

Validazione di modelli altimetrici estratti con tecniche fotogrammetriche automatiche secondo la recente normativa CISIS

Andrea Lingua (*), Davide Marenchino (**)

(*) DITAG – Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell’Ambiente e delle Geotecnologie, Politecnico di Torino
C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino. andrea.lingua@polito.it

(**) ITHACA – Information Technology for Humanitarian Assistance, Cooperation and Action.
Via Pier Carlo Boggio 61, 10129 Torino. davide.marenchino@polito.it

Riassunto

La vasta disponibilità sul mercato attuale di modelli digitali del terreno, con differenti formati di memorizzazione, risoluzioni geometriche e livelli di accuratezza, richiede la necessità di uniformare il contenuto del dato prodotto. Nel 2009 il “Centro Interregionale di Coordinamento e Documentazione per le Informazioni Territoriali” (CISIS) ha redatto un documento dal titolo “Ortoimmagini 10k e modelli altimetrici. Specifiche tecniche” contenente prescrizioni tecniche, di natura qualitativa, per la produzione di ortofoto e modelli altimetrici. Il documento definisce degli standard di riferimento comuni che assumono un valore normativo. In questo contributo le norme CISIS sono state utilizzate per validare modelli altimetrici estratti con tecniche fotogrammetriche automatiche sviluppate e implementate dagli autori.

Abstract

Nowadays, many digital terrain models with different resolutions and accuracies are available in the market. Consequently, the necessity of regulations, which allow the classification of these data is strictly required. In 2009, the “Centro Interregionale di Coordinamento e Documentazione per le Informazioni Territoriali” (CISIS) has drawn the document: “Ortoimmagini 10k e modelli altimetrici. Specifiche tecniche”. This document defines some rules for the classification of digital elevation models and orthophotos. In this paper, the CISIS rules have been applied in order to classify digital elevation models, which have been extracted in automatic way. The automatic photogrammetric techniques have been developed and implemented by the authors.

Introduzione

L'utilizzo di ortofoto e di modelli altimetrici digitali è una prassi comune a supporto di attività di gestione e pianificazione del territorio. Allo stato attuale, i rilievi con tecniche fotogrammetriche digitali o con sensori LiDAR aviotrasportati permettono la produzione automatica o semi-automatica di DSM (*Digital Surface Model*) e ortofoto, garantendo una vasta disponibilità di questi dati, con differenti formati di memorizzazione, risoluzioni geometriche e livelli di accuratezza. Ne consegue la necessità di uniformare il contenuto dei dati prodotti e di definire degli standard di riferimento comuni per permetterne una condivisione e un'interoperabilità tra enti e aziende che utilizzano questi prodotti.

Nel 2009, il “Centro Interregionale di Coordinamento e Documentazione per le Informazioni Territoriali” (CISIS) ha redatto un documento dal titolo “Ortoimmagini 10k e modelli altimetrici. Specifiche tecniche” contenente prescrizioni tecniche, di natura qualitativa, per la produzione di ortofoto 10k (scala nominale 1:10000) e modelli altimetrici (Brovelli ed al., 2009).

La normativa CISIS è stata utilizzata per validare un DSM estratto e filtrato con tecniche fotogrammetriche automatiche (*Multi Image Geometrically Constraint Cross-Correlation, MIGC3*; *Self-tuning Standard deviation Median Filter, S2MF*) implementate dagli autori (Marenchino, 2009).

per la produzione di prodotti cartografici speditivi. Il DSM è stato prodotto a partire da immagini digitali aeree orientate, acquisite su un'area collinare con la camera *Intergraph Z/I imaging DMC*. L'estrazione del DSM è avvenuta su immagini sotto campionate, in modo da aver a disposizione di un set di punti di controllo acquisiti mediante restituzione fotogrammetrica, e per poter procedere con le verifiche di accuratezza indicate sulla normativa. Il modello altimetrico è quindi stato classificato nell'opportuno livello in funzione del passo planimetrico e dell'accuratezza in quota. I risultati ottenuti hanno permesso di trarre interessanti considerazioni riguardo la qualità del dato altimetrico estratto e le accuratezze attese.

Tecniche automatiche per l'estrazione di modelli altimetrici: MIGC3 e S2MF

Le tecniche di *Multi-Image Geometrical Constraint Cross-Correlation* (MIGC3, Zhang L., 2005) e *Self-tuning Standard deviation Median Filter* (S2MF, Lingua ed al, 2009) sono state implementate dagli autori per l'estrazione automatica di *Digital Surface Model* (DSM) a partire da immagini digitali orientate (*frame camera*).

