

---

## Fotogrammetria e GPS per il posizionamento di veicoli dedicati al rilievo dei sottoservizi

### *Photogrammetry and GPS for vehicle positioning aimed at underground utility survey*

Noemi E. CAZZANIGA<sup>a</sup>

Diana PAGLIARI<sup>b</sup>

Livio PINTO<sup>c</sup>

DICA sezione Geodesia e Geomatica  
Politecnico di Milano, p.zza L. da Vinci, 32  
20133 Milano

t <sup>a</sup> 0223996505;  
e noemi.cazzaniga@polimi.it

t <sup>b</sup> 0223996543  
e diana.pagliari@polimi.it

t <sup>c</sup> 0223996525  
e livio.pinto@polimi.it

**Parole Chiave** > Posizionamento, Sottoservizi, Fotogrammetria inversa, Triangolazione aerea con GPS, Orientamento relativo.

**Key Words** > Positioning, Underground utilities, Inverse photogrammetry, Aerial triangulation with GPS, Relative orientation.

**Riassunto** > Il rilievo dei sottoservizi in ambito urbano viene usualmente realizzato tramite prospezioni geofisiche con il GPR (acronimo di Ground Penetrating Radar): tale strumento non è però in grado di determinare autonomamente la propria posizione e deve quindi essere affiancato da uno strumento di navigazione. L'esigenza di posizionare il georadar anche in ambito urbano ha portato negli ultimi anni alla proposta di un posizionamento che si avvale della fotogrammetria appoggiata alla cartografia a grande scala. Test precedentemente effettuati hanno confermato la fattibilità di questa metodologia. Nel presente articolo sono presentati i risultati ottenuti utilizzando il metodo di posizionamento fotogrammetrico inverso proposto, in un test eseguito nella città di Cremona. Durante l'elaborazione dei dati, sono state analizzate diverse ipotesi di appoggio del blocco fotogrammetrico (solo cartografico e con l'aggiunta di qualche posizione GPS, e sono stati studiati gli effetti dell'introduzione di vincoli aggiuntivi quali l'assetto relativo tra le due fotocamere utilizzate nella ripresa.

**Abstract** > The surveying of underground utilities in urban areas is usually performed using geophysical techniques such as GPR (acronym of Ground Penetrating Radar). Nevertheless, this instrument is not able to position itself autonomously and it must be coupled with a navigation device. In the last years, the need to georeference the georadar, even in urban environment, drove to the proposal of a positioning approach that use Photogrammetry, using some Ground Control Points extracted from urban maps as constraints. The feasibility of this methodology has been confirmed from some tests, previously carried out. In this paper, the results of a test realized in the city of Cremona,

Articolo ricevuto in redazione nel mese di Marzo 2013 e accettato dopo revisione nel mese di Maggio 2013.

applying an inverse photogrammetric approach, are presented. During data processing, some different choices of Ground Control Point distribution for georeferencing the photogrammetric block (i.e. only GCPs extracted from digital maps or with the addition of some GPS points too) are analyzed. The effects of the introduction of additional constraints, like relative orientation between the two cameras used during the survey, are studied too.

Figura 1 – Veicolo con antenna georadar.

## 1. Introduzione

Le operazioni di posa di cavi interrati vengono sempre più spesso eseguite con moderne tecniche, quali la tecnica Quick Trenching (che consente lo scavo e la posa simultanea di cavi per sottoservizi di varia natura) la quale richiede un'accurata progettazione preliminare della traiettoria da percorrere durante le fasi operative con lo scopo di non incorrere nella recisione o nel danneggiamento dei sottoservizi già presenti. La conoscenza della localizzazione dei sottoservizi è però spesso lacunosa, per cui capita non di rado, se non si ha a disposizione un database aggiornato, di dover eseguire un rilievo "ad hoc" prima dell'intervento di scavo. A questo scopo viene utilizzato il georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) il quale permette di determinare la geometria e la posizione di elementi infrastrutturali interrati (come ad esempio tubature, cavi, fognature etc.). Esso viene montato su un carrello e spinto a mano o trainato da un veicolo che si muove con una velocità massima di circa 15-20 km/h e raggiunge precisioni dell'ordine della decina di centimetri nella determinazione della posizione degli oggetti individuati, in funzione del particolare tipo di suolo. La produttività giornaliera è piuttosto bassa (circa 3 km) poiché spesso è necessario compiere più prospezioni nello stesso tratto stradale.



Il GPR non è in grado, da solo, di fornire alcuna informazione circa la sua posizione: proprio per questa ragione esso deve essere necessariamente affiancato da uno strumento di navigazione. Per garantire una corretta ricostruzione tridimensionale degli oggetti interrati indagati, l'antenna georadar deve essere georeferenzata (non necessariamente in tempo reale) con una precisione planimetrica di 20-30 centimetri.

