

Il posizionamento dei sottoservizi con GPR: un approccio fotogrammetrico per il calcolo della traiettoria

Noemi E. Cazzaniga (*), Diana Pagliari (*), Livio Pinto (*), Riccardo Roncella(**)

(*) Diar, Politecnico di Milano, P.zza L. da Vinci 32, 20133 Milano, Tel. 0223996543,
e-mail noemi.cazzaniga@polimi.it; diana.pagliari@mail.polimi.it; livio.pinto@polimi.it

(**) DIC, Università degli Studi di Parma, Viale delle Scienze, 43100 Parma,
Tel. 0521905934; e-mail: riccardo.roncella@unipr.it

Riassunto

Un metodo frequentemente impiegato per indagare il sottosuolo nei primi metri è il Ground Penetrating Radar (GPR). Per rilievi di grande estensione, esso viene montato su un carrello trainato da veicolo, che si muove con una velocità non superiore ai 15-20 km/h; la georeferenziazione avviene tramite GPS. Spesso in ambito urbano tale procedura è ostacolata dai frequenti cycle slip o perdite del segnale da parte della strumentazione GPS. Gli autori propongono un metodo di posizionamento, valevole in tale ambito, basato su un approccio di tipo fotogrammetrico: per ricostruire la traiettoria del veicolo si determinano le posizioni dei centri di presa delle fotocamere che inquadrano scene aventi geometria nota, deducibile dalla cartografia a grande scala. All'interno del presente lavoro sono presentati i risultati di alcuni test svolti con lo scopo di verificare la fattibilità e le precisioni raggiungibili. Le precisioni raggiunte sono in linea con quelle necessarie al GPR, vale a dire 20-30 cm nelle tre coordinate spaziali.

Abstract

Ground Penetrating Radar (GPR) is the method normally used to investigate the subsurface. It is usually mounted on a carriage driven by the vehicle, which moves with a speed of about 15-20 km/h, the geo-referencing takes place with GPS equipment. The authors propose a positioning method, valid in urban areas, based on a photogrammetric approach. To reconstruct the trajectory of the vehicle it is important to determine the positions of the camera projection centres with known geometry, deducible from large scale maps. This work presents the results of some tests with the aim to verify the attainable feasibility and accuracy. The accuracies reached are in line with those of the GPR, ie 20-30 cm in the three spatial coordinates.

Introduzione

Il metodo proposto per il posizionamento in ambito urbano richiede l'impiego di una o più fotocamere che inquadrano le facciate degli edifici, e di una antenna GPS da installare sul veicolo al quale è rigidamente vincolata l'antenna georadar. Per georeferenziare il blocco fotogrammetrico acquisito in fase di rilievo è necessario conoscere l'orientamento interno ed esterno delle fotocamere. L'orientamento interno può essere considerato costante durante la fase di rilievo e viene determinato attraverso una calibrazione analitica a nuvola di punti utilizzando il software commerciale PhotoModeler[®]. L'orientamento esterno cambia durante il movimento del veicolo e può essere ricostruito con una procedura di bundle-adjustment, utilizzando punti di legame e vincolando il blocco con punti d'appoggio (Ground Control Point – GCP) estratti dalla cartografia a grande scala. I punti di legame sono estratti automaticamente utilizzando delle tecniche robuste di S&M (*Structure and Motion*).

La posizione dell'antenna georadar è determinabile poiché il sistema di navigazione (camere e GPS) e il GPR sono rigidamente vincolati al veicolo. La posizione del centro di fase dell'antenna

GPS e la rototraslazione tra il sistema di riferimento camera e quello del veicolo può essere determinato durante la fase di calibrazione del sistema (figura 1).

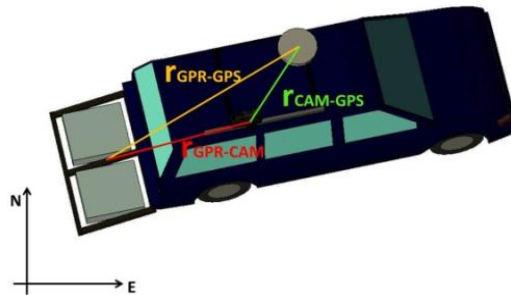


Figura 1. Vettori di calibrazione tra gli strumenti.