L'approccio di estrazione di punti omologhi è multi-immagine (Figura 1), e permette la produzione di DSM con immagini soggette a geometrie di presa proibitive e lontane dalla condizione normale.

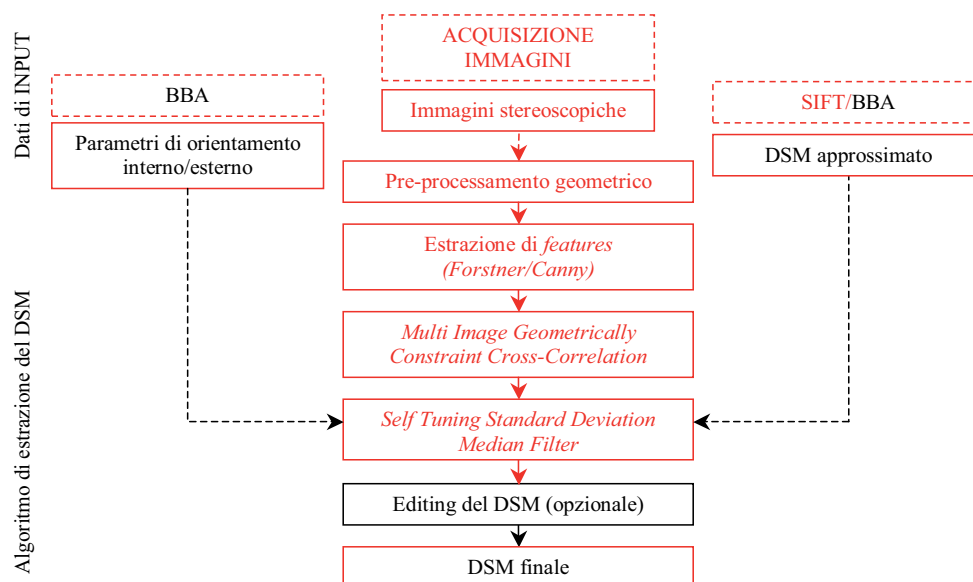


Figura 1 - Diagramma di flusso dell'algoritmo di estrazione del DSM. In rosso sono indicate le operazioni automatiche, in nero le operazioni manuali.

In primo luogo le immagini vengono pre-elaborate al fine di ottimizzarne il contrasto radiometrico e di eliminarne le distorsioni geometriche. Ogni singola immagine viene quindi contro distorta e ad ognuna è applicato il filtro di *Wallis*. Per ogni immagine sono applicati gli operatori di *Forstner* e *Canny* per l'estrazione di *features*. Ad ognuna di esse è quindi applicato l'algoritmo MIGC3. La tecnica, basata su un approccio multi-immagine, permette di calcolare un coefficiente di correlazione (*Sum of Normalized Cross Correlation*, SNCC) definito come media tra i coefficienti di correlazione calcolati su singole stereo-coppie. La tecnica, integrata con l'applicazione di vincoli geometrici (rette epipolari, DSM approssimato, finestre di correlazione auto-adattive) permette di estrarre in modo completamente automatico punti soggetti a rotazioni, distorsioni affini e parziali distorsioni prospettiche, garantendo un maggior efficacia e migliori prestazioni complessive rispetto agli algoritmi classici. La qualità del prodotto finale è influenzata dall'accuratezza e dalla

completezza del DSM approssimato. In applicazioni classiche, il DSM approssimato viene estratto utilizzando la tecnica delle piramidi di immagine, che comporta un approccio iterativo nell'estrazione del modello digitale. Nella seguente implementazione, il DSM approssimato è definito sfruttando i punti omologhi estratti durante la fase di orientamento dall'operatore SIFT (Lowe 2004), reso adattivo dagli autori A²SIFT (Lingua ed al., 2009). L'operatore SIFT è ampiamente utilizzato in *Computer Vision* (CV) per l'estrazione di coppie omologhe su immagini con forti distorsioni geometriche e ridotte informazioni radiometriche (carenza di *texture*). Prove sperimentali hanno confermato che A²SIFT non solo permette di estrarre punti omologhi in condizioni di presa "critica", ma è in grado di estrarre un numero di coppie omologhe decisamente superiore rispetto agli operatori utilizzati in fotogrammetria. La possibilità di generare oltre 600 punti su coppie stereoscopiche di medio formato, permette di produrre DSM approssimati, che ottimizzano le prestazioni della tecnica MIGC3.

