

CAPITOLO 8.2

IMPLEMENTAZIONE ED AGGIORNAMENTO DI DB TOPOGRAFICI E GIS

Gianfranco Forlani

Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura, Università degli studi di Parma
e-mail: gianfranco.forlani@unipr.it

SOMMARIO

Il rilievo di aggiornamento per DB topografici, GIS e cartografia numerica può trarre vantaggio dalla combinazione tra fotogrammetria ed una rete di stazioni permanenti GPS. L'obiettivo è combinare la flessibilità e la ricchezza di informazioni della fotogrammetria con la ubiquità e la precisione del posizionamento GPS. A tale fine è stato sviluppato un prototipo di strumento chiamato fotoGPS in cui un'antenna GPS è in posizione nota e costante rispetto ad una camera fotogrammetrica. La posizione GPS al tempo di scatto viene quindi impiegata per l'orientamento delle immagini, eliminando la necessità di rilevare punti a terra. L'ambito applicativo della tecnica è in cui l'oggetto da rilevare non è accessibile od è elevato (e quindi non direttamente raggiungibile con GPS), in particolare il rilievo di aggiornamento cartografico della nuova edificazione. Le precisioni su punti di controllo rilevati in modo indipendente nonché prove di ripetibilità nel rilievo del medesimo edificio in epoche differenti hanno portato a discrepanze dell'ordine di 5-7 cm. Il sistema è stato sviluppato congiuntamente col gruppo del prof. Livio Pinto del Politecnico di Milano.

1 INTRODUZIONE

L'impiego di tecnologie di rilevamento "autonome", in cui l'operatore non deve agganciarsi a punti noti per inquadrare il rilievo è di interesse in molte applicazioni, sia in ambito urbano sia extra-urbano. Il GPS (in particolare entro una rete di stazioni permanenti) rappresenta naturalmente il sistema principe, quando i punti siano accessibili. In caso contrario, occorre far ricorso a misure integrative (tipicamente distanze). Quando tuttavia il numero di punti e dettagli da rilevare è consistente, diviene competitivo l'impiego della fotogrammetria, anche per le sue intrinseche caratteristiche di archiviazione dei dati; il problema diventa però quello di orientare in modo semplice e prescindendo da punti rilevati le immagini riprese. La misura diretta dei parametri di orientamento esterno richiede tuttavia l'integrazione di tecnologie GPS ed inerziali, con costi ancora piuttosto elevati. Un'alternativa intermedia è di orientare le immagini passando comunque attraverso la collimazione di punti di legame tra fotogrammi e la struttura di blocco, ma evitando di rilevare punti sull'oggetto e determinando invece i centri di presa con GPS, in modo analogo alla triangolazione aerea assistita da GPS (Ackermann, 1991; Forlani e Pinto, 1994). Un sistema messo a punto per riprese da elicottero (Vallet, 2000) sia con solo GPS sia, in una successiva versione, con GPS ed inerziale, nonché il Backpack commercializzato da Applanix costituiscono due esempi di integrazione tra fotogrammetria e GPS. In questo ambito si è sviluppato ed applicato ad una serie di casi significativi un prototipo di sistema di rilievo fotogrammetrico integrato al GPS, costituito da una camera fotogrammetrica rigidamente collegata ad un'antenna GPS e dallo specifico software di elaborazione dei dati. Il sistema consente la georeferenziazione dei fotogrammi a partire da misure fotogrammetriche e dai dati GPS rilevati in contemporanea alle prese delle immagini, evitando il rilievo dei punti di appoggio del blocco con GPS o altri metodi topografici. I campi di applicazione sono i rilievi di aree non troppo estese, in particolare l'edificato, adatte ad essere riprese con fotogrammetria terrestre e con precisioni di restituzione fino a 5-10 cm.

2 REQUISITI HARDWARE E SOFTWARE DEL SISTEMA

Per quanto riguarda l'hardware, a seconda delle caratteristiche di camera e ricevitore variano le precisioni conseguibili (da pochi cm a qualche decina di cm) e l'estensione rilevabile e quindi il campo di impiego. Nei due prototipi sviluppati e nella sperimentazione si è impiegato materiale di qualità, ovvero camere digitali di risoluzione elevata, adatte agli impieghi fotogrammetrici e pertanto dotate di ottiche intercambiabili calibrate nonché ricevitori GPS di tipo geodetico. La connessione tra fotocamera e GPS deve essere di tipo meccanico e software: nel primo prototipo realizzato la prima è stata assicurata montando l'antenna su palina e fissando la camera ad una staffa, a sua volta bloccata sulla palina; nel secondo una barra ad L connette direttamente camera e antenna. Si tratta soluzioni che, pur adeguata alle sperimentazioni, sono migliorabili (è opportuno ridurre l'eccentricità camera-antenna e consentire la rotazione in senso zenitale della camera) con una progettazione meccanica specifica dell'accoppiamento. Per quanto riguarda l'interfacciamento software, esso è conveniente qualora si scattino le foto in modalità cinematica pura (anziché in stop&go) e quindi venga a mancare l'associazione tra punti della traiettoria (numerati automaticamente) e le foto; in tal caso si è realizzato un dispositivo che sfrutta da un lato il flash della camera e dall'altro la porta input event del ricevitore per registrare il tempo di scatto.

