

## **Navigazione urbana con l'ausilio della fotogrammetria e della cartografia**

Noemi Emanuela CAZZANIGA (\*), Livio PINTO (\*\*)

DIAR – Politecnico di Milano – Piazza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 Milano

(\*) tel. 02 2399 6505, Fax 02 2399 6530, e-mail: noemi.cazzaniga@polimi.it

(\*\*) tel. 02 2399 6525, Fax 02 2399 6530, e-mail: livio.pinto@polimi.it

### **Riassunto**

Il Ground Penetrating Radar (GPR) è frequentemente utilizzato per rilevare informazioni sulla localizzazione di servizi nel sottosuolo fino a una profondità di alcuni metri. La tolleranza richiesta nel posizionamento di questo strumento, per ottenere una ricostruzione 3D degli oggetti rilevati, è dell'ordine di circa 20-30 cm. Questo risultato può essere facilmente ottenuto per mezzo di un posizionamento GNSS in ambiente extraurbano, mentre nei centri abitati è frequente la perdita di segnale. Tipicamente l'approccio adottato nei centri urbani consiste nell'utilizzo di un sistema di navigazione integrato GPS/IMU, che è però piuttosto costoso. Un'altra possibilità, per georeferenziare lo strumento, consiste nell'utilizzare la fotogrammetria appoggiata alla cartografia: quest'ultima infatti spesso è fornita con elevata accuratezza nei centri urbani (scala 1:1000 o 1:2000). Nell'articolo sono presentate le caratteristiche di questa procedura. Inoltre vengono presentati i risultati ottenuti dalle prime prove realizzate in ambito urbano, effettuate a Milano. Una prova è stata effettuata lungo un viale cittadino stazionando nei punti di presa con un treppiede: i risultati ottenuti, in termini di precisione del blocco fotogrammetrico, sono stati verificati tramite una rete topografica classica. Una seconda prova è stata realizzata montando camera fotogrammetrica e GPS su un furgone: in questo caso quindi il posizionamento del veicolo tramite fotogrammetria e cartografia è stato validato per mezzo della soluzione GPS. Infine vengono analizzati i risultati ottenuti, discutendo brevemente le potenzialità e le criticità di questa procedura.

### **Introduzione**

Per ricostruire la geometria e la posizione 3D dei sottoservizi, la georeferenziazione del GPR non dovrebbe superare in termini di precisione i 20-30 cm. Tale precisione può facilmente essere raggiunta attraverso l'utilizzo di sistemi GNSS, ma in ambito urbano la presenza di edifici rende spesso impossibile tale posizionamento. L'impiego di un sistema integrato GPS/IMU presenta una forte deriva della precisione della soluzione in funzione del tempo, in caso di perdita di segnale GPS, che si scontra, nel caso in esame, con la velocità estremamente ridotta richiesta dal rilievo GPR (circa 15 km/h). Un'alternativa possibile è il posizionamento fotogrammetrico appoggiato alla cartografia (Crosilla e Visentini, 1998; Forlani et al., 2005). Uno studio recente (Barzaghi et al., 2009) ha determinato per mezzo di alcune simulazioni l'accuratezza teoricamente ottenibile da questa metodologia che si attesta, nelle condizioni usuali di utilizzo, in circa 20 cm nelle tre coordinate.

### **Metodologia**

Questo approccio prevede che il rilievo GPR sia accoppiato ad un'acquisizione fotogrammetrica, in modo da riprendere gli edifici sui lati della via indagata. L'appoggio della strisciata fotogrammetrica viene realizzato mediante l'individuazione di punti (GCP) noti in cartografia a grande scala (1:1000 o 1:2000), spesso disponibile nei centri urbani. Il metodo prevede che GCP

vengano estratti dalla cartografia in maniera automatica per ridurre il tempo di elaborazione e il rischio di errori. I punti sono principalmente spigoli al piede di edifici potenzialmente visibili sulle fotografie. Nonostante la cartografia sia sempre più di tipo tridimensionale (tra cui quella a disposizione per il test) spesso conviene associare ai GCP la quota interpolata tra i punti quota presenti nelle immediate vicinanze in quanto la restituzione degli edifici avviene sulle gronde e la quota al piede viene spesso ottenuta in modo derivato e non sempre affidabile. Per estrarre i soli punti sul fronte strada sono stati implementati dei *tool* in ambiente Matlab e utilizzando l'applicazione *Model Builder* di ArcGIS.

