

Applicazione e valutazione di accuratezza di un modello radargrammetrico per stereo coppie COSMO-SkyMed acquisite in modalità Spotlight

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

I modelli digitali della superficie (DSMs) sono di fondamentale importanza per il loro utilizzo in molteplici applicazioni, come la produzione di ortofoto, analisi di *change detection*, analisi spaziali, visualizzazione dei dati.

La generazione di modelli digitali 3D a partire da dati SAR si basa principalmente su tecniche interferometriche o radargrammetriche, entrambe basate sull'utilizzo di una coppia di immagini della stessa area acquisite da due punti di presa diversi. Attualmente la costellazione di satelliti italiani COSMO-SkyMed permette l'acquisizione di immagini ad alta risoluzione in modalità Spotlight (fino ad 1 m), tipologia di dati idonea alle applicazioni radargrammetriche, grazie alla elevata risoluzione in ampiezza.

La generazione di un modello digitale del terreno richiede due fasi fondamentali: l'orientamento della stereo coppia e il matching per il riconoscimento dei punti omologhi sulle due immagini. Il presente lavoro è dedicato allo sviluppo e alla valutazione di un modello di orientamento per stereo coppie SAR, basato sulla ricostruzione della geometria della presa e del segmento orbitale.

Il modello sviluppato, implementato nel *software* scientifico SISAR (Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione), è stato testato su due stereo coppie acquisite in modalità Spotlight su una zona della Francia meridionale (Mausanne) e su una zona dell'Italia settentrionale (Merano). Gli stessi dati sono stati utilizzati all'interno del software commerciale PCI Geomatica v. 10.3, per valutare l'accuratezza dell'orientamento effettuato con il modello rigoroso di Toutin.

Abstract

Digital elevation models have large relevance in some territorial applications, such as topographic mapping, spatial and temporal change detection, feature extraction and data visualization.

Two different methods to extract absolute or relative elevation from SAR data are interferometry and radargrammetry, both using a couple of images of the same area acquired from two different points of view.

At present, the importance of the radargrammetric approach is rapidly growing due to the new high resolution imagery (up to 1 m GSD) which can be acquired by COSMO-SkyMed, TerraSAR-X and RADARSAT-2 sensors in Spotlight mode.

It is well known that the two main steps for DSMs generation from SAR imagery according to the radargrammetric approach are the stereo pair orientation and the image matching for the detection of homologous points.

In this paper the topics related to image orientation of SAR stereo pairs through an orientation model based on geometric reconstruction are investigated. The new model, implemented in the scientific software SISAR (Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione) has been tested on two SAR stereo pair acquired in Spotlight mode on the test site of Mausanne (Southern France) and on Merano (Northern Italy). The same data set has been tested in the commercial software PCI

Geomatica v. 10.3, in order to evaluate the accuracy of the orientation performed with Toutin rigorous orientation model.

Introduzione

Negli ultimi anni le tecniche per la generazione di modelli digitali del terreno da dati satellitari acquisiti da sensori ottici e SAR hanno trovato grande sviluppo tra i temi di ricerca nel campo della geomatica.

La generazione di DSMs da stereo coppie satellitari offre diversi vantaggi, tra i quali prezzi contenuti, velocità di acquisizione e processamento dei dati, disponibilità di molti software in commercio per il trattamento dei dati. In particolare i dati SAR hanno il vantaggio di poter essere acquisiti anche in presenza di nuvole e durante la notte.

A causa delle basse risoluzioni in ampiezza disponibili fino ad ora, la tecnica maggiormente utilizzata per la generazione di DSMs da immagini SAR è stata l'interferometria. Attualmente sono stati messi in orbita satelliti capaci di acquisire immagini in ampiezza ad alta risoluzione (fino ad 1 m) in modalità Spotlight, come COSMO-SkyMed, TerraSAR-X and RADARSAT-2.

La disponibilità di questi nuovi dati riapre il campo di indagine sulle applicazioni radargrammetriche e sulle potenzialità dei nuovi sensori e algoritmi per la generazione dei DSMs.