Sebbene l'algoritmo MIGC3 fornisca ottimi risultati, alcuni aspetti quali la carenza di informazione radiometrica nelle immagini, le occlusioni, la presenza di *pattern* ripetitivi o di forti distorsioni prospettiche provocano errori grossolani nelle operazioni di *image matching*. A tal proposito è stato sviluppato e implementato un algoritmo automatico di filtratura robusta chiamato S2MF (*Self-tuning Standard deviation Median Filter*). La tecnica appartiene alla classe *distance function* ed è basata sul filtro robusto mediana. Un punto si può definire affetto da errore grossolano se la propria quota è al di fuori di un intervallo di confidenza, definito dalla mediana di un insieme di punti nel suo intorno e dalla loro deviazione standard. Data la sensibilità della deviazione standard a errori di natura grossolana, essa è stimata mediante un approccio iterativo di successive rieiezioni. Prove sperimentali confermano l'affidabilità del metodo, compatibilmente con le accuratezze e il grado di completezza richiesto per l'estrazione di DSM per applicazioni cartografiche.

Verifiche di accuratezza secondo le norme CISIS

Le tecniche sopracitate sono state applicate su una strisciata di immagini aeree acquisite con la camera fotogrammetrica digitale *Intergraph Z/I imaging DMC*, su una zona collinare e boschiva nei pressi dell'abitato di Lauria (Basilicata, Italia). Al fine di verificare la qualità del dato altimetrico, i DSM estratti sono stati sottoposti alle prescrizioni della recente normativa CISIS, che prevede l'esecuzione di verifiche sulla qualità interna del dato e sul prodotto finale. Nel seguente contributo l'attenzione è focalizzata sulla verifica di qualità del prodotto finale. Tale verifica si attua mediante la determinazione di una rete di punti di controllo caratterizzata da un'accuratezza più elevata (almeno un ordine di grandezza) rispetto alle tolleranze prefissate del modello digitale. La rete deve essere rilevata in modo da definire 20 zone aventi caratteristiche omogenee di copertura al suolo definite dalla norma (campo aperto, zona alberata, edifici). Per ogni zona si determina il valore dell'errore lineare al 95% di probabilità complessivo ($LE95_H$) di punti di controllo e modello altimetrico, dato da:

$$LE95_Q = \sqrt{LE95_{AM}^2 + LE95_{CP}^2}$$

in cui $LE95_{AM}$ indica l'errore lineare al 95% del modello altimetrico (funzione del RMSE del modello) e $LE95_{CP}$ rappresenta il medesimo errore relativo ai punti di controllo. $LE95_Q$, unitamente al passo planimetrico, è utilizzato per la classificazione del DSM nei 9 livelli definiti dalla normativa. Nel seguente caso, siccome sull'area di interesse non è stato reso possibile materializzare una rete di punti di controllo, l'estrazione del modello altimetrico è avvenuta sulle immagini digitali sotto campionate (Figura 2-a) simulando un volo effettuato ad un'altezza relativa di volo raddoppiata rispetto al dato originale. In questo modo, la rete di punti di controllo è stata realizzata mediante restituzione stereoscopica di punti presenti sulle immagini originali. In Tabella 1 sono riassunte le caratteristiche geometriche delle immagini originali e ricampionate utilizzate per l'estrazione del DSM e per l'esecuzione delle verifiche.

Immagini Lauria DMC - Caratteristiche -				Immagini Lauria DMCricampionate - Caratteristiche -			
Risoluzione (pixel)	7680* 13824	Quota relativa di volo (m)	960	Risoluzione (pixel)	2178* 3919	Quota rel. di volo equ.(m)	3384
Risoluzione (DPI)	2116	GSD (m)	0.09	Risoluzione (DPI)	600	Equ. GSD (m)	0.338
Dimensione pixel (µm)	12	Abbracc. x (m)	737	Dimensione pixel (µm)	42.3	Abbracc. x (m)	2597
Focale (mm)	120	Abbracc. y (m)	1327	Focale (mm)	120	Abbracc. y (m)	4678
Quota di volo (m)	1790	Base (m)	295	Q. di volo equ. (m)	4214	Base (m)	1040
Quota media terreno (m)	830	Scala fotogr.	8000	Quota media terreno (m)	830	Scala equ. fotogr.	28200

Tabella 1 (a). Caratteristiche geometriche e parametri di volo delle immagini DMC.
(b) Caratteristiche e geometria di volo equivalente delle immagini ricampionate.