Per quanto riguarda i requisiti software, occorre anzitutto elaborare i dati GPS per ottenere le posizioni delle antenne agli istanti di scatto; se si lavora in cinematico puro occorre interpolare nel tempo la traiettoria; con lo stop&go non è necessario, purchè si resti immobili. Dal momento che il dato di posizione GPS non è sufficiente a determinare i parametri di orientamento esterno della presa, occorre passare attraverso la formazione di un piccolo blocco (di almeno 3 fotogrammi) e la misura di punti di legame: a questo scopo si può impiegare qualsiasi sw fotogrammetrico presente sul mercato, purchè con esportazione delle coordinate immagine. Per le caratteristiche del metodo, i dati di posizione GPS e le coordinate immagine dei punti di legame devono poi essere importati in un programma di calcolo appositamente sviluppato che, implementando una specifica equazione di pseudo-osservazione dei centri di proiezione con GPS, consente l'orientamento del blocco di fotogrammi da cui si desumono gli orientamenti esterni delle immagini e le coordinate oggetto dei punti di legame, da impiegare per la restituzione vera e propria. La 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 stata predisposta una semplice procedura per determinare (in fase di calibrazione del sistema) tali componenti nel sistema di riferimento immagine e riportarli di volta in volta al sistema oggetto tramite la matrice di assetto del fotogramma.

3 PROBLEMATICHE OPERATIVE DEL SISTEMA

Le funzioni del GPS nel sistema possono essere di due tipi: semplice georeferenziazione del blocco o, nei casi più complessi, vincolo aggiuntivo dello stesso per limitarne le deformazioni. Per ciascuna sono state studiate, sia attraverso simulazioni (con lo sviluppo di un sw con visualizzazione dei risultati in ambiente AutoCad) sia attraverso sperimentazioni, le problematiche.

Per quanto riguarda la prima, occorre salvaguardare la georeferenziazione propriamente detta sia la messa in scala del blocco. Per la prima occorrono almeno, come detto, 3 foto da posizioni GPS non allineate. Sia la simulazione sia la sperimentazione hanno mostrato che i risultati migliori si hanno con un triangolo delle posizioni approssimativamente equilatero; nel caso di un edificio, i punti possono essere sia su fronti opposti sia su un medesimo fronte (ad esempio con due prese ravvicinate ed una arretrata). Per la messa in scala, la soluzione migliore è misurare direttamente una o più lunghezze sull'oggetto: si ha maggior affidabilità e precisione; in alternativa, ci si avvale delle distanze tra i centri di presa misurate dal GPS: la precisione della scala migliora in tal caso maggiori sono le interdistanze tra i punti di presa, a parità di errore GPS.

Data la varietà delle conformazioni dei blocchi, non è possibile pervenire a relazioni analitiche o regole precise per definire quando il GPS è utile nel vincolare il blocco; tuttavia è possibile eseguire simu-

lazioni caso per caso, una volta nota con buona approssimazione la forma dell'oggetto da rilevare. Assegnate le precisioni fotogrammetriche e quelle GPS attese, si verifica immediatamente se il blocco resta nei parametri di qualità oppure se la precisione o il numero di posizioni note è insufficiente. Come conclusione generale (scontata, ma non per questo meno vera), si può dire che conviene riprendere un blocco molto rigido fotogrammetricamente, effettuando prese aggiuntive rispetto alle necessarie per la restituzione, in modo da equilibrare il peso della fotogrammetria e del GPS nella soluzione. Non bisogna infatti trascurare il problema della controllabilità del vincolo, che con il GPS si presenta in generale più grave rispetto a quello dei punti di appoggio topografici, se rilevati in modo ridondante.

4 VANTAGGI DELLA PRESENZA DI UNA RETE DI SP E DELLA MODALITÀ RTK

Per assicurare precisioni centimetriche, occorre naturalmente far ricorso al posizionamento relativo in post-processamento o meglio ancora, dal punto di vista operativo, al posizionamento differenziale in tempo reale. Dover ricorrere a due ricevitori è tuttavia scomodo e riduce notevolmente l'interesse del metodo, dovendo normalmente la stazione fissa essere presidiata. In una rete di SP questa necessità viene ovviamente meno.

