

FOTOGPS: RIPRESE FOTOGRAMMETRICHE DIGITALI TERRESTRI ASSISTITE DA GPS

Gianfranco FORLANI^(*), Livio PINTO^(**)

^(*)Università degli Studi di Parma – viale delle Scienze – 26100 Parma – e-mail: gianfranco.forlani@unipr.it

^(**)DIAR Politecnico di Milano – p.zza L. da Vinci 32 – 20133 Milano – e-mail: livio.pinto@polimi.it

Riassunto

La procedura messa a punto è finalizzata al rilievo speditivo in ambito terrestre e prevede l'utilizzo di una camera fotografica digitale e di un'antenna GPS. Il sistema richiede un accoppiamento meccanico camera-GPS sufficientemente stabile che deve essere preventivamente calibrato per conoscere, nel sistema di riferimento immagine, la posizione del centro di fase dell'antenna GPS. Successivamente il rilievo viene condotto con l'unica accortezza di effettuare almeno 3 prese non allineate per ciascuna porzione di oggetto da restituire e, naturalmente, di avere una opportuna copertura satellitare. Le posizioni GPS forniscono un vincolo alle coordinate dei centri di presa permettendo l'orientamento delle immagini e la successiva restituzione. Vengono infine riportati i risultati ottenuti su alcuni poligoni di punti noti posti a terra o su edifici.

Abstract

Using GPS to georeference a terrestrial photogrammetric block is the subject of this paper. If a camera is tied to a GPS antenna, in such a way that the coordinates of the antenna phase centre with respect to the image frame are stable and known by calibration, the block can be adjusted without ground control points. The method provides the best results when the object (e.g. a building) can be surveyed from all sides; in case (because of obstructions to the GPS signal) projection centre can be measured in one side only, at least 3 non-collinear fixes are necessary. A few examples and the results on check points are presented.

Introduzione

Agli inizi degli anni '90 furono effettuate con successo le prime sperimentazioni in Italia di riprese aerofotogrammetriche assistite da GPS: interpolata al tempo di scatto della camera la posizione dell'antenna GPS di bordo, questa viene ridotta al centro di proiezione tramite un'equazione di pseudo-osservazione con parametri aggiuntivi inserita nella compensazione della TA del blocco. Il metodo permette forti riduzioni del numero di punti di appoggio a terra. In fotogrammetria terrestre l'integrazione di un apparato GPS alla fotocamera nella fase di ripresa è stata applicata (Vallet, 2000) per rilievi da elicottero di versanti soggetti a valanghe; la canadese Applanix ha sviluppato un prodotto detto Backpack costituito da GPS ed IMU integrati, che può essere interfacciato con una camera digitale, pensato per il rilievo terrestre. Camere digitali ad elevata risoluzione e basso costo nonché la presenza sul mercato di software per la calibrazione delle camere, la misura e l'orientamento delle immagini, ha ampliato notevolmente l'utenza dei prodotti fotogrammetrici, e rende interessante, per alcune applicazioni, non soltanto sostituire la fotogrammetria alla topografia, ma anche evitare il rilievo dei punti di appoggio del blocco. Nel rilievo tradizionale di un edificio, se non si dispone di GPS, occorre in genere rilevare una poligonale per l'inquadramento nonché una piccola rete per il rilievo dei punti di appoggio vero e proprio. Vincolando camera e antenna GPS si ha un inquadramento immediato e, sotto certe condizioni, si irrigidisce il blocco fotogrammetrico evitando comunque il rilievo con strumentazione topografica classica di punti sulle facciate,

vantaggioso soprattutto nel caso in cui ad operare sia un tecnico non particolarmente formato in ambito topografico.

La possibilità di ricorrere ai servizi di rilievo in tempo reale (RTK) forniti dalle reti di stazioni permanenti GPS (come quella gestita da Irealp in Regione Lombardia) rende il rilievo GPS semplice, in quanto non necessita di trattamento dati, e poco oneroso, perché comporta l'utilizzo di un solo ricevitore.