### Test fotogrammetrico

Poiché gli elementi che più influenzano la precisione e l'accuratezza del rilievo sono l'ampiezza delle strade (che condiziona la distanza relativa tra immagine e punti di appoggio posti sugli edifici), la larghezza degli incroci (che genera perdita di punti di appoggio), la larghezza degli isolati ed eventuali ostacoli come ad esempio la presenza di alberi, automobili o furgoni parcheggiati, è stata scelta una via rappresentativa delle criticità sopra citate: via Romagna nel comune di Milano. Si è installata la macchina fotografica su un apposito treppiede ed è stata orientata verso la facciata degli edifici di un solo lato della via. La fotocamera, una *Nikon D70 reflex digitale* con obiettivo grandangolare da 20 mm calibrato, impostata in modalità priorità di tempi, con apertura di diaframma variabile in relazione alle condizioni di luminosità, e tempo di esposizione pari a 1/15 di secondo, è stata via via traslata lungo la via. L'intera strisciata comprensiva delle posizioni dei centri di presa viene riportata in fig. 1.

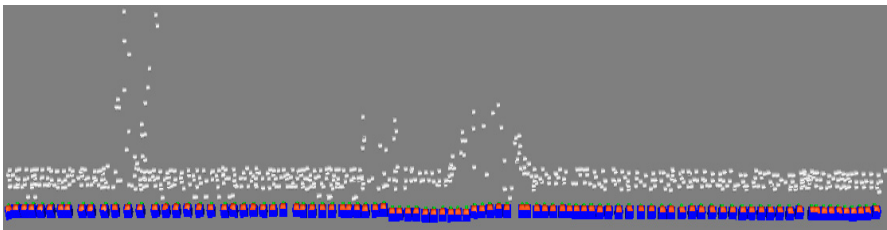


Fig. 1 – Schema del test fotogrammetrico: sono visibili i centri di presa (in primo piano) e i punti di legame.

Il rilievo è costituito da 97 fotogrammi, scattati a un'interdistanza di circa 3 m. Le fotografie sono state scattate ad una decina di metri dalle facciate degli edifici, mantenendo la macchina fotografica con asse ottico ortogonale ad esse. Le immagini (fig. 2) riprendono parte di marciapiede, piano terra e primo piano degli edifici, ma anche veicoli in sosta, alberi, segnaletica stradale e incroci.

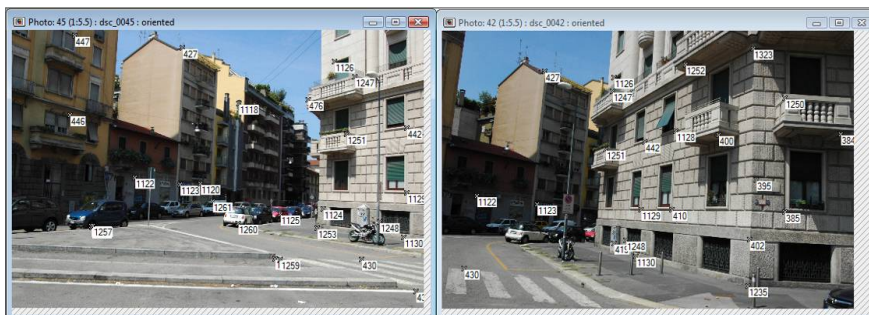


Fig. 2 – Coppia di immagini in prossimità di un incrocio di viale Romagna: sono visibili i punti omologhi.

Tutti questi elementi, come pure il forte ricoprimento tra un'immagine e la successiva, che raggiunge anche l'87% (mediamente 70%), hanno permesso di determinare un numero elevato di punti di legame, da un minimo di 12 ad un massimo di 37 per fotografia. I punti omologhi sono stati scelti sulle facciate degli edifici, in modo da ricoprire l'immagine il più possibile uniformemente. Dove possibile si sono scelti spigoli di elementi sporgenti (balconi o terrazzi), per avere punti variabili anche in profondità e quindi migliorare la precisione lungo questa componente. In prossimità degli incroci con le vie traverse è stato indispensabile identificare target omologhi.

