronto risultati DSMs estratti dai due tiles di Augusta.

3.1 Risultati DSM estratti dalla stereo-coppia WorldView-1

Per valutare i DSMs estratti 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. 3a e Fig. 3b). I valori dell'accuratezza in quota (RMSE Z nella Tab. 2), ottenuti con i due software, risultano paragonabili nell'area rurale; leggermente inferiore il valore dell'errore per il software SISAR anche se il DSM estratto presenta un bias maggiore rispetto a quello di *OrthoEngine* (approssimativamente di 70cm).

Nell'area urbana il DSM del software *OrthoEngine* presenta un'accuratezza decisamente inferiore rispetto al DSM ottenuto con il software scientifico SISAR (Tab.2), 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*. Come si può osservare nell'immagine (Fig. 5b e d) 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). In entrambi i DSMs ci sono delle zone di *nodata value* (macchie nere), dove non è stato possibile ricostruire la morfologia del terreno, inoltre nel DSM di *OrthoEngine* sono presenti anche delle zone bianche, dove i valori erronei dell'elevazione (dell'ordine delle centinaia di metri) sono dovuti a errori nella fase del *matching*.

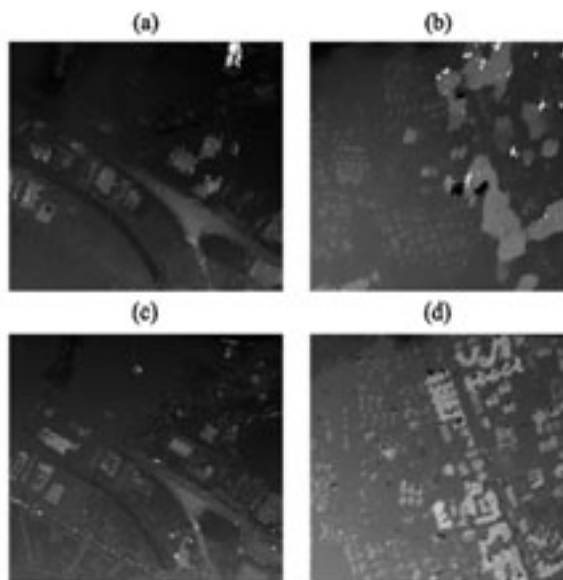


Fig. 5 - Area di Augusta - (a) *OrthoEngine* DSM e (c) *SISAR* DSM dell'area rurale, (b) *OrthoEngine* DSM e (d) *SISAR* DSM dell'area urbana (sotto).

3.2 Risultati DSM estratti dalla stereo-coppia GeoEye-1

Per quanto riguarda la zona test di Roma, per entrambi i software sono stati estratti tre *tiles*, uno in un'area aperta e altri due in zone fortemente edificate (Fig. 2b). La stereo coppia è stata orientata tramite il modello RPC utilizzando rispettivamente zero, uno, tre GCPs. Per tutte le prove effettuate i risultati degli RMSE Z ottenuti sono riportati in Tab. 3.

Nell'area di campagna il comportamento dei due software è praticamente identico e il livello di accuratezza raggiunto in termini di RMSE è pari a 3,5 m utilizzando zero GCP e di circa 2 m con uno e tre GCP; si nota come non c'è un sostanziale miglioramento utilizzando un numero superiore di GCP. Si può notare inoltre che per entrambi i software il termine sigma risulta essere indipendente rispetto al numero di GCP utilizzati.

In entrambi i *tiles* urbani, grazie al nuovo algoritmo di *matching* implementato in SISAR, i DSMs estratti risultano essere sempre più accurati rispetto a quelli di *OrthoEngine* (Tab. 3), anche se l'accuratezza in termini di RMSE non risulta essere soddisfacente se paragonata con quella che si è ottenuta nell'area urbana di Augusta con le immagini di *WorldView-1*. Nel *Tile A* i risultati migliori in termini di RMSE si attestano sull'ordine dei 12 m di *OrthoEngine* e 8 m di SISAR utilizzando 1 GCP. Nel *Tile B* la differenza fra i due software è ancora più marcata in termini di bias (differenze comprese tra 6-7 m in valore assoluto).