In ambito extra-urbano questo problema può essere facilmente risolto affiancando al georadar un ricevitore GNSS. Come noto, invece, in ambito urbano la presenza di ostacoli, come ad esempio edifici, alberi, tunnel, superfici riflettenti, rende impossibile o difficoltosa la ricezione del segnale con la qualità desiderata e quindi non si può effettuare il posizionamento di un veicolo in moto basandosi solo su questa tecnologia. Un'alternativa può essere l'accoppiamento INS/GNSS: l'utilizzo di sensori MEMS permette, nella migliore delle ipotesi, di eseguire il posizionamento con un errore nell'ordine della decina di centimetri dopo un'assenza del segnale satellitare di circa un minuto. Tuttavia i sistemi che permettono le precisioni di interesse nell'ambito applicativo in analisi non sono low-cost; inoltre la velocità di avanzamento del veicolo è molto bassa e quindi la perdita del segnale GPS può verificarsi per periodi anche molto lunghi, per cui le derive risultano rapidamente di valore inaccettabile.

Una modalità alternativa è l'utilizzo di stazioni totali che collimano in modo automatico dei target posti sul veicolo che traina l'antenna georadar. Questo metodo, largamente utilizzato in ambito indoor, è sicuramente il più preciso (con accuratezze anche sub-centimetriche), ma richiede una continua intervisibilità tra la stazione e l'oggetto del quale si sta tracciando la posizione: è quindi difficile ipotizzare un impiego di questo metodo in ambito urbano poiché molto facilmente ci possono essere ostacoli che interrompono il raggio laser della stazione totale, impedendo quindi, di fatto, il posizionamento. Inoltre il costo è significativamente più elevato rispetto a quello del posizionamento GNSS puro. Se si optasse poi per questo metodo di posizionamento, al raggiungimento del limite di portata del distanziometro (in dipendenza della particolare strumentazione utilizzata) oppure ogni volta che sia necessario affrontare una curva, il rilievo dovrebbe essere interrotto per riposizionare lo strumento.

Da qualche tempo si sta indagando la possibilità di utilizzare per il posizionamento cinematico le immagini riprese da una fotocamera montata sul veicolo secondo un approccio fotogrammetrico inverso. Si parla di approccio fotogrammetrico inverso poiché lo scopo principale della fotogrammetria (aerea o close-range) è quello di permettere la ricostruzione tridimensionale di oggetti a partire da immagini che li riprendono da punti di vista diversi, senza dover entrare in contatto con l'oggetto stesso. In questo caso invece ci si avvale di tale approccio per ricostruire le posizioni dalle quali sono state acquisite le immagini: conoscendo le coordinate di alcuni punti di appoggio estratti ad esempio dalla cartografia a grande scala, si intende ricostruire la traiettoria del veicolo al quale la fotocamera è rigidamente collegata. La possibilità di applicare l'approccio fotogrammetrico inverso è stata presentata già in altri lavori, ma spesso essa viene solo utilizzata come supporto ai sistemi INS/GPS (El-Sheimy et al, 1995; Chaplin and Chapman, 2001; Roncella et al, 2005). (Forlani et al, 2005) ha dimostrato che un approccio puramente fotogrammetrico può essere utilizzato per definire la traiettoria di un veicolo in caso di una prolungata assenza del segnale GPS ed ha verificato come i centri di presa di una sequenza di immagini acquisite con un veicolo in moto possano essere determinati con un errore di circa 1 m, lungo un percorso di 300 m, imponendo vincoli solo all'inizio e alla fine del tratto stradale. Un simile risultato può essere notevolmente migliorato aggiungendo dei vincoli ulteriori, come ad esempio punti d'appoggio (GCPs) estratti dalla cartografia a grande scala, facilmente disponibile per i centri urbani. Anche l'utilizzo di cartografia digitale per valutare l'orientamento esterno di un sensore è già stato proposto. In (Crosilla e Visentini, 1998) si propone di applicare un filtro di Kalman (di tipo forward): alcuni punti vengono estratti dalla carta ed interpolati con una funzione di tipo spline per determinare il modello dinamico; in questo modo, utilizzando una fotocamera e un odometro, è possibile determinare l'orientamento esterno.

L'approccio messo a punto presso il DICA del Politecnico di Milano prevede di risolvere il problema fo-