Come già fu messo in luce durante le sperimentazioni in ambito aereo, anche in questo tipo di applicazioni la georeferenziazione del blocco di immagini tramite vincoli di posizione sui centri di presa, può risentire di singolarità o malcondizionamenti dovuti alla conformazione geometrica dei vincoli. Ad esempio, in ambito aereo l'allineamento delle prese di una strisciata rende indeterminato o mal determinabile l'angolo di rotazione intorno all'asse di volo. Per questo motivo vengono imposti particolari schemi geometrici di ripresa, come ad esempio le strisciate trasversali al blocco, che ne eliminano le instabilità numeriche. Anche in abito terrestre è necessario un progetto accurato delle prese, in considerazione della conformazione dell'ambiente in cui si opera.

Gli utilizzi di questo sistema integrato spaziano dal rilevamento di costruzioni per l'aggiornamento cartografico, al rilevamento di architetture sia di tipo documentale che finalizzato al restauro, al rilievo in ambito archeologico, incidentistica stradale, ecc.

GPS asservito alla fotogrammetria terrestre

Molti software fotogrammetrici consentono ormai la restituzione di coppie di immagini ovvero la creazione di ortofoto noti i parametri di orientamento esterno (OE) delle immagini. Tali parametri sono il prodotto della compensazione delle osservazioni fotogrammetriche sui punti di legame; per eliminare la deficienza di rango del sistema di equazioni (cioè per inserire il rilievo in un particolare sistema di riferimento) e stabilizzare il blocco è necessario disporre di informazioni aggiuntive, costituite ad esempio da punti di appoggio rilevati sull'oggetto o dalla posizione dei centri di presa. Le coordinate del centro di fase dell'antenna all'istante della presa, ottenute in post-processamento o in modalità RTK, possono venire utilizzate nella compensazione del blocco con una equazione di pseudo-osservazione. La problematica è stata analizzata in fotogrammetria aerea da differenti autori (Ackerman, 1991; Forlani e Pinto, 1994) e ad essi si rimanda per una dettagliata analisi. Qui di seguito vengono presentati alcuni punti essenziali della procedura.

Si assume che le posizioni GPS siano quelle del tempo di scatto di ogni fotogramma, registrato ad esempio con l'impulso del flash dallo "event marker" nel ricevitore GPS o più semplicemente mantenendo ferma la camera durante l'acquisizione della posizione GPS in modalità stop&go.

L'equazione di osservazione deve collegare le coordinate del centro di fase dell'antenna al centro di proiezione della camera attraverso un vettore eccentricità; se il sistema di riferimento dell'oggetto non corrisponde a quello GPS (WGS84 o sua realizzazione locale) è richiesta una trasformazione di sistemi di riferimento.

La corretta riduzione del centro di fase dell'antenna al centro di proiezione richiede di conoscere le componenti del vettore eccentricità nel sistema oggetto, fotogramma per fotogramma. A tale scopo è possibile determinare tali componenti nel sistema di riferimento immagine e riportarli di volta in volta al sistema oggetto tramite la matrice di assetto del fotogramma. La riduzione viene eseguita durante la compensazione del blocco fotogrammetrico, esprimendo nell'equazione di pseudo-osservazione la rotazione nello spazio del vettore eccentricità. Quanto sopra vale nell'ipotesi che la camera, e quindi il suo piano immagine, rimanga nella medesima posizione relativa all'antenna GPS posseduta al tempo della misura dell'eccentricità. Ciò è garantito da un collegamento rigido, realizzato mediante una staffa, tra antenna GPS e fotocamera.

L'eccentricità viene considerata, inoltre, priva di errore (cioè le sue componenti non sono considerate dal modello stocastico), cosa accettabile poiché la precisione della sua determinazione (di cui si dirà più avanti) può essere spinta a livello di qualche mm.

Per quanto concerne la trasformazione dal sistema WGS84 al sistema di riferimento oggetto, essa può venire inclusa nell'equazione di pseudo-osservazione oppure attuata prima (o dopo) della

compensazione del blocco. Quest'ultima soluzione è da preferire perché separa il problema fotogrammetrico da quello geodetico: molto spesso tali parametri sono forniti da un Ente terzo, quale il gestore della rete di Stazioni Permanenti, l'IGM, ecc. Inoltre è sempre possibile trasformare le coordinate del centro di fase, e la relativa matrice di varianza e covarianza, dal sistema cartesiano geocentrico proprio del GPS ad un sistema di riferimento cartesiano locale "comodo". Se le dimensioni del rilievo sono limitate a qualche centinaio di metri, è anche consentito utilizzare direttamente le coordinate cartografiche UTM/WGS84.