Dalla cartografia sono stati estratti 15 spigoli di edifici usati come GCP. Se però fossero stati utilizzati solo spigoli al piede degli edifici, i GCP sarebbero risultati allineati lungo una retta, rendendo indeterminabile la rotazione attorno a tale asse. Per bloccare questo grado di libertà sono stati inseriti vincoli di verticalità inserendo alcuni punti posti sulla verticale degli stessi GCP, il cui dislivello è stato misurato mediante distanziometro. Attribuite le coordinate ai corrispondenti punti visibili sulle immagini, il blocco fotogrammetrico è stato compensato con il software commerciale *Photomodeler*, ottenendo le posizioni dei centri di presa e le coordinate dei punti di legame. Osservando (fig. 3) le precisioni delle tre coordinate, emerge il valore medio molto contenuto e l'assenza di sistematismi. Si nota una zona con sqm più elevati di altri. Tali collimazioni corrispondono a punti presenti in una via perpendicolare a viale Romagna e molto distanti, circa 50 m dalla camera: questo spiega l'aumento dell'incertezza della coordinata Est, che esprime appunto la profondità, fino a valori di circa 30 cm. L'incertezza delle coordinate Nord e Quota è invece legata alla diminuzione della scala del fotogramma in corrispondenza di edifici fotografati molto distanti dal centro di presa. Infine l'incremento dell'incertezza nei punti più a destra del grafico è legato all'assenza di punti di appoggio sulle ultime immagini della strisciata, poiché nascosti da automobili o altri elementi. In quella zona quindi il blocco è più labile e di conseguenza la precisione dei punti collimati presenta una deriva (in funzione dello spazio). I risultati ottenuti sono in linea con le simulazioni di (Barzagli et al., 2009).

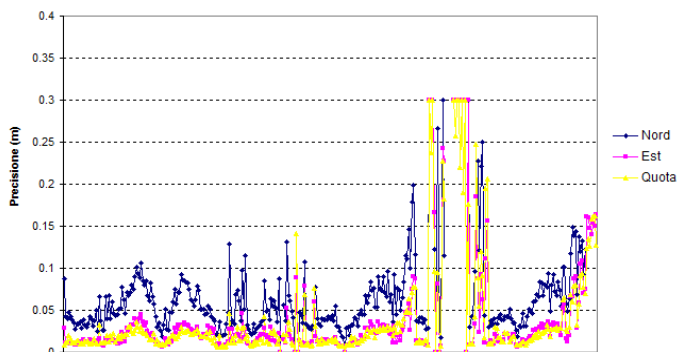


Fig. 3 – Andamento degli sqm dei punti di legame lungo tutto il rilievo.

Nella tabella 1(a) vengono riassunte le precisioni delle coordinate dei centri di presa. Si può osservare che, sebbene si parta da informazioni cartografiche con precisioni di 20 cm in planimetria e di 30 cm in quota, il blocco ha centri di presa con precisioni inferiori ai 10 cm.

Tab. 1 – (a) Valori quadratici medi degli sqm delle coordinate dei centri di presa; (b) statistica delle differenze tra le coordinate dei punti stimati per via fotogrammetrica e per via topografica.

(a)	
Coordinate	rms (sqm) (m)
N	0.069
E	0.083
h	0.051

(b)			
	E (m)	N (m)	h (m)
Dev. St.	0.033	0.058	0.053
Min	-0.066	-0.075	-0.095
Max	0.069	0.143	0.081

Per confrontare la restituzione fotogrammetrica con appoggio cartografico con un'informazione esterna si è realizzata, lungo tutta la lunghezza della strisciata fotogrammetrica, una poligonale topografica e dai punti di stazione sono stati osservati, per intersezione multipla mediante *stazione totale* Leica TPS 400, un buon numero di punti di legame. La compensazione della poligonale è stata eseguita mediante il software scientifico *Calge*. Confrontando le coordinate determinate per via topografica e per via fotogrammetrica, si osserva che le medie delle differenze delle coordinate non risultano essere significative mentre le deviazioni standard sono dell'ordine di qualche centimetro, tab. 1(b), valori confrontabili con le precisioni fotogrammetriche. Vi è quindi piena congruenza tra le due soluzioni. Inoltre il risultato ottenuto è migliore di quello previsto dalle simulazioni (Barzaghi et al., 2009).

### Test su veicolo

E' stato poi realizzato un rilievo più realistico montando la strumentazione su veicolo, con l'impiego simultaneo di una fotocamera e di un ricevitore GNSS, in modo da permettere un controllo sul risultato fotogrammetrico. Alla fotocamera Nikon è stato associato un ricevitore Trimble 5700, con antenna esterna *Zephyr*, collegato ad un controller TSC2. Le posizioni sono state determinate sfruttando la rete di stazioni permanenti GPS Lombardia in modalità NRTK Stop&Go, poiché non è ancora stato implementato un sistema di sincronizzazione tra scatto della camera e ricevitore. La fotocamera, le cui impostazioni sono analoghe alla prova precedente, è stata agganciata su un apposito supporto per gestirne l'assetto e le rotazioni attorno ai tre assi, orientandola in modo da scattare fotografie parallele alle facciate degli edifici (fig. 4).