Area di Campagna												
DSM	0 GCP				1 GCP				3 GCPs			
	RMSE [m]	σ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	σ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	σ [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
Area Urbana Tile A												
DSM	0 GCP				1 GCP				3 GCPs			
	RMSE [m]	σ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	σ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	σ [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
Area Urbana Tile B												
DSM	0 GCP				1 GCP				3 GCPs			
	RMSE [m]	σ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	σ [m]	bias [m]	LE95 [m]	RMSE [m]	σ [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

Tab.3 - Risultati dei DSM estratti dalla stereo-coppia di GeoEye-1.

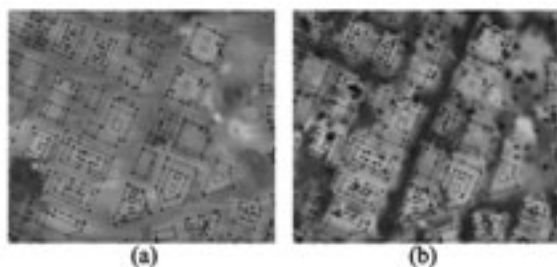


Fig. 6 - Area di Roma - (a) SISAR DSM e (b) OrthoEngine DSM.

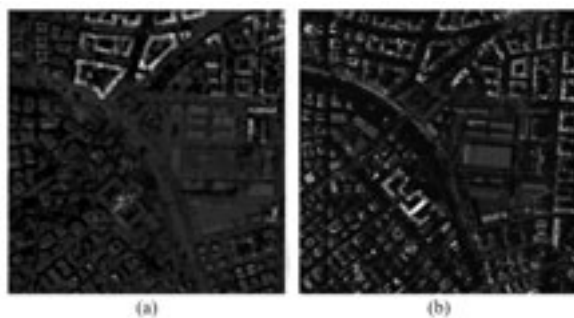


Fig. 7 - Mappa dell'errore (a) e immagine (b) del Tile A di Roma.

Per analizzare le cause di questi scarsi risultati e comprendere meglio il differente comportamento dei due software sono state effettuate ulteriori verifiche. Nella Fig. 6 sono stati sovrapposti i contorni degli edifici estrapolati dalla cartografia ai i DSM ottenuti con i due software, anche in questo caso l'algoritmo implementato in SISAR riesce, anche se con difficoltà, a trovare punti omologhi nella superficie stradale (Crespi et al., 2010a) al contrario il software *OrthoEngine* non riesce a modellizzare correttamente la morfologia complicate dell'are urbana di Roma.

Inoltre è stata calcolata la mappa dell'errore del DSM di SISAR del *tile A* nella quale, Fig. 7a, si possono distinguere facilmente delle aree nere di errore corrispondenti alle zone alberate, ricostruite correttamente dal software ma non presenti nella cartografia a scala 1:2000 utilizzata come DSM di riferimento. Partendo da queste considerazioni, i DSMs sono stati valutati solamente nelle aree degli edifici ottenendo dei risultati migliori anche se non ancora soddisfacenti (5 m di sigma e 1.5 m di bias).

4. Conclusioni

In conclusione le nuove tecniche e metodologie di rilievo e d'indagine del territorio tramite telerilevamento sono uno strumento indispensabile per l'aggiornamento della cartografia e dei dati catastali oltre che per studi d'impatto ambientale, monitoraggio del territorio e progettazione d'infrastrutture.

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*, entrambi 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 il software commerciale *OrthoEngine*. Ad esempio nel software 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.