Nel rilievo di edifici in centri urbani, dove la visibilità satellitare può essere scarsa e gli spostamenti per gli accessi ai diversi fronti dell'edificio a rischio di perdita del segnale, il sistema incontra obiettive difficoltà operative: in questo caso naturalmente è di grande vantaggio la modalità RTK per garantirsi che l'ambiguità possa essere stata fissata. La presenza di una rete di stazioni permanenti GPS (come quella gestita da Irealp in Regione Lombardia) in modalità RTK rende il rilievo GPS semplice, in quanto non necessita di trattamento dati, e poco oneroso, perché comporta l'utilizzo di un solo ricevitore. Inoltre i tempi di ri-inizializzazione sono nella maggior parte dei casi del tutto accettabili (dell'ordine di qualche decina di secondi), ovvero sostanzialmente equivalenti a quelli necessari per scegliere la stazione di presa più idonea. L'esperienza fatta in ambiente urbano ha rivelato tuttavia che vi possono essere casi in cui i tempi si allungano anche a qualche minuto (ovvero diventano comparabili ad una inizializzazione statica) se la copertura telefonica causa cadute nella ricezione dei dati RTK o comunque vi sono problemi di latenza del segnale.

Gli utilizzi di questo sistema integrato spaziano dal rilevamento di edifici e costruzioni per l'aggiornamento cartografico, al rilevamento di architetture (sia di tipo documentale sia finalizzato al restauro), al rilievo archeologico in superficie, a quello degli incidenti stradali.

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 è consigliabile impiegare la modalità RTK; tuttavia, poiché in questa modalità vi possono essere sistematismi e derive della soluzione, è opportuno determinare 4 o più centri di presa. Se il blocco fotogrammetrico è sufficientemente autoconsistente, il sistema è in grado di localizzare eventuali outlier nella soluzione GPS 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; un ricevitore Trimble 5700 ed un ricevitore Leica 1230 GG in configurazione NRTK (Network Real Time Kinematic) connessi con protocollo NTRIP alla rete IREALP della Regione Lombardia.

5 RISULTATI DI ALCUNI TEST

Sono stati effettuati sia test riprendendo superfici orizzontali (parcheggio) sia edifici di mole e condizioni di ricezione GPS differenti. Per tre di questi casi sono stati valutati gli errori quadratici medi (EQM) su una serie di punti di controllo acquisiti con teodolite e in modo indipendente dal rilievo fotogrammetrico. La compensazione è stata realizzata con la versione del programma CALGE modificata appositamente.

mente per includere le pseudo-osservazioni dei centri di presa, 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 vettore eccentricità tra centro di fase GPS e centro di presa. Quest'ultima è stata effettuata in modi diversi, ottenendo una ripetibilità del vettore e delle componenti dell'ordine di 1-2 cm. Il procedimento più semplice è realizzare un poligono rilevato con GPS e riprenderlo con la camera mentre il GPS misura la posizione, ricavando il centro di presa per intersezione inversa e la posizione dell'antenna dalle misure GPS. Non sono necessarie particolari caratteristiche per il poligono: ad esempio uno di quelli utilizzati è stato ottenuto da punti rilevati con sulle demarcazioni dei posti di sosta in un parcheggio.

Parcheggio: Blocco di 6 immagini, 27 Check Points; i 6 punti GPS sono stati determinati in modalità NRTK rispetto alla rete IREALP. EQM XYZ di 38 mm, 35 mm, 6 mm.

Edificio 1: Blocco di 22 immagini, rilevato con GPS in modalità stop&go; 16 Check Points; perdita di segnale in due casi (presenza di vegetazione) con nuova inizializzazione. EQM XYZ di 53 mm, 31 mm, 61 mm.

Edificio 2: Blocco di 11 immagini, 19 Check Points; senza perdite di segnale GPS. EQM XYZ di 29 mm, 57 mm, 33 mm

6 CONCLUSIONI

Si può quindi concludere che il sistema sviluppato raggiunge precisioni superiori a quanto richiesto dai rilievi cartografici di aggiornamento di cartografia tecnica anche a grandissima scala; con impiego di hw di livello, può essere impiegato anche per i rilievi architettonici in spazi aperti, ma a scale inferiori a 1:200. Vi sono una serie di problemi operativi legati alla configurazione di presa nei casi in cui vi siano vincoli di ricezione (dei satelliti come del traffico telefonico) o ristrettezza di spazi, particolarmente sensibili qualora si operi in zone con edifici a parecchi piani e vegetazione; questi vengono tuttavia assai ridotti o eliminati in presenza di reti di SP

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., (2006): *Fotogps: riprese fotogrammetriche digitali terrestri assistite da GPS*; 10^a Conferenza Nazionale ASITA, Fiera di Bozano, 14-17 novembre 2006.
- 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, pp 565-572.

