ESPERIENZE DI NAVIGAZIONE GEODETICA IN UNA RETE DI SP GPS PER L'ORIENTAMENTO DIRETTO DI FOTOGRAMMI

Noemi Emanuela CAZZANIGA(*), Gianfranco FORLANI(**), Livio PINTO (*)

(*) DIIAR Politecnico di Milano – p.zza L. da Vinci 32 – 20133 Milano – e-mail: noemi.cazzaniga@polimi.it
(**) Università degli Studi di Parma – viale delle Scienze – 26100 Parma – e-mail: gianfranco.forlani@unipr.it

Riassunto
Si riportano i risultati di due esperienze di rilevamento con veicolo rilevatore equipaggiato con 3 antenne GPS, in grado quindi di fornire posizione e assetto del veicolo. In attesa di integrare i risultati con quelli di un IMU a basso costo, si sono verificate le precisioni di posizionamento e assetto acquisite dal GPS sia in post processamento che in real time, entrambe con l'ausilio dei servizi della rete di Stazioni Permanenti GNSS della Regione Lombardia. In uno dei due test la verifica è stata realizzata in modo del tutto indipendente, tramite la collimazione fotogrammetrica di punti di un poligono appositamente realizzato: in questo caso l'orientamento esterno delle fotocamere è stato calcolato dalla posizione delle antenne GPS previa calibrazione dell'intero sistema. I risultati sono confortanti e invitano a progredire nelle sperimentazioni di utilizzo delle reti di Stazioni Permanenti in ambito cinematico.

Abstract
The paper reports on two tests of kinematic positioning and navigation with a 3 antennae GPS system. In the first, the inner consistency of the real time and post processing trajectories with respect to the permanent GPS network of Regione Lombardia have been verified; in the second, both position and attitude of the vehicle have been computed and its accuracy tested by direct georeferencing of a series of stereo images of a test field. Both experiments gave successful results and underline the accuracy potential and operability of a permanent GPS network.

Introduzione

Un veicolo rilevatore (MMV) è un automezzo attrezzato con strumentazione di navigazione (IMU, odometri, GPS) in grado di garantire l'acquisizione della posizione e dell'assetto di sensori di acquisizione remota presenti sul veicolo quali camere fotogrammetriche, telecamere, laser scanner, ecc. Questi sistemi sono spesso utilizzati, per così dire, in collaborazione tra di loro al fine di avere una soluzione integrata, con il vantaggio di diminuire le lacune di dati, aumentare la precisione e migliorare l'accuratezza e l'affidabilità. I principali ambiti di utilizzo sono l'acquisizione delle caratteristiche geometriche della carreggiata stradale, il rilievo della cartellonistica, dei passi carrai, tutti elementi essenziali in un Sistema Informativo Stradale. Per un posizionamento di precisione (migliore di 20-30 cm su tutto il percorso) è necessario l'utilizzo del GPS in modalità differenziale: a tale scopo sono indispensabili stazioni di riferimento GPS a distanze relativamente ridotte ovvero il poter disporre di un servizio di Reti di Stazioni Permanenti GPS (come ad esempio quello gestito da Irealp in Regione Lombardia). Essa costituisce idealmente la soluzione più efficiente, permettendo una forte semplificazione delle attività di rilevamento; di un certo interesse è anche la possibilità di ottenere la soluzione in real time, anzichè in post processamento. In caso di perdite di segnale GPS (con durata non eccessiva) la soluzione viene calcolata solo sulla base dei dati IMU; su tratti molto brevi, è possibile orientare la sequenza di immagini con la selezione e il riconoscimento automatico di punti di legame (Roncella et alii, 2005).

Da alcuni anni un gruppo di Ricerca composto da ricercatori dell'Università di Parma e del Politecnico di Milano sta lavorando per attrezzare un MMV con finalità operative e di ricerca. In particolare l'ambito attuale di ricerca riguarda l'integrazione tra l'IMU e il GPS tramite la scrittura di un filtro di Kalman nel quale integrare dati accelerometrici, giroscopici e di posizione. A tal proposito, per poter disporre di soluzioni di riferimento alternative, sono stati realizzati alcuni percorsi di prova disponendo sul tetto del furgone una serie di 3 antenne GPS, capaci quindi di fornire oltre alla posizione, anche l'assetto del veicolo. L'obiettivo è duplice: confrontare dapprima due soluzioni (una a 3 antenne GPS rispetto alla soluzione IMU "standalone") studiando il comportamento, in termine di derive del sistema IMU, in condizioni di ricezione GPS ottimale; successivamente si vuole integrare in un filtro le due soluzioni che costituiranno il modo ordinario di posizionamento ed orientamento delle camere.
In attesa dei risultati di questa sperimentazione, il percorso eseguito con le 3 antenne GPS ha permesso una serie di interessanti analisi sia dal lato strettamente GPS sia del GPS come "sistema integrato" di navigazione.
Nel primo caso si sono utilizzati i dati per valutare una navigazione geodetica all'interno di una rete di stazioni permanenti (GNSS di IREALP). A tal proposito è stato realizzato un rilievo di circa 2 h su percorso misto (extraurbano ed urbano) analizzando i risultati di posizionamento NRTK e quelli cinematici post-processati (PPK) rispetto a Stazioni Permanenti di tipo Virtuale (VRS). Nel secondo caso, dopo aver calcolato posizione e assetto del veicolo e di conseguenza delle camere fotogrammetriche, si sono restituite le coordinate di una serie di punti di un poligono di punti noti, valutando, in modo indipendente, la precisione della georeferenziazione del veicolo nel suo complesso.

