

Una strategia di orientamento automatico di immagini acquisite con UAV

Luigi Barazzetti (*), Fabio Remondino (**), Marco Scaioni (*)

(*) Politecnico di Milano, Dip. B.E.S.T., P.za Leonardo da Vinci 32, Milano
<luigi.barazzetti, marco.scaioni>@polimi.it

(**) Fondazione Bruno Kessler (FBK) - 3D Optical Metrology Unit, via Sommarive 18, Trento, remondino@fbk.eu

Riassunto

L'articolo descrive una procedura sviluppata per l'estrazione automatica dei punti di legame e per il successivo orientamento di blocchi di immagini acquisiti tramite UAV. L'operazione di matching viene eseguita creando una mappa di visibilità tra le immagini in modalità completamente automatica. Successivamente, una opportuna procedura di riduzione delle corrispondenze identificate permette di compensare il blocco mediante una tradizionale triangolazione aerea a fasci proiettivi. I risultati sperimentali, eseguiti con quattro blocchi di immagini acquisite con differenti UAV, hanno dimostrato come la precisione ottenibile sia del tutto equiparabile a quella di un tradizionale approccio manuale.

Abstract

This paper presents an automated methodology for the extraction of accurate tie points for the orientation of image blocks acquired with UAV platforms. The matching phase is carried by using a visibility map between the images, which can be created in a fully automated way. Then, a procedure for point decimation allows the orientation of the image block with a photogrammetric bundle adjustment. The experimental results, performed on four image blocks acquired with different UAV platforms and processed with the proposed automated methodology, demonstrated a precision similar to that obtainable with manual measurements.

1. Introduzione

L'uso di piattaforme UAV per l'acquisizione di immagini sta trovando sempre una maggiore diffusione nell'ambito fotogrammetrico, sia per rilievi a grande scala, tipici del settore terrestre, che in quello aereo, ove tali prodotti rappresentano una valida alternativa con costi contenuti (Colomina *et al.*, 2008; Eisenbeiss, 2008). L'uso di un sistema GPS/INS integrato ad una unità di navigazione autonoma consente di acquisire un blocco di immagini digitali secondo un piano di volo prestabilito, del tutto equivalente a quelli delle tradizionali applicazioni di fotogrammetria aerea. Inoltre, sfruttando i valori misurabili con tali sensori è possibile eseguire una triangolazione aerea automatica (TAA), sebbene l'accuratezza dei sistemi GPS/INS oggi installabili su un UAV sia inferiore rispetto a quelli comunemente impiegati a bordo di un aereo. Per particolari applicazioni in cui sia necessaria una rapida elaborazione dei dati, l'uso diretto dei dati GPS/INS permette di ottenere una soluzione immediata, anche se con un forte degrado della precisione.

Una caratteristica dei blocchi di immagini acquisibili tramite UAV riguarda la geometria delle prese, che in certe applicazioni è sicuramente più simile a quella di un blocco terrestre rispetto ad un blocco aereo. Infatti, per alcuni rilievi la geometria di acquisizione potrebbe richiedere il volo manuale e l'utilizzo di immagini convergenti, con lunghe basi di presa, variazioni di scala e di illuminazione. In Scaioni *et al.* (2009) viene presentato un esempio di questo tipo, dove per il

rilievo di un oggetto con prevalente sviluppo verticale non è stato possibile utilizzare una unità di volo autonomo. Altre problematiche possono insorgere laddove siano presenti occlusioni, oppure quando il segnale GPS risulti fortemente degradato (ad esempio nei centri urbani). Occorre inoltre ricordare che la disponibilità di piattaforme di acquisizione dalle dimensioni sempre più ridotte rende possibile il loro utilizzo negli ambienti interni, dove le applicazioni sono potenzialmente molteplici. In tali situazioni sono oggi oggetto di studio alcuni algoritmi che fanno uso diretto delle immagini appena acquisite per eseguire una navigazione assistita (Eugster & Nebiker, 2008; Wang *et al.*, 2008).