In un precedente lavoro (Barzaghi et al., 2009) sono state dimostrate le potenzialità del metodo proposto con una serie di simulazioni svolte nella città di Milano; in quel caso si era supposto di equipaggiare il veicolo con un GPS e due camere che riprendono i due lati della strada. Era stato considerato anche il caso in cui solo una camera riprendeva un lato della strada. I punti di legame erano stati localizzati lungo una griglia regolare, con passo 4 metri, sulle facciate degli edifici.

Estrazione automatica dei punti omologhi

Con lo scopo di velocizzare l'orientamento esterno del blocco fotogrammetrico è fondamentale automatizzare la fase di estrazione dei punti omologhi: essi possono essere facilmente individuati su un elevato numero di immagini utilizzando tecniche di S&M, poiché l'ambiente urbano offre un elevato numero di dettagli che rendono facile, per operatori di interesse, individuare delle *features* caratteristiche. Il software utilizzato durante i test di seguito illustrati è EyeDEA, sviluppato presso l'Università degli Studi di Parma (Roncella et al., 2011a; Roncella et al., 2011b). Al suo interno sono implementati l'operatore e il descrittore SURF (Bay et al., 2008).

Poiché gli operatori di interesse individuano, in genere, un elevato numero di punti di interesse, caratterizzati però anche da un elevato numero di corrispondenze errate, all'interno del software EyeDEA sono state implementate delle tecniche robuste per la reiezione degli errori grossolani sia di tipo geometrico (con l'imposizione dei vincoli epipolare e trifocale) che utilizzando un sistema di stima robusto (il paradigma RANSAC, molto utile poiché permette di trattare set di dati che contengono una elevata percentuale di errori grossolani).

Si immagina che le sequenze acquisite in condizioni operative siano molto lunghe ed è quindi fondamentale ottimizzare la distribuzione dei punti omologhi, riducendo la mole di dati e il tempo computazionale, garantendo però, al tempo stesso, il raggiungimento dei medesimi livelli di precisione. L'ottimizzazione dei punti omologhi è stata realizzata tramite l'utilizzo di una funzione scritta in Matlab®. La decimazione dei punti di legame viene svolta cercando di mantenere una buona distribuzione spaziale degli stessi, preservandone però anche la molteplicità.

Sulla base di una serie di test preliminari è poi emerso come per assicurare una distribuzione omogenea dei *tie points* sui fotogrammi sia necessario pre-processare le immagini con il filtro di Wallis (Wallis, 1976). Tale filtro esalta i contrasti locali preservando allo stesso tempo i dettagli degli oggetti: in questo modo si è potuto estrarre punti anche laddove la *texture* non risultava essere così evidente.

Estrazione automatica dei punti di appoggio dalla cartografia

Per georeferenziare la strisciata fotogrammetrica e per ridurre la deriva della soluzione possono essere estratte da una mappa a grande scala della zona del rilievo le coordinate di alcuni GCPs.

Questi punti, quali ad esempio spigoli di edifici, muretti ecc., sono solo potenzialmente visibili sui fotogrammi acquisiti a causa della possibile presenza di ostacoli, come ad esempio auto in sosta, alberi o fioriere.

Per evitare errori grossolani connessi con l'estrazione manuale dei punti di appoggio e per velocizzare questa fase è stata implementata una procedura automatizzata. Essa prevede l'utilizzo di uno script appositamente realizzato con ArcGIS Desktop Model Builder® per l'estrazione delle coordinate planimetriche di tutti i vertici delle polilinee che compongono i poligoni degli edifici e uno script Matlab® che permette di individuare quali di questi vertici siano effettivamente degli spigoli di edifici. Questa funzione verifica che l'angolo formato da due vertici (definiti da tre punti consecutivi) sia inferiore ad un certo valore di soglia: in questo caso il punto viene riconosciuto come uno spigolo di edificio. Per quanto riguarda la quota del GCP essa viene definita considerando l'altimetria del più vicino punto quotato.

Configurazione degli strumenti

Le fotocamere utilizzate per tutti i test presentati di seguito sono due Nikon D70s SLR, con obiettivo con focale fissa da 20 mm. Il formato della camera è rettangolare, composto da 3008x2000 pixel. La dimensione del pixel è pari a circa 7.1 µm.