Nell'ultimo decennio diversi ricercatori hanno studiato le potenzialità della generazione di DSMs con la tecnica della radargrammetria da diversi tipi di sensori, ad esempio Toutin (Toutin, Gray, 2000) ha pubblicato numerosi lavori riguardanti applicazioni con RADARSAT and ERS1/2 (bassa risoluzione in ampiezza), mentre solo più recentemente cominciano ad essere divulgati i risultati ottenuti con i sensori di nuova generazione operanti in modalità Spotlight, come ad esempio TerraSAR-X (Raggam et al., 2009).

La radargrammetria, in modo simile alla fotogrammetria, ricava l'informazione altimetrica per via stereoscopica. Per ottenere una buona configurazione stereo, la condizione migliore è quella in cui il bersaglio è osservato da due punti di vista opposti (*opposite-side configuration*); purtroppo tale condizione non è ottimale dal punto di vista radiometrico, producendo grosse differenze radiometriche che rendono difficoltosa la procedura di matching. Per questa ragione un buon compromesso è quello di avere una coppia acquisita da due punti di vista giacenti sullo stesso lato (*same-side configuration*) con un rapporto "base di presa su altezza" compreso tra 0.25 e 2.0 (Méric et al., 2009).

In questo lavoro è descritto il modello di orientamento per immagini SAR implementato nel software scientifico SISAR (Software per Immagini Satellitari ad Alta Risoluzione) e sono riportati i risultati ottenuti in alcune applicazioni su dati COSMO-SkyMed. Partendo dal modello proposto da Leberl (Leberl, 1990), è stato proposto un raffinamento della modellizzazione del segmento orbitale, necessario per sfruttare al massimo le potenzialità dei dati ad alta risoluzione.

Un orientamento 3D, basato sui vincoli di "distanza" (equazioni in *range*) e di perpendicolarità (equazioni *zero-Doppler*), è effettuato stimando ai minimi quadrati alcuni parametri di calibrazione relativi alla posizione e alla velocità del satellite.

Il modello di orientamento basato sulla radargrammetria

La tecnica della radargrammetria è basata su una ricostruzione 3D effettuata attraverso la determinazione del modello di orientamento oggetto-sensore, nel quale la posizione dell'oggetto è determinata attraverso l'intersezione di due raggi omologhi.

Prima di tutto occorre richiamare la struttura del sistema di coordinate immagine in una immagine radar con proiezione *slant range* in geometria zero-Doppler. Il sistema di coordinate è bidimensionale, l'origine è nell'angolo in alto a sinistra dell'immagine, la posizione di un punto è definita dalla sua riga (J) e colonna (I), crescenti rispettivamente verso il basso e verso destra (Figura 1).

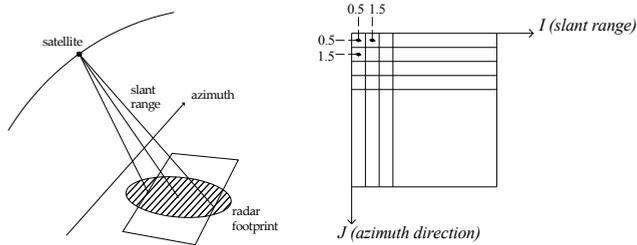


Figura 1 – Direzioni di azimuth e slant range nel sistema di riferimento immagine.

La posizione lungo le righe J è relativa all'istante di acquisizione, misurata lungo la direzione di volo del satellite, detta *azimuth*; la posizione lungo le colonne I è relativa allo *slant range* ad esso associato, cioè alla distanza tra il satellite e il punto a terra acquisito sull'immagine. In modo analogo la dimensione del pixel è caratterizzata dalla risoluzione in *azimuth* lungo la direzione di moto del satellite (*line spacing LS*) e la risoluzione in *slant range* (*column spacing CS*).

Le equazioni fondamentali del modello sono:

$$\begin{cases} \vec{v} \cdot (\vec{S} - \vec{P}) = 0 \\ |\vec{S} - \vec{P}| = RS_p \end{cases} \quad [1]$$

dove \vec{P} è la posizione del generico punto P a terra, \vec{v} è il vettore velocità del satellite, \vec{S} è la posizione del satellite corrispondente al punto P, RS_p è lo *slant range* relativo al generico punto P. La prima equazione di [1] rappresenta il caso generale di proiezione in configurazione zero-Doppler, cioè in modo tale che il bersaglio sia acquisito lungo la direzione perpendicolare al moto del satellite (Li et al., 2005); la seconda equazione di [1] rappresenta il vincolo di *slant range*.