In queste ipotesi è possibile scrivere:

$$X_g = X_o + R X_a \quad (1)$$

dove:

X_g = posizione dell'antenna interpolata al tempo t_j di scatto del fotogramma j ;

X_o, R = parametri di orientamento esterno del fotogramma j ;

X_a = vettore eccentricità fra antenna e centro di presa, misurato nel sistema immagine.

L'equazione di pseudo-osservazione contiene 6 incognite (i sei elementi dell'orientamento esterno), i tre valori "osservati" delle coordinate dell'antenna ed infine le tre componenti del vettore eccentricità. Per quanto concerne il modello stocastico, la matrice di covarianza delle pseudo-osservazioni non può essere considerata a rigori diagonale. Infatti la preliminare compensazione GPS produce correlazioni almeno tra le coordinate del singolo centro di fase dell'antenna: di questo si dovrebbe tener conto. In definitiva però si è scelto di trascurare queste correlazioni per evitare modifiche troppo pesanti del software di compensazione, anche alla luce di una serie di simulazioni che hanno ridimensionato gli effetti di questa semplificazione del modello stocastico sul valore dei parametri di OE.

La presenza delle pseudo-osservazioni elimina in generale la deficienza di rango delle equazioni di collinearità; possono tuttavia esservi situazioni di quasi singolarità: ad esempio, nei blocchi con centri di presa allineati e nessun appoggio a terra, l'angolo di assetto ω è sostanzialmente indeterminato (la strisciata è libera di ruotare attorno all'asse definito dai centri di presa).

Per ottenere un blocco fotogrammetrico stabile dal punto di vista numerico, le esperienze e simulazioni fatte indicano due disposizioni tipo delle stazioni di presa:

a) per oggetti aventi dimensioni comparabili in planimetria e quota, i punti GPS dovranno essere disposti attorno all'oggetto (non è strettamente necessario che tutti i centri di presa siano pseudo-osservati con GPS);

b) per gli oggetti aventi due dimensioni prevalenti (ad esempio facciate di edifici), i punti GPS dovranno essere disposti a quota o distanza significativamente differente (rispetto al valore della base di presa) dall'oggetto.

Quando l'oggetto e quindi il blocco non rientrano nelle due casistiche precedenti, ovvero non ha forma o dimensioni regolari, occorre valutare caso per caso la configurazione geometrica ottimale dei punti GPS; può essere a tale scopo utile ricorrere alla simulazione del blocco.

Il FotoGPS

La camera deve avere buona qualità fotogrammetriche; nella sperimentazione sono state impiegate camere digitali con obiettivi intercambiabili calibrati (Nikon D70 e D100 con focale di 20 mm).

Le precisioni per i centri di presa devono essere almeno subdecimetriche, standard per un ricevitore doppia frequenza in configurazione differenziale; con buona probabilità (ma non sono state fatte prove in merito) può bastare un ricevitore monofrequenza sempre in configurazione differenziale. La disponibilità di una rete di Stazioni Permanenti GPS permette di lavorare con un solo ricevitore ed è garanzia di qualità del prodotto finale. Al fine di semplificare il più possibile il rilievo dal lato GPS e a patto di determinare 4 o più centri di presa, si può impiegare la modalità RTK, in quanto il sistema è in grado di localizzare eventuali outlier tramite l'analisi dei residui normalizzati delle equazioni di pseudo-osservazione dei centri di fase GPS.

Durante la sperimentazione sono stati utilizzati una coppia di ricevitori Leica 530 con antenna AT502 e trattamento cinematico in post processamento e un ricevitore Trimble 5700 in configurazione NRTK (Network Real Time Kinematic) nella rete Irealp della Regione Lombardia. Come più volte segnalato, antenna GPS e fotocamera devono essere rigidamente collegate e deve essere noto il vettore eccentricità tra centro di fase dell'antenna e centro di proiezione (centro della pupilla di ingresso dell'obiettivo). Nella sperimentazione si è utilizzata una palina topografica ed una staffa metallica collegata alla palina e sulla quale è stata avvitata la fotocamera (figura 1). La misura delle componenti del vettore, nel sistema di riferimento legato all'immagine, non presenta particolari difficoltà: si può fotografare un poligono di punti noti contemporaneamente alla misura del centro di fase GPS, ovvero, se il poligono non è in coordinate WGS, determinare con teodolite una mira intercambiabile con l'antenna, tenendo conto delle altezze strumentali. In questo caso nell'equazione (1) tutte le quantità sono note tranne X_a , per cui:

$$X_a = R^+ (X_g - X_o) \quad (2)$$



Figura 1 – a) la strumentazione del test di Lodi; b) determinazione del vettore X_a .