togrammetrico con una triangolazione a stelle proiettive, utilizzando come punti d'appoggio alcuni punti estratti dalla cartografia a grande scala e come punti di legame punti di interesse estratti in modo automatico dalle facciate degli edifici che si trovano ai lati della strada. Il metodo è stato sottoposto a differenti test. Preliminarmente è stato simulato un rilievo urbano (Barzaghi et al, 2009) analizzando le precisioni conseguibili con il blocco appoggiato su punti cartografici. Successivamente la fattibilità del metodo qui presentato, nonché le precisioni ottenibili, sono state verificate con una serie di test preliminari (Cazzaniga e Pinto, 2010, Cazzaniga et al, 2012). Il primo test realizzato è stato un test statico, senza veicolo: la camera è stata installata su un treppiede fotografico che è stato traslato manualmente lungo un percorso simile a quello effettuato in fase operativa con il georadar. L'appoggio del blocco è stato realizzato su punti noti; l'analisi dei risultati ha mostrato che i centri di presa delle fotocamere vengono determinati con una precisione di circa 10 cm. Un secondo test è stato eseguito in modalità stop&go equipaggiando il veicolo con una fotocamera con asse ottico ortogonale agli edifici prospicienti la strada e un'antenna GPS. Il veicolo è stato arrestato per l'acquisizione di ogni immagine, in modo da non introdurre alcun tipo di errore legato ad una non perfetta sincronizzazione della strumentazione. Le precisioni del metodo di posizionamento sono state stimate come residui tra il dato GPS e quello fotogrammetrico: anche in questo caso sono state ottenute precisioni nell'ordine dei 10 cm, in linea, quindi, con le tolleranze richieste. Queste prime prove hanno dimostrato la fattibilità del metodo fotogrammetrico come sistema di posizionamento a basso costo per la navigazione in ambito urbano: essa può essere sia integrata con il dato satellitare, qualora sia disponibile qualche posizione rilevata con elevata precisione (in un approccio di Triangolazione Aerea asservita da GPS - Forlani e Pinto, 2008) o utilizzata come unico sistema di posizionamento nel caso in cui la soluzione GPS non sia disponibile (o sia disponibile con una qualità non adeguata allo scopo). Il sistema fotogrammetrico rimane però principalmente pensato come un sistema di backup, poiché il trattamento delle immagini è oneroso dal punto di vista computazionale, non completamente automatico e richiede, comunque, più tempo rispetto al trattamento del dato GPS.

## 2. Il metodo proposto

Il metodo proposto richiede l'impiego di una o più fotocamere digitali e un'antenna GPS installate sullo stesso veicolo che traina l'antenna georadar, rigidamente vincolata ad esso. Le fotocamere sono vincolate al veicolo, con l'asse approssimativamente perpendicolare alla direzione di moto, in modo da riprendere le facciate degli edifici posti a lato della strada.



Figura 2 - Il veicolo in assetto da rilievo

Utilizzando algoritmi automatici per l'estrazione dei punti omologhi si prevede di estrarre proprio dagli elementi ripresi i punti di legame necessari per legare il blocco fotogrammetrico.

Attualmente i sensori utilizzati per i test (compresi quelli presentati all'interno di questo articolo) sono due fotocamere reflex Nikon D70s, con una focale fissa di 20 mm. Il formato della camera è rettangolare, composto da 3008x2000 pixel. La dimensione del pixel è pari a circa 7.1  $\mu\text{m}$ .

Si è scelto di utilizzare due fotocamere che scattano in modo sincrono, invece di una singola fotocamera, in modo da garantire, a parità di velocità di avanzamento del veicolo, un maggiore ricoprimento: le fotocamere infatti hanno una frequenza massima di scatto di 1 Hz. Questo permette anche di utilizzare o meno tutte le immagini a seconda della tipologia di soggetto ripreso. Ad esempio nel caso di incroci o edifici caratterizzati da superfici con una tessitura molto uniforme (come l'intonaco) è preferibile impiegare tutti i fotogrammi acquisiti, mentre in casi più favorevoli essi possono essere sottocampionati in modo da abbattere i tempi di calcolo, strettamente legati al numero di immagini processate. Una serie di simulazioni precedenti (Barzaghi et al, 2009), effettuate con diverse geometrie di presa, ha fatto preferire una configurazione con due fotocamere leggermente convergenti, in modo da garantire una geometria di presa più robusta.

L'utilizzo delle fotocamere con sensore full-frame (a "formato pieno"), aventi un sensore di dimensioni 24x36 mm<sup>2</sup> (quelle delle fotocamere reflex a pellicola), sarebbe preferibile perché sono caratterizzate da una maggiore sensibilità alla luce e riprendono contemporaneamente una scena più ampia.

Qualunque sia il tipo di fotocamera impiegata, per poter utilizzare le immagini acquisite in fase di rilievo per scopi metrici, è necessario che venga calibrata in modo da poter rimuovere, durante le successive elaborazioni, le distorsioni che ne caratterizzano l'ottica. Vi sono diversi metodi di calibrazione caratterizzati da tempi e quindi costi molto diver-

si tra loro; nel caso in oggetto si è scelto di utilizzare una calibrazione a nuvola di punti, impiegando allo scopo il software commerciale Photo-Modeler®. È stato inoltre verificato, con un apposito test, che lo sgancio e il riaggancio della fotocamera dal supporto installato sul tettuccio del veicolo non incide in modo rilevante sui parametri di calibrazione.

### *2.1 Appoggio e vincolo del blocco fotogrammetrico*

Per georeferenziare il blocco fotogrammetrico costituito dalle immagini acquisite in fase di rilievo si propone di utilizzare dei punti d'appoggio estratti dalla cartografia: in ambito urbano è infatti molto facile che sia disponibile la cartografia a grande scala della zona oggetto di indagine. Inoltre tale informazione è ricca di punti ben identificabili e potenzialmente visibili sui fotogrammi, come ad esempio spigoli di edifici, muretti, recinzioni etc. Naturalmente la cartografia utilizzata deve essere aggiornata ed è quindi necessario controllare se in alcune zone interessate dal rilievo si siano verificati dei cambiamenti rispetto a quanto riportato nella carta; è importante verificare poi la congruenza tra ciò che è visibile sulla carta e quanto presente nelle immagini, soprattutto per gli elementi minori come tettoie, garage etc.