Il DSM estratto soggetto a classificazione CISIS è costituito da circa 35000 punti e si estende su un'area di poco meno di 1 km². Il passo medio planimetrico di 5 m.

La misura dei punti di controllo mediante restituzione stereoscopica, permette di ottenere delle accuratèzze teoriche superiori di mezzo ordine di grandezza rispetto alle accuratèzze teoriche delle immagini sottocampionate. L'errore lineare al 95% dei punti di controllo (LE95_{CP}) è stato stimato mediante le regole empiriche (Krauss, 1996) che mettono in relazione l'accuratèzza altimetrica con la quota di volo e le caratteristiche dei punti collimati:

$$\sigma_{CP,Q} = \sqrt{\sigma_{Z(seg)}^2 + \sigma_{Z(def)}^2}$$

in cui $\sigma_{Z(seg)}$ indica l'errore in quota per punti presegnalizzati (0.006 ‰ della quota relativa di volo); mentre $\sigma_{Z(def)}$ rappresenta l'incertèzza nella definizione di punti naturali. Si è assunto un valore di 0.1 m per punti in aree aperte (spigoli di bordi cultura) e di 0.3 m per punti in aree boschive.



Figura 2 (a) Rappresentazione 3D del DSM estratto sulla zona di Lauria. (b) indicazione delle zone nelle quali sono state applicate le verifiche imposte dalle norme CISIS

Nelle 5 zone omogenee, sono stati restituiti circa 150 punti di controllo (Figura 2-b) con caratteristiche analoghe a quelle indicate dalle norme (campo aperto, zone con copertura arborea). Le operazioni di verifica hanno fornito ottimi risultati (Tabella 2) che confermano l'efficacia e la

robustezza delle tecniche fotogrammetriche automatiche utilizzate per l'estrazione dei punti. Gli errori lineari assumono valori addirittura inferiori alle precisioni teoriche dell'acquisizione fotogrammetrica normale ($\sigma_z=0.55$ m). Tali risultati, unitamente al passo medio planimetrico di 5 m, hanno permesso di classificare il modello altimetrico in esame nel livello 4. Il livello di precisione ottenuto è superiore rispetto al livello indicato dalla normativa in esame, che assegna a un volo con GSD medio di 0.34 m un livello di precisione pari a 2 (passo 20 m, $T_Q=4$ m).

	CAMPO APERTO	BOSCO
$\sigma_{CP,Q} (m)$	0.13	0.31
$LE95_{CP} (m)$	0.25	0.60
$RMSE_{AM} (m)$	0.23	0.38
$LE95_{AM} (m)$	0.45	0.74
$LE95_Q (m)$	0.50	0.95
$T_Q (m)$ LIVELLO 4	0.60	1.20

Tabella 2. Applicazione delle norme CISIS al modello altimetrico in esame.

Verifiche di accuratezza su DSM regolarizzati

I modelli digitali estratti con le tecniche MIGC3/S2MF sono dei seminati di punti con passo planimetrico variabile. Siccome buona parte dei software commerciali utilizza modelli digitali in formato *raster*, è opportuno valutare l'influenza delle operazioni di regolarizzazione del seminato di punti sulla precisione in quota del modello, e di conseguenza del livello.

A tal fine il DSM in esame è stato regolarizzato a passi di 5 m e 2 m, utilizzando la tecnica Kriging con il software ArcGIS, estensione 3D Analyst. I modelli digitali regolarizzati sono quindi stati sottoposti alla verifica di qualità della norma CISIS.