Per poter definire al meglio la configurazione ideale delle fotocamere si è deciso di svolgere una serie di simulazioni compensando i blocchi fotogrammetrici con il software scientifico Calge (Forlani, 1986). Sono state considerate configurazioni con camere in assetto leggermente convergente o nadirale, con ricoprimenti del 60 e del 75%. A tal fine si è ipotizzato di conoscere la posizione di 48 punti, distribuiti regolarmente su 3 righe alle altezze di 1, 5 e 9 metri da terra. In particolare sono state considerate quattro diverse configurazioni. Nel primo caso si sono ipotizzate 3 acquisizioni della coppia di fotocamere con assetto convergente, poste ad una distanza di circa 15 metri dall'edificio. Nel secondo caso sono state inserite nuove acquisizioni interposte tra quelle precedenti simulando in questo modo una maggior frequenza di scatto. Nel terzo e nel quarto caso sono state considerate delle prese con camere in assetto nadirale. Dai nostri test è emerso come la geometria preferibile sia la seconda: acquisizioni frequenti (distanza di 5 metri tra due coppie di acquisizioni consecutive) con assetto convergente delle camere. Le precisioni raggiungibili nella determinazione dei centri di presa non presentano sostanziali differenze, tuttavia l'impiego di due camere convergenti permette di garantire un ricoprimento molto elevato (ciascun punto viene osservato su 4 immagini) con scatti meno frequenti.

Calibrazione geometrica degli strumenti

Il metodo proposto richiede l'installazione di tutta la strumentazione utilizzata sul medesimo veicolo. Per integrare tra loro le diverse soluzioni ottenute con i diversi strumenti di navigazione utilizzati è necessario calcolare le loro posizioni relative: a tale scopo durante una fase di calibrazione (nella quale si scatta una serie di foto di un poligono di coordinate note acquisendo contemporaneamente le coordinate GPS dei punti di stazione) viene determinato il vettore nello spazio che collega ogni camera con il centro di fase dell'antenna GPS. Il poligono di calibrazione deve essere caratterizzato da una geometria stabile, ricco di particolari e facilmente accessibile con il veicolo. Nel nostro caso si è scelto di utilizzare come poligono di calibrazione la facciata del Rettorato del Politecnico di Milano, sul quale sono stati individuati sei punti di appoggio, le cui coordinate sono state determinate con una rete topografica classica.

Per calibrare il sistema sono quindi state acquisite una serie di foto del poligono di calibrazione con il veicolo, sul quale era già stata installata tutta la strumentazione da utilizzarsi in fase di rilievo, contemporaneamente alle coordinate GPS dei punti di stazione. Sono quindi stati collimati una serie di punti di legame, utilizzando i sei punti di controllo e risolvendo il problema fotogrammetrico con una procedura di bundle-adjustment.

Test preliminari

Con lo scopo di valutare le precisioni ottenibili con il metodo proposto si è deciso di realizzare una serie di test preliminari (Cazzaniga, N.E., Pinto L., 2010).

Il primo test è stato eseguito senza il veicolo e con la fotocamera installata su un apposito treppiede fotografico, traslata manualmente lungo un percorso simile a quello che si prevede di effettuare durante le fasi operative con il GPR. I centri di presa sono stati determinati con una precisione di circa 10 centimetri, in linea con le tolleranze imposte per la georeferenziazione del georadar.

Un secondo test è stato invece svolto con un veicolo equipaggiato con una sola fotocamera (controllata da remoto via PC e fissata alla barra portapacchi del veicolo in modo da essere il più possibile parallela alle facciate degli edifici) e una antenna GPS. Esso è stato svolto in modalità *stop&go*, fermando il veicolo ogni volta che veniva acquisito un fotogramma, evitando quindi di introdurre errori legati ad una non perfetta sincronizzazione degli strumenti. Per stimare le precisioni raggiungibili si sono valutati i residui tra le posizioni dei centri di presa delle camere e il dato GPS: anche in questo caso le precisioni ottenute sono state nell'ordine dei 10 centimetri.

Test cinematico

Come test finale si è deciso di svolgere un rilievo di tipo cinematico, in modo da ricreare al meglio le condizioni operative. Il veicolo è stato equipaggiato con due camere leggermente convergenti tra loro, fissate ad una barra metallica a sua volta fissata alla barra portapacchi del veicolo, e da 2 antenne GPS (figura 2).