Fig. 4 – La strumentazione montata sul veicolo.

Per rendere le misure GNSS e quelle fotogrammetriche confrontabili fra loro è stata eseguita la calibrazione geometrica individuando il vettore posizione relativa del centro di fase dell'antenna nel sistema di riferimento vincolato al sensore fotogrammetrico. Sono state eseguite simultaneamente misure GNSS e fotogrammetriche in cinque postazioni di presa convergenti, poste ad arco, in modo da abbracciare tutto il poligono di calibrazione. L'orientamento assoluto delle immagini è stato effettuato attraverso il software *PhotoModeler*. Note quindi le coordinate dei centri di presa e dei centri di fase dell'antenna, è stato determinato il vettore che li collega. Per verificare la ripetibilità dei risultati, la fase di calibrazione è stata effettuata più volte. Ciò ha permesso di concludere che il vettore viene determinato con un'incertezza dello stesso ordine di grandezza del rilievo GNSS.

È stata effettuata quindi una ripresa fotogrammetrica con la camera montata su un veicolo, in via Golgi a Milano, in modo da coprire un tratto di circa 150 m. Il rilievo è stato strutturato in 44 postazioni a una distanza compresa tra i 10 e i 15 m dalle facciate, con camera inclinata di circa 10° verso l'alto, per riprendere il più possibile la parete degli edifici, senza tralasciare una porzione di marciapiede con gli spigoli al piede. La distanza tra due scatti consecutivi è circa 3 m, tale da permettere una sovrapposizione tra i fotogrammi superiore al 60%, e da garantire facilmente il riconoscimento di punti omologhi (fig. 5).

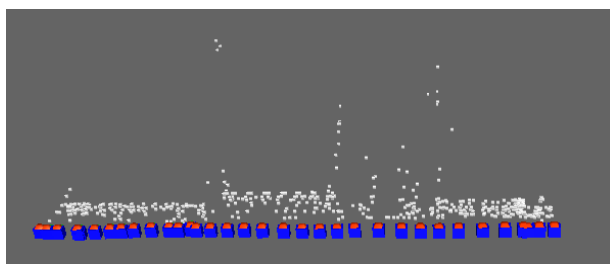


Fig. 5 – Schema dell'acquisizione fotogrammetrica nel test su veicolo.

Su ciascun fotogramma risulta visibile un numero di punti omologhi che va da un minimo di 15 ad un massimo di 177 con un valore medio di 42 punti per fotogramma. La zona di sovrapposizione tra un'immagine e la successiva varia da un minimo di 63% ad un massimo di 87%, con un valore medio di 68%, tale da consentire una buona sovrapposizione tra tre immagini consecutive. È possibile notare come non vi sia sostanziale differenza tra la configurazione del rilievo statico e quella del rilievo con veicolo, poiché i valori della percentuale di sovrapposizione dei fotogrammi e di punti omologhi per fotogramma risultano molto simili. Oltre ai punti omologhi è stato possibile collimare anche una serie di spigoli di edifici visibili sui vari fotogrammi, a cui sono state attribuite le coordinate estratte dalla cartografia e appositamente trasformate in un sistema di riferimento locale, il medesimo utilizzato per il rilievo fotogrammetrico. Analogamente al caso precedente, oltre ai GCP, le cui coordinate sono state estratte dalla cartografia, sono stati collimati sui vari fotogrammi anche una serie di punti in quota, posti sulla verticale degli spigoli degli edifici di cui si conoscono le coordinate. Tali punti in quota hanno le stesse coordinate planimetriche degli spigoli degli edifici, mentre per quanto riguarda l'altimetria si è attribuito un valore approssimato, quindi non misurato, con una incertezza molto elevata, dell'ordine del metro: in pratica questi punti, unitamente ai vertici di base, rappresentano un vincolo di verticalità della linea che li congiunge. Inserendo un totale di 4 punti plano-altimetrici, e di 2 punti planimetrici con la quota stimata nel modo appena descritto, è stata effettuata la compensazione ai minimi quadrati dell'intero blocco, utilizzando *PhotoModeler*. Ai GCP plano-altimetrici sono state attribuite precisioni di 20 cm in planimetria e 30 cm in quota. Le precisioni medie delle coordinate dei punti omologhi risultanti dalla compensazione (tabella 2) sono di 15.5 cm in X, 6.5 cm in Y e 13 cm in Z, del tutto in linea con le simulazioni realizzate.