Figura 3. Zone soggette a verifica di qualità

DMS passo 5 m	CAMPO APERTO	BOSCO
$\sigma_{CP,Q} (m)$	0.13	0.31
$LE95_{CP} (m)$	0.25	0.60
$RMSE_{AM} (m)$	0.41	0.79
$LE95_{AM} (m)$	0.81	1.54
$LE95_Q (m)$	0.84	1.65
$T_{Q\ LEV,3} (m)$	2	½ al. m. al

DMS passo 2 m	CAMPO APERTO	BOSCO
$\sigma_{CP,Q} (m)$	0.13	0.31
$LE95_{CP} (m)$	0.25	0.60
$RMSE_{AM} (m)$	0.64	1.06
$LE95_{AM} (m)$	1.25	2.08
$LE95_Q (m)$	1.27	2.16
$T_{Q\ LEV,3} (m)$	2	½ al. m. al

Tabella 3 (a-b). Risultati delle verifiche di accuratezza sui modelli altimetrici regolarizzati

Nel seguente caso sono state definite 10 zone campione, 5 in campo aperto e 5 in zone boschive, in ognuna delle quali sono stati restituiti 20 punti di controllo per un totale di 200 punti, in completo accordo con le prescrizioni della norma (Figura 3).

Come previsto, l'errore lineare complessivo al 95% di probabilità del modello regolarizzato al passo di 5 m ha subito un brusco decadimento (Tabella 3-a), che comporta la classificazione del modello nel livello 3. La regolarizzazione al passo di 2 m (Tabella 3-b) ha provocato una riduzione ancora più elevata della precisione, dovuta all'infittimento del passo planimetrico medio dei punti. Si evidenzia comunque che il livello dei modelli digitali interpolati (Livello 3) è superiore rispetto al livello 2, proposto dalla normativa CISIS per modelli altimetrici generati con immagini aventi GSD medio = 0.34 m.

Conclusioni

Le verifiche di precisione del modello altimetrico prodotto a partire dalle immagini digitali acquisite con la camera *Intergraph Z/I imaging DMC* sulla zona di Lauria (Basilicata, Italia), evidenziano le ottime prestazioni delle tecniche fotogrammetriche MIGC³ e S²MF sviluppate dagli autori. Il DSM in esame è stato classificato nel livello 4 prescritto dalla normativa CISIS (tolleranze in quota inferiori a 1.20 m; passo planimetrico di 5 m). Il risultato concorda pienamente con le accuratèzze teoriche del caso normale di acquisizione fotogrammetrica, ma si discosta dalle indicazioni fornite dalla normativa CISIS, secondo le quali DSM estratti a partire da immagini digitali con GSD medio = 0.34 m può presentare un livello di precisione massima pari a 2.

Questa discordanza è legata al fatto che la norma CISIS ha definito una classificazione dei livelli di precisione non esclusivamente in funzione dell'accuratèzza teorica della tecnica fotogrammetrica, ma anche in funzione delle relazioni empiriche che legano la quota relativa di volo con i limiti di interpretabilità fotografica e di rappresentazione semantica delle entità di interesse in fase di restituzione stereoscopica.

Alla luce di queste considerazioni e delle prove sperimentali, è possibile ammettere che modelli digitali del terreno estratti in forma completamente automatica possano appartenere a livelli di precisione superiori rispetto a quelli definiti dalla normativa CISIS.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Geom. Paolo Maschio per la restituzione fotogrammetrica dei punti di controllo utilizzati per validare il modello altimetrico in esame.

Riferimenti bibliografici

- Lingua A., Marenchino D., Nex F. (2009), "Performance Analysis of the SIFT Operator for Automatic Feature Extraction and Matching in Photogrammetric Applications". *SENSORS*, pp. 3745-3766, 2009, Vol. 9(5), ISSN: 1424-8220, DOI: 10.3390/s90503745.
- Lingua A., Marenchino D., Nex F. (2009), "Automatic Digital Surface model (DSM) generation procedure from images acquired by Unmanned Aerial Systems (UASs)". In: *Proceedings of the congress GeoCad '09, GeoCad 2009, Alba Iulia (Romania) May 7th - 9th*, pp. 198-208, 2009.
- Marenchino D. (2009), *Low-cost UAV for the environmental emergency management. Photogrammetric procedures for rapid map activities*. Tesi di dottorato, Politecnico di Torino.
- Brovelli M., Cilloccu F., Crespi M., Dequal S., Lingua A. (2009), *Ortoimmagini 10K e modelli altimetrici - Specifiche tecniche*. CISIS, Centro Interregionale di Coordinamento e documentazione per le informazioni territoriali.
- Zhang L. (2005), *Automatic Digital Surface Model (DSM) generation from Linear Array Images*. Tesi di dottorato, ETH Zurigo.
- Lowe D., (2004), "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". *International Journal of Computer Vision* 60(2): 91-110.