L'impiego di punti estratti dalla cartografia come punti di appoggio (GCPs) permette di imporre dei vincoli lungo l'intero percorso del rilievo (a patto che i punti estratti siano visibili sulle immagini) e non solamente all'inizio o alla fine dello stesso: in questo modo è possibile contenere la deriva della soluzione, che conduce rapidamente ad errori superiori alle tolleranze richieste (come verificato, ad esempio, da Forlani et al, 2005).

La cartografia è comunque caratterizzata da una precisione intrinseca che è legata alle metodologie di restituzione (ad esempio per una carta a scala 1:1000 si possono ipotizzare precisioni di 20 cm in planimetria e 30 cm in quota): al fine di vincolare più rigidamente, il blocco fotogrammetrico si ritiene molto utile inserire all'interno della compensazione del blocco fotogrammetrico anche qualche posizione GPS. Questi punti, facilmente acquisibili all'inizio o alla fine del rilievo o in corrispondenza di aree con buona visibilità (come incroci o piazze), essendo noti con elevata precisione, permettono di vincolare in modo molto robusto il blocco. Contemporaneamente la soluzione così irrobustita evidenzia, tramite un'analisi degli scarti sui punti cartografici, l'eventuale presenza di errori sistematici della cartografia.

Qualora si utilizzino le immagini acquisite da entrambe le camere è possibile anche sfruttare l'informazione di vincolo dell'orientamento relativo di una camera rispetto all'altra, che rimane costante durante tutta la ripresa. Questa informazione nota a priori (viene ricavata tramite la procedura di calibrazione descritta nel dettaglio nel par. 2.3) permette di vincolare in modo molto forte le coppie di immagini acquisite contemporaneamente e migliorare di conseguenza le precisioni con cui sono determinabili i centri di presa, ovvero ricostruire la traiettoria del veicolo.

## 2.2 Sincronizzazione temporale

Poiché si vogliono integrare tra loro misure provenienti da differenti strumenti (georadar, GPS e fotogrammetria) è necessario che le acquisizioni abbiano lo stesso riferimento temporale.

I dati dell'antenna georadar sono solitamente acquisiti direttamente su un personal computer (PC) e le misure vengono associate a una stringa NMEA inviata da un ricevitore GPS opportunamente collegato al portatile. Per quanto riguarda le due fotocamere, sono comandate dallo stesso PC in modo remoto e, grazie ad un sistema di scatto appositamente realizzato, le immagini vengono acquisite con frequenza costante (da 1 a 30 secondi) in modo quasi sincrono (con differenze al più di un paio di millisecondi).

Figura 3 - Sistema per la gestione automatica dello scatto delle fotocamere.



Per ognuna delle camere il tempo di acquisizione viene memorizzato in un file in formato ASCII. Infine il GPS associa i suoi dati nella propria scala temporale. Per mezzo di un programma opportunamente realizzato, viene associato al tempo GPS il corrispondente tempo PC durante il rilievo. Quindi la trasformazione tra il tempo GPS e quello del PC viene stimata via software: si determinano con il metodo dei minimi quadrati i parametri di una trasformazione lineare tra le due scale. Ciò permette di interpolare la posizione del GPS all'istante di scatto, in corrispondenza del centro di presa delle due fotocamere, per le successive verifiche ed elaborazioni.

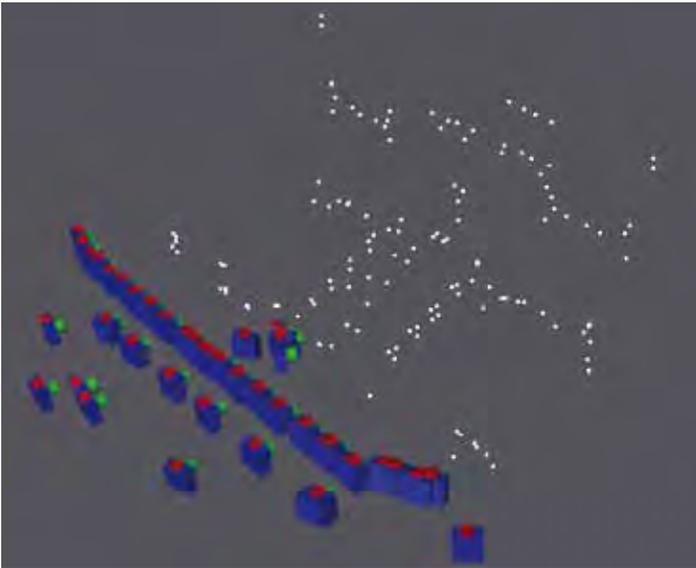
## 2.3 Trasferimento della posizione al GPR