Tab. 2 – Valori quadratici medi degli sqm delle coordinate.

Coordinate	rms (sqm) dei punti omologhi [m]	rms (sqm) dei centri di presa [m]
X	0.155	0.069
Y	0.065	0.083
Z	0.130	0.034

Le precisioni con cui vengono determinati i centri di presa della camera, che risultano essere sub-decimetriche in tutte e tre le coordinate, sono ben al di sotto della soglia di precisione massima ricercata. È evidente (fig. 6) un comportamento uniforme delle precisioni delle coordinate dei centri di presa sui primi fotogrammi (dell'ordine dei 2 cm), che peggiora in coda alla strisciata, dove non risulta visibile alcuno spigolo di edificio da impiegare come GCP. E' stato sperimentalmente dimostrato che questo inconveniente può essere eliminato utilizzando le posizioni GNSS (acquisite durante la navigazione) congiuntamente a quelle fotogrammetriche nella compensazione del blocco. Per validare i risultati ottenuti in termini di coordinate dei centri di presa, esse sono state confrontate con le posizioni GNSS riportate al centro di presa mediante il vettore di calibrazione.

La statistica delle differenze su 18 centri di presa evidenzia un ottimo accordo tra le due soluzioni: la media delle differenze vale 12.6 cm in X, 9.0 cm in Y e 1.6 cm in Z, mentre gli sqm valgono 14.4 cm, 12.5 cm e 5.0 cm nelle tre coordinate: tali valori fanno escludere la presenza di errori sistematici e dimostrano la possibilità di utilizzare i dati di posizione GNSS e/o fotogrammetrici per la navigazione in ambito urbano.

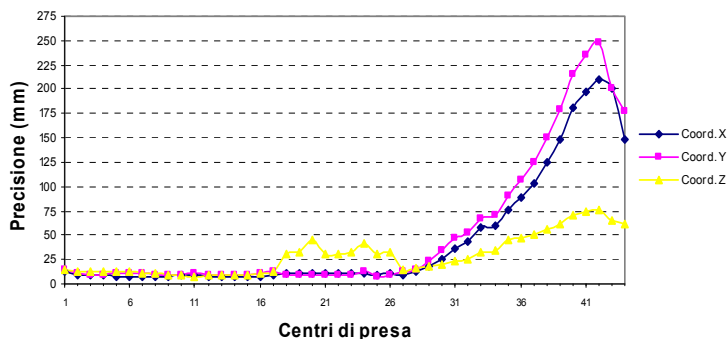


Fig. 6 – Precisioni dei centri di presa lungo il rilievo.

## Conclusioni

È possibile affermare che le precisioni con cui vengono determinati i centri di presa soddisfano le richieste per il posizionamento di un sistema GPR in ambito urbano. Va infine ricordato che le precisioni ottenute sono relative sempre ai centri di presa, mentre il processo di georeferenziazione deve permettere la determinazione della posizione del GPR. Il GPR da impiegare durante il rilievo dovrà essere calibrato a sua volta mediante un'antenna GNSS posizionata sopra di esso. In questo modo si andrà a determinare il vettore posizione relativa anche tra il sistema foto-GPS e il GPR. È lecito supporre che la precisione in fase di calibrazione sarà paragonabile all'incertezza di posizionamento GNSS. Considerando quindi la stima della precisione dei centri di presa della camera pari a circa 10 cm, propagando l'errore per determinare la precisione di posizionamento del GPR si otterranno valori ancora dello stesso ordine di grandezza, e di conseguenza entro i limiti imposti di 20-30 cm di precisione.

Dal punto di vista fotogrammetrico il metodo proposto risulta essere di facile impiego ma, affinché sia economicamente valido, occorrerà sfruttare meglio la possibilità di estrarre automaticamente i punti di legame dalla strisciata di immagini, ad esempio con algoritmi di *structure and motion* (Forlani et al., 2005).

## Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare l'ing. Nicolò Boldori che in questo ambito ha discusso la Tesi di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio presso il Politecnico di Milano.

## 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.
- Forlani G., Roncella R., Remondino F. (2005), *Structure and motion reconstruction of short mobile mapping image sequences*, Proc. of the 7th Conf. on Optical 3D measurement techniques, Vienna, 2005, Vichman Verlag, vol. 1, pp. 265-274.
- Crosilla F., Visintini D. (1998). *External Orientation of a Mobile Sensor System for Cartographic updating by dynamic vision of digital map points*, Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 1, pp. 41-68.