I dati ricevuti dalla seconda antenna GPS non sono stati utilizzati nella soluzione qui presentata, ma si prevede di integrarli all'interno della soluzione fotogrammetrica.



Figura 2. Il veicolo utilizzato per il rilievo cinematico equipaggiato con la strumentazione utilizzata.

Le due camere sono state controllate da remoto via PC il quale ha gestito il loro scatto che è risultato essere praticamente sincrono (con differenze nell'ordine di qualche millisecondo). Per ognuna delle camere il tempo di scatto è stato registrato all'interno di un file ASCII. La sincronizzazione tra il tempo GPS e le due camere è stata realizzata via software: il tempo PC e il tempo GPS sono stati entrambi registrati e la trasformazione tra le due scale temporali è stata stimata con una interpolazione ai minimi quadrati.

Il rilievo è stato realizzato in via Camillo Golgi a Milano, per una lunghezza totale di 350 metri. Il software EyeDEA è stato in grado di estrarre 308.658 punti immagine; essi sono stati poi filtrati, in accordo con le modalità precedentemente esposte. Sono stati quindi ridotti a 28.485 punti immagini, corrispondenti a 7822 punti oggetto. I punti estratti variavano in funzione della *texture* della facciata dell'edificio ripreso nel fotogramma e dalla presenza di alcuni ostacoli. Ad esempio nell'immagine mostrata in figura 3, a causa della presenza di ostacoli in primo piano (auto in sosta) e di un'ampia zona alberata e di cielo, i punti estratti sono localizzati solo sull'edificio posto in secondo piano. Si sottolinea come si sia scelto di eliminare i punti estratti in corrispondenza delle fronde degli alberi poiché si ritiene che, tra un fotogramma e il successivo, potrebbero essersi spostate a causa del vento. I punti omologhi utilizzati durante la fase di compensazione del blocco non risultano quindi

ben distribuiti sulla superficie del fotogramma: ciò rappresenta un punto di debolezza della rigidità del blocco di immagini, in particolare per la determinazione degli angoli di assetto.

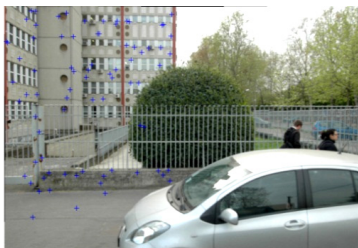


Figura 3. Esempio di problema nell'estrazione automatica dei punti omologhi.

Il problema della localizzazione e del corretto riconoscimento dei punti di interesse estratti può essere approfondito utilizzando altri operatori d'interesse o differenti algoritmi di abbinamento dei punti estratti: rispetto all'operatore di SURF il vantaggio di operatori, come ad esempio quello di Harris, che individua punti di interesse in corrispondenza di spigoli, è che possono permettere una più facile individuazione e un più semplice controllo dei punti estratti. Tuttavia, soprattutto nel caso in cui nella scena siano presenti elementi ripetuti (figura 3), è importante affiancare l'operatore di interesse ad un comparatore dei punti estratti che non si basi, come nel caso dei descrittori di SURF, esclusivamente su caratteristiche radiometriche ma anche su condizioni di tipo geometrico (Roncella, 2006).

Il blocco fotogrammetrico (figura 4) è stato georeferenziato utilizzando 11 punti di controllo estratti dalla mappa della città di Milano (scala 1:1000, precisione planimetrica 20 cm e precisione altimetrica 30 cm), localizzati in corrispondenza di muretti e spigoli di edifici. Le immagini sono state acquisite con un intervallo di scatto di un secondo, per un totale di 392 fotogrammi: quelle effettivamente processate sono state 220 poiché si è deciso di sottocampionarle (mantenendo comunque un elevato ricoprimento) in corrispondenza di zone nelle quali la *texture* era particolarmente favorevole e di utilizzarle tutte solo in presenza di elementi critici, come ad esempio in corrispondenza degli incroci.

I centri di presa sono stati stimati con un RMS(SQM) inferiore ai 10 centimetri in tutte e tre le direzioni, come riportato nella Tabella 1:

Coordinate	RMS(SQM) (m)
N	0.084
E	0.093
H	0.096

Tabella 1. RMS(SQM) delle coordinate dei centri di presa.