Con lo scopo di integrare tra loro dati acquisiti da sistemi di navigazione diversi (GPS e camere fotogrammetriche) e per poter determinare la posizione dell'antenna georadar è necessario calibrare geometricamente l'intero sistema definendo posizione relativa e assetto di ciascun sensore. Ad esempio per trasportare la posizione del centro di proiezione di ciascuna camera al GPR si devono calcolare le componenti del vettore che collega i centri di presa delle fotocamere e il riferimento sull'antenna GPR, nonché gli angoli di rotazione tra le

differenti terne cartesiane (quella nella quale è inquadrato il rilievo e quelle intrinsecamente connesse a ciascuna camera fotogrammetrica). Le posizioni relative GPS-fotocamere e l'assetto di queste ultime servono inoltre per definire le pseudo-osservazioni dei centri di presa (le cui posizioni vengono determinate a partire dalla traiettoria dell'antenna GPS) nella compensazione del blocco fotogrammetrico e per vincolare l'orientamento relativo di una camera rispetto all'altra.

Per determinare i vettori di calibrazione, cioè la posizione relativa del centro di fase dell'antenna GPS rispetto al piano immagine delle due camere si acquisiscono, prima della ripresa, una serie di immagini di un apposito poligono di calibrazione, rilevando contemporaneamente anche le coordinate GPS. Il poligono di calibrazione deve essere un manufatto caratterizzato da dettagli fotograficamente evidenti, facilmente raggiungibile con il veicolo e di dimensioni simili a quelle degli oggetti che si intende riprendere in fase di rilievo: un buon esempio di poligono di calibrazione è un edificio che abbia anche balconi, scale etc. che garantiscano la presenza di punti di legame e di appoggio tra loro non complanari.

Figura 4 - Calibrazione del veicolo: acquisizioni delle immagini e punti collimati.



Le componenti del vettore permettono di integrare all'interno della soluzione fotogrammetrica anche qualche punto GPS noto con elevata precisione tramite equazioni di pseudo-osservazione del centro di proiezione della camera fotogrammetrica. Se durante la calibrazione viene determinata anche la posizione dell'antenna GPR (ad esempio con la sovrapposizione di una antenna GPS) in questa fase si possono calcolare le componenti del vettore di posizione relativa tra antenna GPR e

piano immagine: conoscendo infatti l'assetto di ogni camera e il vettore di calibrazione è possibile calcolare la posizione dell'antenna GPR sulla base della soluzione fotogrammetrica. Poiché durante i test fino ad ora realizzati non si è avuto a disposizione il georadar, il trasferimento di coordinate di cui sopra è stato effettuato tra la posizione delle fotocamere e una antenna GPS che ne ha simulato la presenza: il confronto con la soluzione ricavata dal solo dato satellitare è stato utilizzato per calcolare le discrepanze e quindi per valutare la bontà del metodo proposto.

Figura 5 – Tipologia edilizia del quartiere residenziale di Cremona dove è stato svolto il test.

### 3. Applicazioni sperimentali

Come riportato nell'introduzione il metodo è stato verificato prima con una serie di simulazioni numeriche e successivamente in alcuni test preliminari per valutarne la fattibilità e la precisione. Recentemente, infine, con lo scopo di analizzare la fattibilità operativa in un contesto molto simile alla realtà, è stato realizzato un test cinematico in un quartiere residenziale della città di Cremona.



Il test è stato svolto in questa zona per due motivi principali: in primo luogo la presenza di soli edifici bassi (villette di un piano e edifici non più alti di due piani fuori terra) permette la ricezione del segnale GPS durante tutto il rilievo, in modo da avere sempre una soluzione da utilizzarsi come confronto per la procedura fotogrammetrica. Inoltre il rilievo è stato svolto percorrendo solo traiettorie chiuse, garantendo così una soluzione fotogrammetrica autoconsistente ed evitare, allo stesso tempo, la presenza di errori di deriva (come sperimentato nel corso di alcuni test con veicolo su traiettorie rettilinee).

Il veicolo è stato attrezzato con due fotocamere, leggermente conver-

genti tra loro, e due antenne GPS: la strumentazione è stata fissata sul tettuccio del veicolo e lo scatto delle fotocamere è stato gestito in modo automatico (come illustrato nel paragrafo 2.2), con un intervallo di scatto pari ad un secondo, acquisendo un totale di 600 immagini. Al termine del test è stato anche svolto un apposito rilievo con lo scopo di calibrare il sistema utilizzando una villetta come poligono di calibrazione (sulla quale erano stati in precedenza misurate, con strumentazione topografica classica, le coordinate di 7 punti). Le immagini sono state acquisite seguendo una traiettoria semicircolare, poiché era emerso, da una serie di apposite simulazioni, come questa fosse la geometria in grado di garantire le migliori precisioni. Contemporaneamente alle immagini sono state acquisite anche le osservazioni GPS, che sono state post-processate in modalità cinematica relativa di fase e successivamente interpolate al tempo di scatto. La compensazione del blocco ha fornito l'orientamento esterno delle singole immagini (posizione e assetto) che, confrontato con la posizione del centro di fase dell'antenna GPS, ha fornito la posizione relativa nel sistema di riferimento terreno (quello del GPS), cioè le componenti del vettore che congiungono il centro di presa di ciascuna immagine con il centro di fase dell'antenna GPS al tempo di scatto. Sono state infine mediate le componenti del vettore, precedentemente riportato nel sistema di riferimento associato a ciascuna immagine. Queste componenti, inserite all'interno della compensazione del blocco di immagini, consentono di scrivere delle equazioni di pseudo-osservazioni del centro di proiezione partendo dalla posizione del centro di fase dell'antenna GPS (al tempo di scatto delle camere) (Forlani et al, 2005).