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati, non è disponibile un software commerciale per l'orientamento automatico di immagini acquisite mediante UAV in assenza di dati GPS/INS oppure quando la geometria del blocco comprende immagini molto convergenti. In questo caso, le tradizionali tecniche di TAA non possono essere applicate rendendo necessarie misure di tipo manuale per eseguire la misura dei punti di legame.

Partendo dalle problematiche appena introdotte è stata implementata una metodologia per l'estrazione automatica dei punti di legame e la conseguente compensazione a fasci proiettivi di un generico blocco di immagini (ATiPE – Automatic Tie Point Extraction). Tale metodo deriva da un algoritmo appositamente sviluppato per l'orientamento automatico di sequenze e blocchi terrestri (Barazzetti *et al.* 2010b, 2010c) adattandolo per l'uso di immagini acquisite con UAV (Barazzetti *et al.*, 2010a). Il suo principale vantaggio riguarda la possibilità di elaborare qualsiasi tipo di blocco indipendentemente dalla sua geometria o dalla disponibilità di dati di orientamento approssimati.

Per raggiungere tale grado di automazione è stato necessario integrare le tecniche fotogrammetriche con quelle della Computer Vision (CV), giungendo così alla creazione di un software per l'estrazione di un notevole numero di punti di legame, che vengono poi ridotti e regolarizzati in modo da ottenere una distribuzione uniforme sulle immagini. Confrontato con le attuali tecniche di orientamento automatico di immagini senza target, tale metodo presenta l'enorme vantaggio di non richiedere nessuna operazione manuale, tranne che per la collimazione dei punti di appoggio. In alternativa, la procedura può divenire completamente automatica nel caso di una compensazione "free-net" (Luhmann *et al.*, 2006), in cui resta incognita la scala del progetto. I soli parametri di input sono le immagini e gli eventuali parametri di calibrazione della camera, che possono essere calcolati facilmente prima del rilievo con UAV. Inoltre, anche i parametri GPS/INS o un DTM/DSM approssimato dell'oggetto – sebbene non strettamente necessari – possono facilitare le operazioni di matching e orientamento.

Nei paragrafi successivi il metodo verrà brevemente illustrato assieme ad alcuni risultati sperimentali ottenuti su blocchi ripresi con differenti piattaforme UAV.

2. La procedura di matching e orientamento

Il software sviluppato (ATiPE) permette di identificare punti omologhi tra differenti blocchi di immagini (per esempio immagini di tipo frame ma anche immagini sferiche). Nel caso di immagini riprese con UAV, l'intero blocco viene suddiviso in coppie di immagini e per ciascuna di esse il matching viene condotto inizialmente tramite gli operatori SIFT (Lowe, 2004) o SURF (Bay *et al.*, 2008), confrontando i descrittori con il "ratio test" ed eseguendo la rimozione dei valori anomali con la stima robusta della *matrice fondamentale* tramite MAPSAC. Il confronto fra i descrittori viene condotto utilizzando un algoritmo *kd-tree* (Vosselman & Maas, 2010) per limitare il costo computazionale della ricerca. Siccome il matching viene eseguito tra tutte le possibili combinazioni di coppie di immagini, questa operazione presenta un costo computazionale quadratico rispetto al numero di immagini impiegate, comportando di conseguenza lunghi tempi di elaborazione in caso di blocchi di grandi dimensioni. Per ridurre il numero di combinazioni è stata quindi implementata una procedura per la determinazione preliminare delle sole coppie di immagini che presentano potenzialmente punti omologhi tramite la costruzione di una opportuna *mappa di visibilità*. Questa ultima può essere creata in due modi:

1. tramite un orientamento preliminare di un blocco costituito da immagini a bassa risoluzione (per esempio 2 MPx) in modo tale da verificare quali sono le coppie che condividono un numero minimo di punti omologhi (almeno 50);
2. mediante l'uso di valori GPS/INS unitamente a un DTM (o DSM) dell'area.