Il tema principale della ricerca è stato quello di sviluppare una metodologia completa atta a processare il Matching, è stato quindi implementato un nuovo algoritmo nel quale la fase del Matching è stata combinata con quella di orientamento.

L'algoritmo sviluppato per effettuare il *matching*, implementato all'interno del software 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 potenzialità del sensore.

Ringraziamenti

L'autore ringrazia sinceramente il Prof. K. Jacobsen per aver reso disponibile il software scientifico DEMANAL e la società e-Geos S.p.a. per aver fornito le stereo-coppie di WorldView-1 e di GeoEye-1. Inoltre ringrazia il Prof. M. Crespi e tutti i colleghi e amici che quotidianamente collaborano attivamente all'attività di ricerca.

Bibliografia

- BIRCHFIELD S., TOMASI C. (1998) - *A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(4): 401-406
- BIRCHFIELD S., TOMASI C. (1999) - *Depth discontinuities by pixel-to pixel stereo*. International Journal of Computer Vision, 35(3): 269-293
- CRESPI M., FRATARCANGELI F., GIANNONE F., COLOSIMO G., PIERALICE F., JACOBSEN K. (2008), *Geometric Potential Of Cartosat-1 Stereo Imagery*, Proceedings of XXI ISPRS Conference, Beijing, China
- CRESPI M., FRATARCANGELI F., GIANNONE F., PIERALICE F. (2009) - *Overview on models for high resolution satellites imagery orientation*, Li D., Shan J., Gong J. (Eds.), Geospatial Technology for Earth Observation data, Springer, Heidelberg Chapter 4
- FRASER C. S. AND HANLEY H. B. (2003). *Bias compensation in rational functions for Ikonos satellite imagery*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 69(1), pp. 53-57
- CRESPI M., CAPALDO P., FRATARCANGELI F., NASCETTI A., PIERALICE F. (2010a), *Geometric potentiality of GeoEye-1 in track stereo pairs and accuracy assessment of generated digital surface model*. Proceedings EARSeL Symposium, Parigi, Francia.
- CRESPI M., CAPALDO P., FRATARCANGELI F., NASCETTI A., PIERALICE F. (2010b), *Stereo image matching strategies: implementation of algorithms based on corner detection and dynamic programming* Proceedings IEEE gold remote sensing conference, Livorno, Italia.
- GRUEN A. W. (1985) *Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique*
- HANLEY H. B., FRASER C. S. (2004). *Sensor orientation for high-resolution satellite imagery: further insights into bias-compensated RPC*. <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm1/papers/5.pdf>
- HIRSCHMÜLLER H. (2008). *Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 30(2), February 2008, pp. 328-341.
- HIRSCHMÜLLER H. AND SCHARSTEIN D. (2009). *Evaluation of Stereo Matching Costs on Images with Radiometric Differences*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 31(9), September 2009, pp. 1582-1599.
- JACOBSEN K. (2006). *Digital Surface Models of city areas by very high resolution space imagery*. Proceedings of the 1st EARSeL Workshop of the SIG Urban Remote Sensing, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany
- NASCETTI A. (2009). *A stereo image matching strategy based on corner detection and least squares refine-*

ment: algorithm implementation in IDL development environment and testing over high resolution satellite imagery. Degree Thesis (not published)

- TAO C. V., HU Y. (2001). *A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing.* Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 67(12), pp. 1347-1357
- TAO C. V. AND HU Y. (2002). *3D reconstruction methods based on the rational function model.* Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 68(7), pp.705-714
- TANG L., WU C., CHEN Z. (2002) *Image dense matching based on region growth with adaptive window* Pattern Recognition Letters 23 | 169–1178
- TOUTIN T. (2004), *Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods,* International Journal of Remote Sensing 10 p. 1893-1924
- TOUTIN T. (2000), *Elevation modeling from satellite data,* Enc. of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation 10 p. 8543-8572
- ZHANG L., GRUEN A. (2006). *Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery.* ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 60: p. 195–211