Per quanto riguarda la ricostruzione dell'arco orbitale, poiché la durata dell'acquisizione è di pochi secondi e il segmento orbitale relativo è piuttosto breve (circa 10 Km), esso può essere modellizzato in modo semplice con un arco di circonferenza; i parametri dell'orbita sono stimati ai minimi quadrati sulla base delle posizioni del satellite contenute nei file di metadata dell'immagine.

L'equazione [1] può essere scritta in forma esplicita:

$$\begin{cases} V_{xs} \cdot (X_s - X_p) + V_{ys} \cdot (Y_s - Y_p) + V_{zs} \cdot (Z_s - Z_p) = 0 \\ \sqrt{(X_s - X_p)^2 + (Y_s - Y_p)^2 + (Z_s - Z_p)^2} - (D_s + CS \cdot I) = 0 \end{cases} \quad [2]$$

dove V_{xs} , V_{ys} , V_{zs} sono le componenti cartesiane del vettore velocità del satellite (dipendenti dal tempo), X_s , Y_s , Z_s sono le coordinate cartesiane della posizione del satellite (dipendenti dal tempo), X_p , Y_p , Z_p sono le coordinate cartesiane del generico Ground Control Point (GCP) (indipendenti dal tempo), D_s è il *near range*, cioè la distanza relativa al bordo dell'immagine più vicina al satellite, CS è la risoluzione in *slant range* (*column spacing*), I è la posizione lungo le colonne del punto P sull'immagine.

Si noti come il *near range* venga rappresentato come funzione lineare delle righe J attraverso l'equazione [3], che tiene conto di un effetto di rifrazione atmosferica.

$$D_s = D_{s0} + D_{s1} \cdot J \quad [3]$$

Inoltre l'istante di acquisizione di ogni GCP è legato alla sua posizione lungo le righe J attraverso una funzione lineare:

$$t = k_{t0} + k_{t1} \cdot J \quad [4]$$

dove i parametri k_{t0}, k_{t1} sono le incognite. La soluzione ai minimi quadrati del problema dell'orientamento è finalizzata alla stima dei quattro parametri $D_{s0}, D_{s1}, k_{t0}, k_{t1}$.

Dati COSMO-SkyMed oggetto dei test

Il modello è stato testato su due stereo coppie COSMO-SkyMed acquisite in modalità Spotlight su una zona della Francia meridionale (Mausanne) e su una zona dell'Italia settentrionale (Merano).

Tutte le immagini in questione appartengono alla categoria di prodotto Level 1A (SCS), cioè dati focalizzati in formato complesso, restituiti in proiezione *slant range* e geometria zero-Doppler.

Le due scene di Mausanne sono state acquisite rispettivamente con un angolo di incidenza di 35.7 e 55.4 gradi lungo un'orbita ascendente e con configurazione *same-side*, il rapporto "base di presa su altezza" è pari 0.7.

Le due scene di Merano sono state acquisite rispettivamente con un angolo di incidenza di 25.9 e 42.3 gradi lungo un'orbita discendente, sempre con configurazione *same-side*, il rapporto "base di presa su altezza" è pari 0.3. La copertura di tutte le immagini è di circa $10 \times 10 \text{ Km}^2$.

L'orientamento della stereo coppia di Mausanne è basata su 25 *Ground Points* (GPs), per i quali le coordinate sono state determinate per via fotogrammetrica, utilizzando una stereo coppia acquisita dal satellite Cartosat-1 (risoluzione 2.5 m), con un'accuratezza di circa 3 m in planimetria, e di circa 4 m per la componente verticale.

Per la stereo coppia di Merano sono stati utilizzati 20 GPs, per i quali le coordinate planimetriche sono state ricavate da cartografia a scala 1:5000 disponibile *on-line* sul sito della "Provincia Autonoma di Bolzano", la quota è stata ricavata da un modello digitale del terreno generato da rilievo LIDAR con accuratezza media di 0.25 m, anch'esso disponibile *on-line*.

Risultati

Per testare il modello le stereo coppie sono state orientate variando il numero di GCPs ed è stato analizzato il risultato dell'orientamento in termini di accuratezza valutata come *Root Mean Square Error* (RMSE) calcolato sui residui di un set di *Check Points* (CPs).

Per ottenere risultati significativi dal punto di vista statistico, per un dato numero di GCPs usati per orientare le immagini, sono stati utilizzati diversi set indipendenti di punti uniformemente distribuiti.