Sulla base dei dati acquisiti durante il test cinematico di Cremona si è deciso di verificare una serie di scenari che facilmente possono presentarsi in situazioni operative in ambito urbano. Per fare ciò sono state ipotizzate differenti configurazioni di vincolo del blocco fotogrammetrico.

Figura 6 - Disposizione dei punti d'appoggio utilizzati nelle diverse configurazioni del blocco (GCPs cartografici e punti d'appoggio GPS).



In primo luogo è stato considerato il solo vincolo ottenuto con i punti cartografici, utilizzando 52 punti estratti dalla cartografia 1:1000 della città di Cremona. Tali punti sono stati individuati in corrispondenza di spigoli di edifici, di tettoie o di particolari posti sulle falde dei tetti (questi ultimi sono preziosi per l'appoggio, in particolare come punti in quota, in quanto rafforzano la geometria del blocco). La precisione di questi punti è quella tipica della cartografia a scala 1:1000; 20 cm per le coordinate planimetriche e 30 cm per la quota.

Poiché a parere degli autori è ragionevole ipotizzare che in corrispondenza di alcuni luoghi in cui il cielo è maggiormente visibile (come ad esempio incroci o piazze) sia possibile acquisire una soluzione satellitare di buona qualità, si è deciso di contemplare, in una nuova configurazione di vincolo, anche alcune posizioni GPS che, nella modalità esposta in precedenza, costituiscono una pseudo-osservazione del centro di presa. La precisione di questi ulteriori punti di appoggio è quella tipica del rilievo differenziale di fase GPS, vale a dire pochi cm nelle 3 coordinate spaziali, valori che vengono dedotti dai risultati dell'elaborazione cinematica del rilievo satellitare.

La rigida posizione delle due camere sul veicolo ha suggerito inoltre di utilizzare l'orientamento relativo delle due camere come ulteriore vincolo del blocco.

La posizione e l'assetto relativo tra le due camere sono stati calcolati come presentato in (Forlani et al, 2005) ed in particolare con riferimento alle seguenti relazioni:

$$\underline{X}_{GPS}^{cam2} = \underline{X}_{GPS}^{cam1} + \underline{R}_{cam1}^{GPS} \cdot \underline{b}^{cam1}$$

$$\underline{R}_{GPS}^{cam2} = \underline{R}_{cam1}^{cam2} \cdot \underline{R}_{GPS}^{cam1}$$

dove:

$\underline{b}^{cam1}$  = base di presa nel sistema di riferimento legato alla camera 1

$\underline{R}_{cam1}^{GPS}$  = matrice di rotazione che ruota dal sistema di riferimento legato al fotogramma 1 al terreno (GPS)

$\underline{R}_{GPS}^{cam2}$  = matrice di rotazione che ruota dal sistema di riferimento legato al fotogramma 2 al terreno (GPS)

$\underline{R}_{cam1}^{cam2}$  = matrice di Orientamento Relativo asimmetrico tra i fotogrammi 1 e 2

$\underline{X}_{GPS}^{cam2}$  = posizione della generica camera nel sistema di riferimento terreno

La prima relazione ci permette di calcolare la posizione del centro di presa della camera 2 a partire dalla posizione della camera 1, nota la base di presa tra le due camere (determinabile in fase di calibrazione del veicolo). La seconda equazione consente di definire gli angoli d'as-

setto della seconda camera note la matrice di rotazione della camera 1 (dal sistema di riferimento terreno a quello della camera) e la matrice di rotazione di orientamento relativo tra le 2 camere. Per la definizione di questa seconda matrice è utile tener presente che gli assi ottici delle due camere sono circa paralleli e quindi che gli angoli di orientamento relativo sono piccoli. Il loro valore può essere assunto pari alla media degli angoli di orientamento relativo tra le due camere, desunto da una compensazione preliminare (ad esempio con solo appoggio cartografico, quello definito nella prima configurazione di vincolo del blocco): oltre alla media è possibile calcolare anche lo sqm, da utilizzare per il calcolo dei pesi delle equazioni. Ciò comporta che la matrice di rotazione poco si discosti da una matrice unitaria e quindi possa essere approssimata con la sua forma emisimmetrica:

$$\begin{bmatrix} 1 & \alpha & -\gamma \\ -\alpha & 1 & \beta \\ \gamma & -\beta & 1 \end{bmatrix}$$

In questo modo solo le equazioni degli elementi fuori diagonale devono essere linearizzate rispetto ai parametri di assetto delle due camere.