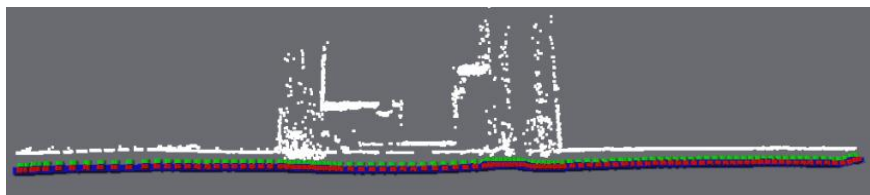


Figura 4. Il blocco fotogrammetrico acquisito durante il rilievo cinematico.

La calibrazione degli strumenti posti sul veicolo è stata realizzata al termine del test cinematico, secondo la modalità precedentemente descritta. Le posizioni GPS sono state associate alle coordinate delle immagini fornite dalla compensazione del blocco fotogrammetrico: in questo modo è stato possibile determinare i vettori di calibrazione che collegano i centri di presa delle due camere e il centro di fase dell'antenna GPS (nel sistema di riferimento camera). Entrambi i vettori sono stati determinati con una precisione di circa 4 cm.

La soluzione fotogrammetrica è stata quindi confrontata con quella ottenuta interpolando le posizioni GPS ai tempi di scatto con una *spline* cubica nel baricentro dei due centri di presa. I residui tra le due soluzioni sono dell'ordine dei 20 cm: riteniamo che ciò sia legato alla scarsa precisione nella definizione dell'assetto del veicolo, all'incertezza del vettore di calibrazione nonché alla precisione del blocco fotogrammetrico appoggiato sui punti cartografici (che, si ribadisce, hanno una precisione planimetrica di ± 20 cm in planimetria e 30 in quota).

Conclusioni

All'interno del presente lavoro è stata discussa una soluzione per la georeferenziazione di una antenna georadar in ambito urbano, basata sulla implementazione di diversi sistemi di posizionamento. In aree urbane, infatti, il GPS non può essere utilizzato come unico sistema di navigazione a causa delle frequenti perdite del segnale satellitare: si propone quindi una strategia principalmente basata su un approccio di tipo fotogrammetrico appoggiando le prese alle coordinate dei particolari riportati sulla cartografia a grande scala.

Con lo scopo di garantire la migliore automazione possibile sono stati realizzati script per l'estrazione automatica dei GCPs dalla cartografia e si sono valutate le performance degli algoritmi di orientamento automatico del blocco, in relazione ai diversi elementi ripresi sui fotogrammi.

In generale il metodo proposto si è rivelato valido e i risultati raggiunti sono in linea con le precisioni richieste per la georeferenziazione dell'antenna georadar. Dal test cinematico è emerso come la qualità della soluzione fotogrammetrica dipenda fortemente dalla precisione dei punti di appoggio estratti dalla cartografia. L'integrazione di qualche punto GPS (facilmente acquisibile all'inizio o al termine della strisciata, o in corrispondenza di zone aperte come piazze o incroci) può aiutare a rafforzare il blocco e allo stesso tempo a individuare gli *outlier* tra i GCPs estratti.

Bibliografia

- Barzaghi R., Carrion D., Cazzaniga N. E., Forlani G., (2009), Vehicle Positioning in urban areas using photogrammetry and digital maps. *Proceedings of the ENC-GNSS09*, Napoli (Italy)
- Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L., (2008), Speeded Up Robust Features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding* (110), pp. 346–359
- Cazzaniga N. E., Pinto L., (2010). Navigazione urbana con l'ausilio della fotogrammetria e della cartografia, *Atti della XIV Conferenza Nazionale ASITA*, Brescia, pp. 547-552
- Forlani, G., (1986), Sperimentazione del nuovo programma CALGE dell'ITM, *Bollettino SIFET* No. 2, pp. 63-72
- Roncella, R., 2006. Sviluppo e applicazioni di tecniche di automazione in fotogrammetria dei vicini. *Ph.D. Thesis*, Parma University
- Roncella, R., Re, C., Forlani, G., (2011a), Comparison of two structure and motion strategies, *ISPRS Volume XXXVIII-5/W16*
- Roncella, R. Re, C., Forlani, G., (2011b), Performance evaluation of a structure and motion strategy in architecture and cultural heritage, *ISPRS Volume XXXVIII-5/W16*
- Wallis, K. F., (1976), Seasonal adjustment and relation between variables, *Journal of the American Statistical Association*, 69 (345), pp 18-31