L'opzione (2) è sicuramente quella più rapida, ma può essere utilizzata solo per blocchi aventi una geometria simile ai blocchi aerei, mentre l'opzione (1) è utilizzabile in ogni situazione a fronte di un modesto tempo di elaborazione.

Una volta terminata la fase di estrazione delle corrispondenze tra le coppie, si va ad abbinare quei punti che sono stati trovati su più coppie, in modo da aumentarne la molteplicità e quindi la ridondanza locale delle osservazioni. Tale operazione viene condotta andando a confrontare le coordinate immagine.

L'uso di immagini ad elevata risoluzione geometrica unito alla mappa di visibilità comporta una drastica riduzione del tempo di elaborazione e appare una scelta necessaria anche per piccoli blocchi di 20-30 immagini. Inoltre, l'uso di immagini alla risoluzione originale fornisce generalmente un enorme numero di punti immagine (anche più di 200000) e rende difficile la compensazione del blocco con i comuni calcolatori. Per questo motivo è stata implementata una semplice procedura di riduzione dei punti mediante la suddivisione di ogni immagine in celle rettangolari. Per ogni cella soltanto il punto con maggiore molteplicità viene memorizzato ed usato nelle fasi successive. Tale operazione deve essere eseguita dopo avere determinato le corrispondenze per tutto il blocco e non durante il matching della singola coppia. E' stato inoltre verificato come questa procedura riduca il numero dei punti in modo significativo (anche di 100 volte) senza comportare un degrado della precisione dell'orientamento.

Per quanto riguarda la precisione ottenibile nell'estrazione dei punti di legame con gli algoritmi di *feature-based matching* utilizzati, essa è attestabile al livello di circa 0.5-1 pixel. Occorre però sottolineare che la numerosità complessiva dei punti estratti e la loro molteplicità permettono di ottenere buoni risultati nel calcolo della TA. E' comunque possibile andare a migliorare la precisione di misura dei singoli punti applicando un algoritmo di Least Squares Matching.

3. Risultati sperimentali

Il metodo è stato sperimentato su alcuni blocchi acquisiti con differenti UAV secondo diverse modalità di volo (manuale o automatico) e con immagini aventi configurazioni variabili (strisciate regolari o blocchi di immagini convergenti). Una descrizione dei blocchi elaborati è proposta in Figura 1, dove sono anche riportate le caratteristiche dei sensori impiegati, una visualizzazione grafica mediante diagrammi di connessione delle mappe di visibilità e una vista 3D dell'orientamento calcolato.

Il blocco 1 è stato ripreso usando un elicottero modello controllato manualmente via radio. Il blocco risultante è formato da strisciate "pseudo-verticali" dall'andamento piuttosto irregolare lungo una facciata laterale del Duomo di Milano. Il blocco 2 riguarda un volo nel sito archeologico di Copan (Honduras) e presenta una geometria regolare essendo le immagini acquisite secondo un apposito piano di volo e mediante l'impiego congiunto di sensori GPS/INS. Infine, per i blocchi 3 e 4 è stata impiegata la stessa piattaforma UAV, ma nel primo caso (scavo archeologico dell'Università di Siena a Pava) è stato eseguito un volo manuale, mentre nel secondo (area archeologica di Veio) il volo è stato condotto autonomamente.

3.1 Orientamento relativo con ATiPE

Le fasi di estrazione dei punti di legame con ATiPE ha richiesto un tempo di elaborazione di qualche ora per ciascun blocco analizzato. In tutti i casi è sempre stata utilizzata una mappa di visibilità, essendo il tempo di calcolo direttamente proporzionale al numero di combinazioni. I risultati relativi alla riduzione delle coppie di immagini tramite la mappa sono riportati in Tabella 1, ove si può apprezzare il significativo vantaggio in termini di numerosità delle coppie scartate. Nei

casi 2, 3 e 4 la fase di estrazione dei punti omologhi è relativamente semplice, in quanto la struttura del blocco ricalca la geometria tipica dei blocchi aerei e rende così molto facile l'individuazione delle corrispondenze.