Si è detto che il sistema nasce per determinare punti di legame e parametri di O.E. da utilizzare per una restituzione monoscopica. Misurate le coordinate immagine di una serie di punti di legame, secondo le usuali procedure fotogrammetriche, si procede alla compensazione del blocco. Nella sperimentazione è stato utilizzato il software CALGE (Forlani, Pinto, 1994) che permette di scrivere le pseudo-osservazioni nella forma (1) accanto alle usuali equazioni di collinearità. Il programma permette altresì la determinazione dei parametri di calibrazione della fotocamera, anche se tale opportunità non è servita in quanto, durante i test, le osservazioni sono state preventivamente riportate al punto principale e corrette dagli errori sistematici di distorsione dell'obiettivo stimati con il software Photomodeler.

Risultati di alcuni test preliminari

I test svolti con il FotoGPS sono stati realizzati valutando due quantità:

- 1) la precisione teorica conseguibile in termini di valore quadratico medio degli sqm di compensazione ($RMS(sqm)$);
- 2) gli errori quadratici medi ($Eqm(GCP)$) su una serie di punti di controllo acquisiti con teodolite e in modo indipendente dal rilievo fotogrammetrico.

La compensazione è stata realizzata con il programma CALGE, mentre le osservazioni fotogrammetriche dei punti di legame e i valori approssimati dei parametri incogniti sono stati ricavati con il software Photomodeler. Sempre con lo stesso software si sono determinati i valori di O.E. per la calibrazione del sistema con l'equazione (2), vale a dire la determinazione del vettore eccentricità tra centro di fase GPS e centro di presa. Qui di seguito si riportano i risultati di 3 test: Parcheggio Lodi, Dipartimento di Matematica e Palazzina Servizi del campus di Parma (tabella 5).

Es.1- Parcheggio di Lodi

L'oggetto rilevato è il piazzale del parcheggio del Polisportivo di Lodi (figura 2). La configurazione di blocco è con 6 prese, 3 a 3 contrapposte rispetto all'asse del parcheggio. Tale configurazione è risultata ottimale secondo una simulazione effettuata preventivamente. Il sistema di riferimento è l'IGB00, quello della rete di Stazioni Permanenti GPS IREALP. I 6 punti GPS sono stati determinati in modalità NRTK: la precisione GPS in compensazione è stata assunta pari a 0.03 m. Il vettore eccentricità, nel sistema di riferimento immagine vale: $\Delta x, y, z = -0.143, 0.456, 0.021$ m.



Figura 2 – Una delle immagini del Parcheggio utilizzata nel test e schema delle prese e dei GCP

Es. 2 - Edificio di matematica a Parma

Il Dipartimento di Matematica è stato ripreso con 22 immagini, con GPS in modalità stop&go con perdita di segnale in due casi per presenza di vegetazione e nuova inizializzazione. I check point sono stati rilevati con teodolite rispetto a due punti noti siti nelle vicinanze (figura 3).

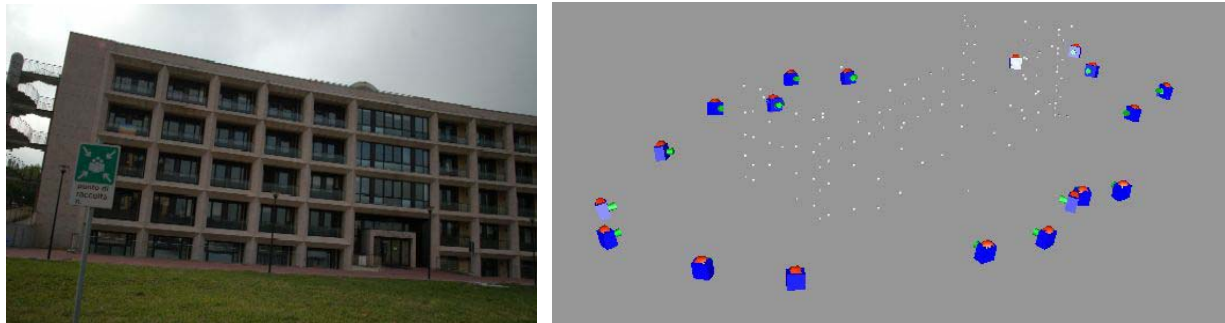


Figura 3 – Una delle immagini del Dip. di Matematica utilizzata nel test e schema delle prese