È importante sottolineare che l'identificazione dei punti di controllo sulle immagini SAR generalmente non è semplice e implica un errore di 1-2 pixel o anche più (Figura 2).

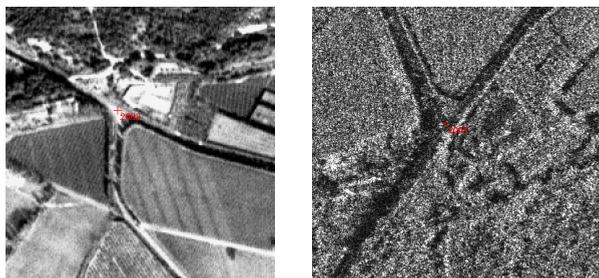


Figura 2 – Esempio di riconoscimento di un GCP su un'immagine Cartosat-1 (sinistra) e su un'immagine COSMO-SkyMed (destra).

Nel caso di Mausanne l'accuratezza ottenuta nell'orientamento è di circa 4.0 - 5.0 m sia per le componenti planimetriche che per quella verticale (Tabella 1), tale livello di accuratezza è congruente con quella delle coordinate dei punti di controllo, considerando anche l'errore di collimazione che si compie sulle immagini radar.

RMSE CP Mausanne									
# GCPs	average [m]			median [m]			standard deviation [m]		
	NORTH	EAST	UP	NORTH	EAST	UP	NORTH	EAST	UP
3	5.30	4.78	4.33	5.05	4.76	4.31	1.02	0.67	0.43
6	4.30	4.80	3.97	4.40	4.62	4.04	0.24	0.46	0.27
9	4.94	4.31	4.14	4.97	4.14	4.00	0.21	0.29	0.36
12	4.57	5.16	4.26	4.57	5.16	4.26	0.25	0.13	0.51
16	4.78	6.96	4.56	4.78	6.96	4.56	-	-	-
20	5.10	5.88	6.09	5.10	5.88	6.09	-	-	-

Tabella 1 – Risultati del software SISAR per la stereo coppia di Mausanne.

Per quanto riguarda il numero di punti utilizzato per l'orientamento, il software mostra un comportamento stabile, e l'incremento del numero di punti non migliora sensibilmente il risultato. In Figura 3 sono presentati gli istogrammi in termini di RMSE sui CPs usando diversi set di GCPs per la stereo coppia di Mausanne; in particolare sono state utilizzate 4 differenti distribuzioni di 6 punti e 3 differenti distribuzioni di 9 punti. Il modello mostra una buona stabilità anche variando i punti di controllo utilizzati.

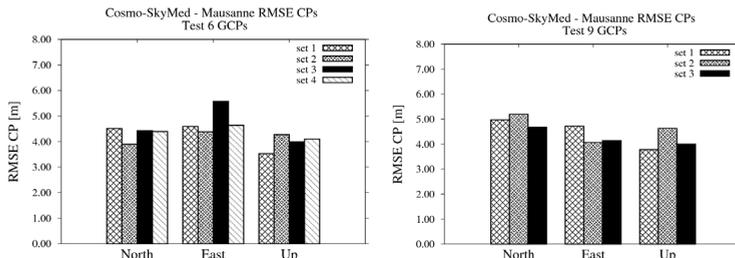


Figura 3 – Istogrammi delle diverse distribuzioni di 6 e 9 GCPs (RMSE CPs) per la stereo coppia di Mausanne.

Nel caso della stereo coppia di Merano l'accuratezza in planimetria è di circa 3.0 - 4.0 m, mentre in altimetria è di circa 3.0 m (Tabella 2). Anche in questo caso l'incremento del numero di punti non migliora significativamente i risultati. In Figura 4 sono presentati gli istogrammi per 6 differenti distribuzioni di 3 punti e 3 differenti distribuzioni di 9 punti.

Inoltre le stereo coppie sono state orientate anche con il modello di Toutin implementato nel software commerciale OrthoEngine v. 10.3 (PCI Geomatica); i risultati sono presentati nella Tabella 3.