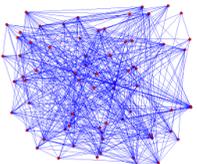
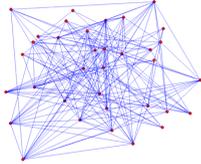
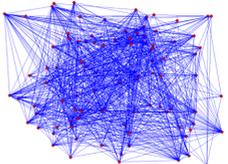
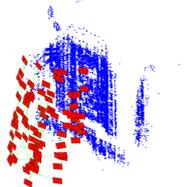
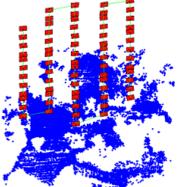
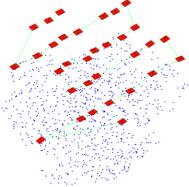
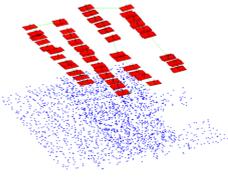
Blocco 1 – Milano	Blocco 2 – Copan	Blocco 3 – Pava	Blocco 4 – Veio
Nikon D200 + 20 mm 80 immagini 3872×2592 pixel	Nikon D2Xs + 35 mm 70 images 4288×2848 pixel	Pentax Optio A40 + 8 mm 32 images 4000×3000 pixel	Pentax Optio A40 + 8 mm 87 images 4000×3000 pixel
<u>Volo manuale</u>	<u>Volo autonomo</u>	<u>Volo manuale</u>	<u>Volo autonomo</u>
			
			
			
			

Figura 1 – I blocchi elaborati con le relative caratteristiche. Nelle ultime due righe della tabella sono riportate le mappe di visibilità (i punti rossi rappresentano le immagini e le linee blu le connessioni trovate) e una vista 3D dell'orientamento esterno stimato automaticamente grazie ad ATiPE.

Per il blocco 1, comprendente immagini convergenti disposte in modo casuale, l'operatore SIFT è stato in grado di determinare punti omologhi anche per le coppie di immagini più critiche (con angoli di vista relativi sino a 30°) fornendo un numero di corrispondenze nettamente superiore a quello strettamente necessario per l'orientamento. Il numero di punti estratti per ogni singolo blocco è riportato in Tabella 2. Come si può vedere, le corrispondenze identificate sono in numero nettamente superiore rispetto ai tradizionali progetti di fotogrammetria terrestre o aerea. Nel caso del blocco 4, ove sono riportati oltre 300000 punti sulle immagini, non è stato possibile completare la TA a causa dell'eccessivo costo computazionale. Per tale motivo, i punti di ogni blocco sono stati ridotti e regolarizzati con la procedura descritta al paragrafo 2 e quindi successivamente orientati. Le statistiche della compensazione dei blocchi in entrambe le configurazioni (con e senza riduzione) hanno evidenziato differenze minime. Appare quindi evidente come la decimazione dei punti non comporti un degrado della precisione ma renda più semplice anche l'individuazione di eventuali valori anomali grazie alla molteplicità dei punti utilizzati.

In Figura 2 sono riportati i punti di legame per una immagine del blocco 1 (sopra) e del blocco 3 (sotto). Come si può osservare, la regolarizzazione elimina i punti in quelle zone dell'immagine ove sono presenti delle informazioni ridondanti al fine dell'orientamento.

Blocco	Combinazioni complessive	Combinazioni stimate
Blocco 1	3160	1179
Blocco 2	2415	507
Blocco 3	496	170
Blocco 4	3741	897

Tabella 1. Numero delle coppie di immagini da analizzare senza (colonna sx.) e con l'ausilio della mappa di visibilità (colonna dx.), dalle quali è evidente il vantaggio offerto da questa.