Sulla base delle differenti configurazioni di vincolo sono state realizzate altrettante compensazioni del blocco di immagini al fine di determinare posizione e precisione di stima dei centri di presa e dell'antenna GPS che simula la presenza dell'antenna GPR. Le compensazioni sono state realizzate con il programma Calge (Forlani, 1986) nel quale è possibile inserire le differenti configurazioni di vincolo di cui sopra. Il blocco si compone di 600 immagine, 17595 punti oggetto, i quali, essendo osservati mediamente su 3 immagini, portano il numero di punti immagine a 60439. L'estrazione dei punti omologhi nelle immagini è stata realizzata con il programma Eyedea (Roncella et al, 2011a, Roncella et al, 2011b) mentre una prima compensazione, effettuata con il programma Photomodeler<sup>®</sup>, ha consentito la reiezione dei pochi errori di falsa individuazione degli omologhi, la determinazione delle coordinate approssimate dei punti oggetto e i valori approssimati dell'orientamento esterno delle immagini.

Nella tabella 1 sono riportati gli rms degli sqm delle coordinate dei centri di presa delle camere, ottenuti con la compensazione del blocco, considerando il solo appoggio cartografico o aggiungendo 6 punti GPS acquisiti in corrispondenza degli incroci stradali.

Tabella 1 - Rms (sqm) delle coordinate dei centri di presa delle camere con differente configurazione di vincolo.

	52 punti cartografici	52 punti cartografici e 6 punti GPS
E [m]	0.105	0.056
N [m]	0.103	0.050
h [m]	0.119	0.040

Dall'analisi dei risultati riportati in tabella 1 è possibile notare come l'inserimento di alcuni punti d'appoggio GPS migliori notevolmente la precisione del blocco fotogrammetrico: questi punti sono infatti noti con precisioni di pochi cm e possono quindi essere molto utili anche per correggere eventuali errori sistematici presenti nella cartografia. In tabella 2 sono riportati i risultati ottenuti per i due scenari di appoggio già illustrati in precedenza, inserendo anche l'ulteriore vincolo dell'orientamento relativo (OR) tra le due camere.

Tabella 2 - Rms (sqm) delle coordinate dei centri di presa delle camere con differente configurazione di vincolo e orientamento relativo delle camere.

	52 punti cartografici	52 punti cartografici e 6 punti GPS
	con OR	con OR
E [m]	0.075	0.044
N [m]	0.066	0.036
h [m]	0.079	0.035

Sulla base dei dati riportati in tabella 2 si nota come l'inserimento di un vincolo aggiuntivo legato all'assetto reciproco delle fotocamere migliori ulteriormente le precisioni del blocco fotogrammetrico indipendentemente dal tipo di appoggio utilizzato. Ovviamente, anche in questo caso, il blocco con soli punti cartografici risulta essere meno preciso. Infine, utilizzando i vettori di posizione relativa tra camera e GPS, stimati in fase di calibrazione, è stato possibile valutare la posizione del GPR, trasportando la soluzione fotogrammetrica sull'antenna GPS (che nel nostro test simula la presenza dell'antenna georadar) interpolata al tempo di scatto delle camere, secondo l'espressione:

$$\underline{X}_{GPR} = \underline{x}^{GPS} + \underline{R}_{cam}^{GPS} \cdot \underline{a}^{cam}$$

dove

$\underline{X}_{GPR}$  = posizione dell'antenna GPR nel sistema di riferimento terreno (GPS) all'istante di scatto della camera

$\underline{x}^{GPS}$  = posizione del centro di presa della generica immagine nel sistema di riferimento terreno (GPS)

$\underline{R}_{cam}^{GPS}$  = matrice di rotazione della generica immagine dal sistema di riferimento camera al sistema di riferimento terreno (GPS)

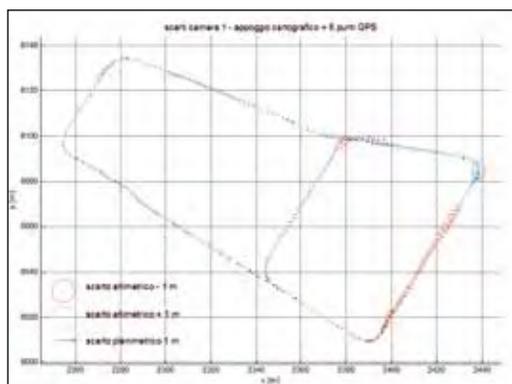
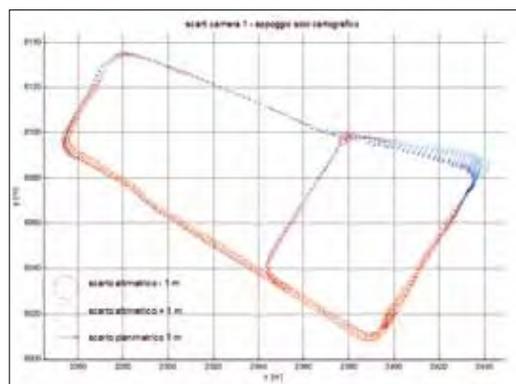
$\underline{a}^{cam}$  = vettore di calibrazione che collega il centro di presa con il centro di fase dell'antenna GPR (espresso nel sistema di riferimento camera e quindi invariante nel tempo)