Es. 3 – Palazzina servizi campus

La palazzina è stata ripresa con 11 immagini, senza perdite di segnale GPS. I check points sono stati rilevati con teodolite da stazioni di poligonale GPS collegate alla rete del campus (figura 4).



Figura 4 – Una delle immagini della Palazzina servizi utilizzata nel test e schema delle prese

Nella seguente tabella (tabella 5) vengono riportati i parametri significativi delle compensazioni effettuate con CALGE nei tre esempi test. Le compensazioni sono state realizzate in un sistema cartesiano locale (gli assi X, Y, Z sono tangenti localmente alle direzioni Est, Nord, H).

In tutti e tre i casi la precisione teorica del blocco (RMS(sqm)) risulta essere migliore (anche se non di molto) di quella raggiunta in pratica sui punti di controllo (EQM(GCP)). Ciò è in gran parte dovuto allo schema di blocco (molto rigido) e in secondo istanza alla precisione dei punti di controllo. Per blocchi meno rigidi (prese solo su un lato dell'oggetto) la precisione teorica peggiora ma sostanzialmente non cambiano gli errori sui punti di controllo.

	Parcheggio	Dip. Matematica	Palazzina
# GCP	27	16 (su unico lato)	19
Sqm GCP	20 mm	20 mm	10 mm
# Equazioni, Incognite	304, 117	1160, 489	789, 387
Sqm misure fotogrammetriche	8 μ m	7 μ m	8 μ m
RMS(sqm) X, Y, Z [mm]	14, 15, 16	22, 23, 26	27, 25, 31
Eqm(GCP) X, Y, Z [mm]	38, 35, 6	53, 31, 61	29, 57, 33

Tabella 5 – Risultati della compensazione ed errori sui check points

Conclusioni

I test eseguiti, pur senza pretese di completezza e pur essendo opportune analisi più approfondite (qui non riportate per motivi di sintesi) mostrano che le precisioni raggiunte sono in linea con quanto richiesto nella maggior parte degli impieghi ad esclusione del controllo strutturale.

Restano aperti alcuni problemi operativi sulla configurazione di presa nei casi in cui vi siano vincoli di ricezione o ristrettezza di spazi per la ripresa. Qualora le prese siano effettuate tutte sostanzialmente dalla medesima quota e con un'unica strisciata, permane una certa instabilità angolare dei parametri di orientamento esterno. Sarebbe quindi opportuno avere sempre due strisciate riprese a distanze diverse (magari con focali differenti), almeno per gli edifici o i fronti di maggior estensione.

Ringraziamenti

Un grazie doveroso agli studenti Daniele Benini, Davide Capelli laureandi in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio del Politecnico di Milano, e Francesco Ganelli, laureando in Ingegneria Civile dell'Università di Parma, che su queste tematiche discutono la loro tesi di laurea.

Riconoscimenti

Il presente lavoro è stato finanziato con fondi del MIUR- Cofin 2004 prot. 2004082282, nell'ambito del progetto PRIN "I servizi di posizionamento satellitare per l'e-government", coordinato dal Prof. F. Sansò del Politecnico di Milano-DIAR.

Bibliografia

Ackerman, F. (1991) : GPS for Photogrammetry. In: ISPRS Intercommission Working Group III/IV; "Mathematical Aspects of Data Analysis"; Milano 1991, pp. 17-70.
 Forlani G., Pinto L., (1994): Aerotriangolazione con dati GPS. Bollettino della SIFET n.2; pp. 149-168.
 Vallet, J., Skaloud, J., Koelbl, O., Merminod, B. (2000). Development of a Helicopter-based integrated system for avalanche and hazard management. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 33 part B2, Amsterdam: 565-572.