	Blocco 1	Blocco 1	Blocco 3	Blocco 4
Senza riduzione				
Punti immagine	120765	57477	52878	331892
Punti oggetto	21248	27548	4040	-
RMS (px)	0,67	0,62	0,79	-
Outlier 3D	1207	122	3513	-
Con riduzione				
Punti immagine	10823	6498	3513	18320
Punti oggetto	1207	117	822	2353
RMS (px)	0,66	0,57	0,80	1,06
Outlier 3D	3	23	2	34

Tabella 2. Statistiche relative alla compensazione dei blocchi senza (in alto) e con la riduzione dei punti (in basso).

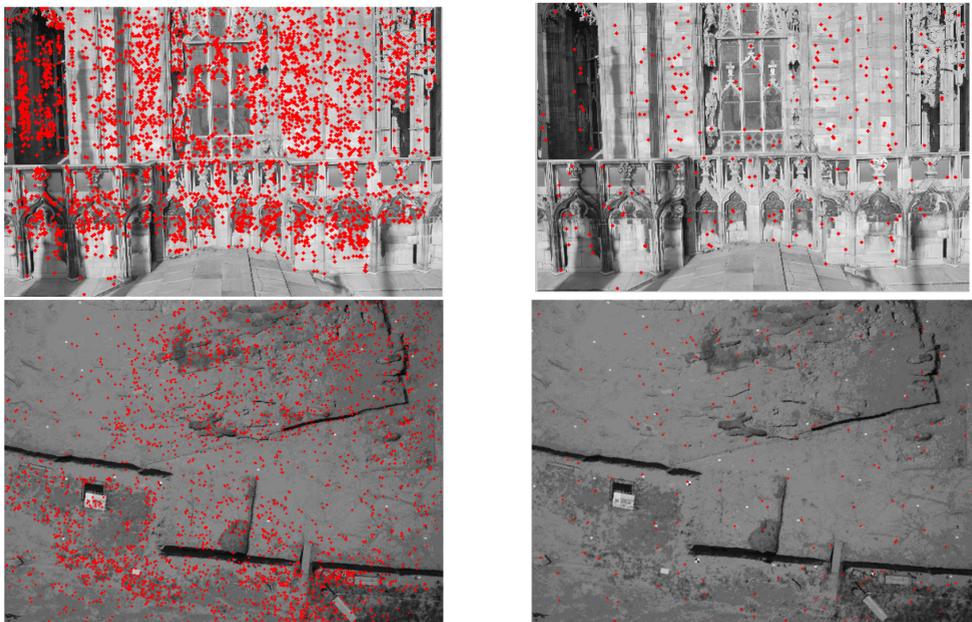


Figura 2. Punti di legame determinati prima (a sx.) e dopo (a dx.) la procedura di riduzione su due immagini dei blocchi 1 (in alto) e 3 (in basso).

3.2 Accuratezza del metodo

Per il blocco 4 sono stati anche utilizzati 3 punti di appoggio e 5 punti di controllo indipendenti per verificare la precisione dell'orientamento. Il blocco comprende 87 immagini aventi una scala media di 1:4400 e un pixel al suolo pari a 8×8 cm, riprese ad una altezza di volo di circa 35-40 m. Di tutti i blocchi analizzati, questo ha costituito l'unico caso in cui è fallito l'orientamento di una immagine, mentre per i rimanenti l'elaborazione ha permesso di orientarle tutte.

La precisione teorica in quota, stimabile con le ben note relazioni del caso normale, è di circa 8 cm. Gli RMSE calcolati usando i punti di controllo sono risultati pari a 4 cm, 3 cm e 7 cm lungo X, Y e Z rispettivamente. Tali valori sono in accordo con la precisione teorica, anche se l'analisi della

matrice di covarianza della compensazione ha fornito delle precisione teoriche di 0.6 cm, 0.6 cm e 2.3 cm, sempre lungo X , Y e Z . Tale differenza è sicuramente imputabile alla misura manuale dei punti di appoggio sulle immagini: i punti non erano sempre facilmente identificabili anche a causa di un notevole effetto di trascinamento in alcune delle immagini utilizzate.