RMSE CP Merano									
# GCPs	average [m]			median [m]			standard deviation [m]		
	NORTH	EAST	UP	NORTH	EAST	UP	NORTH	EAST	UP
3	3.30	3.70	2.68	3.22	3.57	2.63	1.04	0.37	0.25
6	2.55	3.59	2.91	2.36	3.76	2.67	0.27	0.24	0.38
9	1.68	3.91	2.76	1.94	3.94	2.86	0.40	0.19	0.35
12	2.52	3.54	2.16	2.52	3.54	2.16	0.05	1.20	0.93
15	4.53	4.32	3.73	4.53	4.32	3.73	-	-	-

Tabella 2 – Risultati del software SISAR per la stereo coppia di Merano.

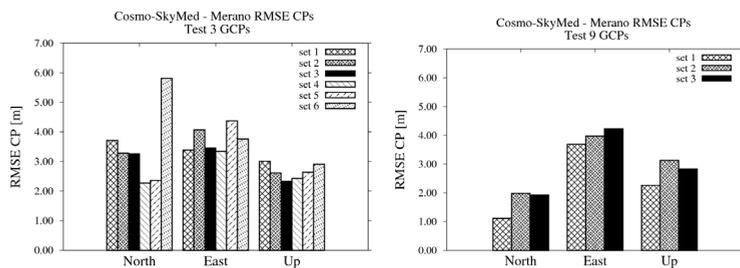


Figura 4 – Istogrammi delle diverse distribuzioni di 3 e 9 GCPs (RMSE CPs) per la stereo coppia di Merano.

RMSE CP OrthoEngine							
Mausanne				Merano			
# GCP	NORTH[m]	EAST[m]	UP[m]	# GCP	NORTH[m]	EAST[m]	UP[m]
3	11.75	79.83	15.26	3	2.98	11.52	10.61
6	3.91	5.80	4.15	6	4.33	5.03	2.73
9	5.40	7.03	4.30	9	2.21	3.40	3.23
12	5.92	6.36	4.23	12	3.99	2.74	2.90
16	4.78	6.96	4.56	15	4.32	3.52	3.24
20	5.10	5.88	6.09	-	-	-	-

Tabella 3 – Risultati del software OrthoEngine v. 10.3 per le stereo coppie di Mausanne e di Merano.

Conclusioni

Un nuovo modello per l'orientamento di immagini SAR acquisite dal satellite COSMO-SkyMed in modalità Spotlight è stato definito e implementato nel software scientifico SISAR. Due diverse stereo coppie sono state orientate per testare e valutare le capacità del software; le immagini sono relative ai siti di Mausanne (Francia) e Merano (Italia). L'accuratezza, valutata come RMSE dei residui sui CPs, è dell'ordine di 4.0 - 5.0 m nel caso di Mausanne e di 3.0 m nel caso di Merano. I risultati mostrano delle soddisfacenti prestazioni del software, considerando anche la non eccellente accuratezza dei punti di controllo disponibili. Ulteriori indagini, utilizzando punti di controllo più accurati, ad esempio acquisiti con rilievo GPS, dovrebbero essere condotte. Il modello mostra un comportamento stabile, vengono ottenuti buoni risultati utilizzando anche pochi GCPs, infatti l'incremento del numero di GCPs non migliora significativamente i risultati. Nel futuro lo sviluppo del software sarà volto all'implementazione di un algoritmo di matching sulle immagini SAR e quindi alla generazione di DSMs, nonché alla valutazione dei prodotti ottenuti.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano e-Geos S.p.A., Roma (Italia) per aver reso disponibili le immagini COSMO-SkyMed; inoltre un ringraziamento va anche a Sysdeco Italia S.r.l., per aver fornito il software PCI Geomatica v. 10.3.

Bibliografia

- Leberl F.W. (1990), *Radargrammetric image processing*, Artech House, Norwood, USA
 Li Z., Zhu Q., Gold C. (2005), *Digital terrain modeling: principles and methodology*, CRC Press, Florida, USA
 Méric S., Fayard F., Pottier E. (2009), *Chapter 20 - "Radargrammetric SAR image processing" In: Pei-Gee Peter Ho (Eds.), Geoscience and Remote Sensing*, Intech
 Raggam H., Perko R., Gutjahr K. (2009), "Investigation of the Stereo-Radargrammetric Mapping Potential of TerraSAR-X", *29th EARSeL Symposium*, Chania, Greece, pp. 371–380
 Toutin T., Gray L. (2000), "State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 55, ELSEVIER, pp. 13-33