Tabella 3 - RMSe della posizione del GPR determinata con la soluzione fotogrammetrica (trasferita con vettore di calibrazione) rispetto alla soluzione GPS

RMSe [m]	senza OR			con OR vincolato		
	E	N	h	E	N	h
52 punti cartografici	0.180	0.311	0.260	0.195	0.261	0.248
52 punti cartografici e 6 punti GPS	0.149	0.140	0.128	0.114	0.092	0.133

In tabella 3 vengono riportati gli RMSe degli scarti tra la posizione determinata con l'approccio fotogrammetrico e quella interpolata dal dato satellitare (per le 600 immagini).

Figura 7 – Scarti planoaltimetrici in funzione del diverso appoggio del blocco



Per comprendere meglio questi risultati, sono visualizzati in figura 7 gli scarti planoaltimetrici (solo quelli determinati dalla camera 1) per le due configurazioni di appoggio del blocco (senza o con punti GPS). Dall'analisi dei risultati riportati in tabella 3 e in figura 7 è evidente che l'inserimento di qualche punto GPS permette di determinare con maggiore precisione le coordinate del georadar (simulato dalla presenza di un'antenna GPS). L'inserimento del vincolo imposto dall'orientamento relativo delle fotocamere migliora ulteriormente le precisioni con le quali sono calcolate le coordinate dell'antenna GPR, in particolare nei tratti in cui le precisioni erano più scadenti.

## Conclusioni

In questo articolo sono stati presentati i risultati ottenuti in un test cinematico nella città di Cremona, con diverse configurazioni di appoggio del blocco fotogrammetrico, in particolare di tipo solo cartografico e con l'aggiunta di alcuni punti GPS i quali, tramite il vettore di calibrazione, generano una pseudo-osservazione di altrettanti centri di presa. I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti da un'antenna GPS doppia frequenza che simulava la posizione di un'antenna

georadar. In tutti i casi analizzati il metodo si è dimostrato valido e ha permesso di determinare la traiettoria del veicolo per via fotogrammetrica entro le tolleranze richieste per la corretta georeferenziazione di un rilievo georadar. In pratica il posizionamento del GPR avviene con precisione di circa 30 cm nelle tre coordinate se l'appoggio è di tipo solo cartografico; la precisione migliora decisamente passando a poco più di un decimetro nel caso in cui vengano inseriti anche alcuni punti GPS.

È stato verificato, come era da attendersi, che l'inserimento di un vincolo di orientamento relativo tra le due camere montate rigidamente sul veicolo, garantisce maggior affidabilità e precisione alla compensazione del blocco fotogrammetrico rispetto al caso in cui le due camere non sono vincolate tra loro. Anche la presenza di alcuni punti GPS migliora la precisione generale del risultato e lo rende più robusto: si è verificato con una serie di simulazioni come anche pochi valori siano in grado di assorbire almeno in parte gli errori di posizionamento fotogrammetrico, che possono essere dovuti ad eventuali errori sistematici presenti nella cartografia, così come sembrano in grado di mettere in evidenza la presenza di errori grossolani cartografici.

## Bibliografia

Bibliografia da riviste:

- FORLANI G., 1986. Sperimentazione del nuovo programma CALGE dell'ITM, Bollettino SIFET No. 2, pp. 63-72
- CROSILLA F., VISINTINI D., 1998. External Orientation of a mobile sensor via Dynamic vision of digital map points. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 57(1), pp. 41-60.
- CAZZANIGA N.E., PAGLIARI D., PINTO L., 2013. Esperienze di posizionamento GPS cinematico in ambito urbano, Bollettino SIFET n° 1, pp 9-22

Bibliografia da convegni:

- EL-SHEIMY N., SCHWARZ K. P., GRAVEL M. 1995. Mobile 3-D Positioning Using GPS/INS/ Video Cameras, The Mobile Mapping Symposium, Ohio State, USA, pp. 236-249.
- CHAPLIN B. A., CHAPMAN M. A., 2001. Collection of roadway asset data along an obstructed urban corridor. Proc. of the 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology.
- 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, 3-5 Oct. 2005, Wichman Verlag, Vol I, pp. 265-274.
- FORLANI G., PINTO L., 2008. GPS-assisted Adjustment of Terrestrial Blocks, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 36, Part 5/C55, Comm. V, Padua (Italy), pp. 98-105
- RONCELLA R., REMONDINO F., FORLANI G., 2005. Photogrammetric bridging of GPS outages in mobile mapping. Proc. of Videometrics VIII, SPIE-IS&T Electronic Imaging. Vol.5665, pp. 308-319
- 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).
- 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
- 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
- CAZZANIGA N. E., PAGLIARI D., PINTO L., 2012. Photogrammetry for Mapping Underground Utility Lines with Ground Penetrating Radar in Urban Areas, Proceedings of the XXII ISPRS Congress, Melbourne.