APPENDICE 8.2.A1 FOTOGPS: RIPRESE FOTOGRAMMETRICHE DIGITALI TERRESTRI ASSISTITE DA GPS

Gianfranco Forlani (1), Livio Pinto (2)

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

(2) 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.

1 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.

2 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 singularità: 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.

3 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.

4 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.

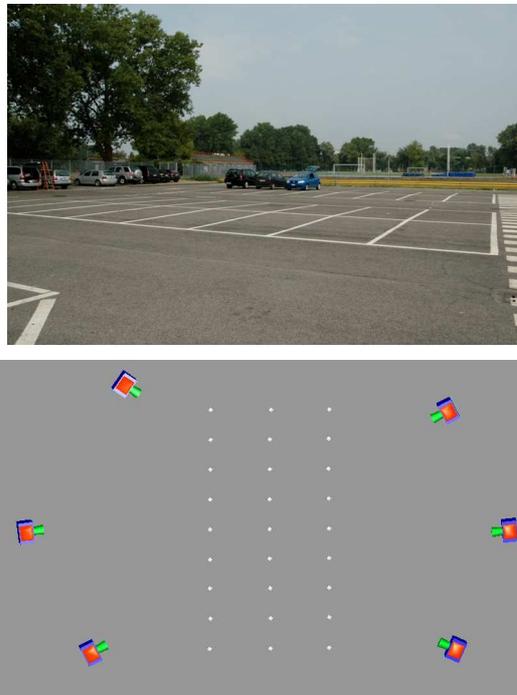


Figura 2 – Una delle immagini del Parcheggio utilizzata nel test e schema delle prese e dei GCP

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).

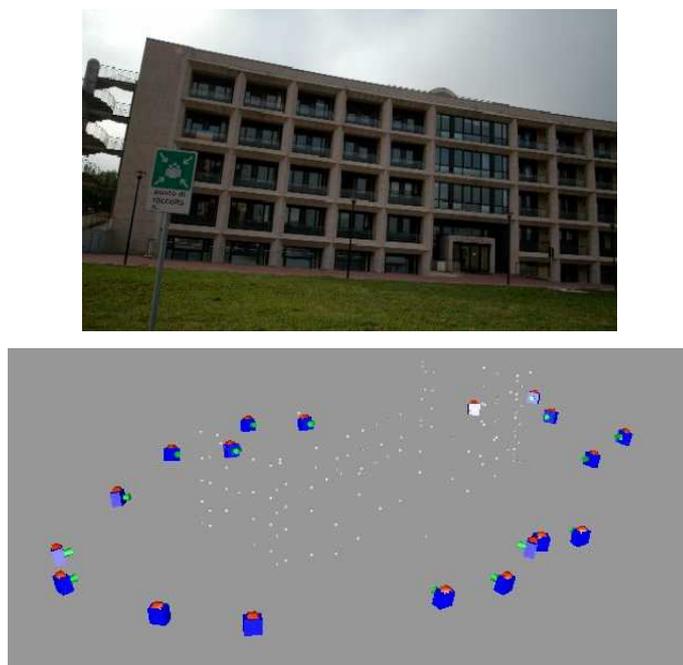


Figura 3 – Una delle immagini del Dip. di Matematica utilizzata nel test e schema delle prese

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).

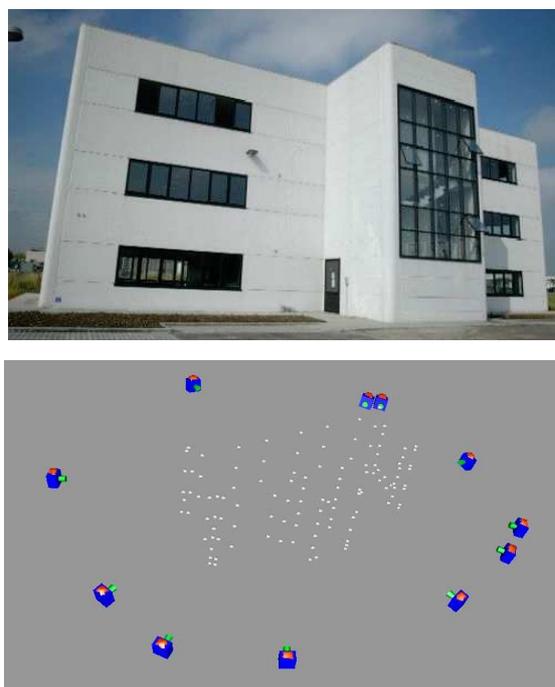


Figura 4 – Una delle immagini della Palazzina servizi utilizzata nel test e schema delle prese

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., (2006): *Fotogps: riprese fotogrammetriche digitali terrestri assistite da GPS*; 10^a Conferenza Nazionale ASITA, Fiera di Bozano, 14-17 novembre 2006.
- 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 avalanches and hazard management*. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 33 part B2, Amsterdam, pp 565-572.