4. Conclusioni

La procedura di matching descritta in questo articolo permette la misura automatica di un elevato numero di punti di legame per l'orientamento automatico di immagini acquisite con piattaforme UAV. Il metodo, precedentemente sviluppato per processare immagini terrestri, si avvale di tecniche e algoritmi provenienti sia dal settore della Computer Vision che dalla fotogrammetria, affiancate a procedure per la riduzione e regolarizzazione dei punti omologhi estratti automaticamente dalle immagini.

Tale metodologia è in grado di operare con dati GPS/INS ma anche senza alcuna informazione preliminare relativa alla posizione ed assetto delle immagini. I punti di legame estratti con ATiPE possono poi essere utilizzati con i più comuni software di fotogrammetria (Australis, iWitness, PhotoModeler, LPS) e consentono di orientare automaticamente blocchi di immagini laddove le tradizionali tecniche di triangolazione aerea richiedono ancora l'intervento dell'operatore per inizializzare le procedure di estrazione dei punti omologhi. L'unica parte interattiva dove l'intervento dell'operatore è ancora richiesto, rimane la misura dei punti di controllo, segnalizzati o naturali.

Ringraziamenti

Si ringrazia Zenit Srl per la disponibilità dei dati acquisiti mediante la piattaforma UAV Microdrone. Inoltre un ringraziamento va anche a Raffaella Brumana, Branca Cuca, Francesco Fassi e Federico Prandi (Politecnico di Milano) per le immagini del Duomo di Milano.

Bibliografia

- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L., 2008. SURF: Speeded up Robust Features. *Computer Vision Image Understanding*, Vol. 110(3): 346-359.
- Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., Brumana, R., 2010a. Fully automatic UAV image-based sensor orientation. *IAPRSSIS*, Vol. 38, Part 1, Calgary, Canada, 6 pp., su CDROM.
- Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., 2010b. Automation in 3D reconstruction: results on different kinds of close-range blocks. *IAPRSSIS*, Vol. 38, Part 5, Newcastle u. Tyne, UK: 55-61.
- Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., 2010c. Extraction of accurate tie points for automated pose estimation of close-range blocks. *IAPRSSIS*, Vol. 38, Part 3A, Parigi, 6 pp..
- Colomina, I., Blázquez, M., Molina, P., Parés, M.E. and Wis, M., 2008. Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. *IAPRSSIS*, Vol. 37, Part B1, Pechino: 1201-1206.
- Eisenbeiss, H., 2008. The autonomous mini helicopter: a powerful platform for mobile mapping. *IAPRSSIS*, Vol. 37, Part B1, Pechino: 977-983.
- Eugster, H., Nebiker, S., 2008. UAV-based augmented monitoring – real-time georeferencing and integration of video imagery with virtual globes. *IAPRSSIS*, Vol. 37, Part B1, Pechino: 1229-1235.
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. of Computer Vision*, Vol. 60(2): 91-110.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., 2006. *Close Range Photogrammetry, Principles, Methods and Applications*. Whittles Publishing, Caithness, Scozia (UK).
- Scaioni, M., Barazzetti, L., Brumana, R., Cuca, B., Fassi, F., Prandi, F., 2009. RC-Heli and Structure & Motion Techniques for the 3-D Reconstruction of a Milan Dome Spire. *IAPRSSIS*, Vol. 38, Part 5/W1, Trento, 6 pp., su CDROM.
- Vosselman, G., Maas, H.-G., 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Caithness, Scozia (UK).
- Wang, J., Garratt, M., Lambert, A., Wang, J.J., Han, S., Sinclair, D., 2008. Integration of GPS/INS/vision sensors to navigate unmanned aerial vehicles. *IAPRSSIS*, Vol. 37, Part B1-b, Pechino: 963-969.