Il veicolo rilevatore dell'Università di Parma

Il veicolo che è stato utilizzato nel corso dei rilievi oggetto di questo lavoro è quello allestito presso l'Università di Parma (Varini e al. 2005).
Per quanto concerne la strumentazione (figura 1) il veicolo è dotato di 3 antenne GPS (3 Leica AT502 collegate ad altrettanti ricevitori System 530; per effettuare il rilievo di tipo NRTK una delle antenne Leica è stata sostituita da una Zephyr Geodetic Trimble connessa ad un ricevitore 5700), 2 fotocamere digitali (Basler A101f) e, in via sperimentale, da un IMU a basso costo (Crossbow 400CC-100). Punto focale dell'integrazione dei sensori è la sincronizzazione temporale, realizzata esternamente; sul PC che governa le telecamere vengono archiviate le immagini con il clock del PC mentre la camera invia al ricevitore un segnale attraverso la porta Input Event. I dati IMU vengono registrati su un secondo notebook al quale è collegato anche un GPS palmare per garantire la stessa scala temporale.

Figura 1 – Disposizione della strumentazione nel veicolo rilevatore dell'Università di Parma

Navigazione geodetica in una rete di SP GNSS

Il 4 maggio 2006 è stato effettuato un test di navigazione geodetica in una zona a margine della rete di SP gestita da IREALP in Regione Lombardia. Il veicolo era attrezzato con le sole 3 antenne GPS, di cui 2 Leica e 1 Trimble. Quest'ultima era connessa, tramite protocollo Ntrip, ai servizi di rete; in particolare è stato attivato il servizio di posizionamento RTK secondo la modalità FKP. La frequenza di campionamento dei dati GPS è stata mantenuta pari a 1 s.

Il percorso si è sviluppato lungo un tratto dell'argine sinistro del fiume Po partendo a sud dell'abitato di Guardamiglio fino a quello di Somaglia (prov. di Lodi), in andata e ritorno (figura 3). La velocità del veicolo è stata mantenuta approssimativamente costante e pari a circa 10 m/s. Oltre all'acquisizione della soluzione NRTK dell'antenna Trimble, i dati GPS delle tre antenne sono stati trattati con software commerciale LGO (soluzione PPK), sia rispetto alle due più vicine stazioni permanenti (Cremona e Crema), sia rispetto ad una VRS posta circa nel baricentro del percorso.

Le posizioni delle singole antenne sono state confrontate tra di loro in tre differenti modi.

a) Confronto tra le posizioni delle tre antenne rispetto ad uno stesso riferimento (SP). I risultati ottenuti, in termini di distanza (quantità invariate anche in ambito cinematico), sono del tutto analoghi per entrambe le SP prese in considerazione: per tale motivo nella tabella 2, riassuntiva delle statistiche dei confronti, viene riportato solo quello rispetto alla SP di Cremona.
b) Confronto tra le posizioni dell'antenna Trimble determinata rispetto alle SP e quella VRS. In questo caso si sono voluti quantificare gli eventuali vantaggi derivanti dall'assumere una VRS quale stazione di riferimento. Si tenga presente che la SP di Cremona dista, mediamente, circa 25 km dalla zona di rilievo mentre quella di Crema circa 30 km. Anche in questo caso vista la sostanziale omogeneità dei risultati si è riportato nella tabella 2 il solo risultato di confronto ottenuto rispetto alla stazione di Cremona.
c) Confronto tra le posizioni dell'antenna Trimble ottenute in modalità NRTK e PPK (SP di Cremona, Crema e VRS). Per effetto della latenza del segnale di rete, la soluzione NRTK non è sincrona a quella PPK; perciò le posizioni PPK sono state interpolate nel tempo tramite splines lineari. Si riporta a titolo di esempio il risultato del confronto con la soluzione PPK di Cremona.

	Distanza tra 2 antenne			**VRS vs SP**			**NRTK vs PPK**		
	Dx-Sx	**Sx-Px**	**Dx-Px**	**E**	**N**	**h**	**E**	**N**	**h**
Media [m]	1.802	1.617	2.552	0.001	0.000	-0.019	0.005	-0.003	0.020
Sqm [m]	0.023	0.030	0.011	0.013	0.013	0.129	0.023	0.015	0.033
Max [m]	1.966	1.909	2.706	0.083	0.177	0.253	0.435	0.194	0.363
Min [m]	1.421	1.078	2.425	-0.260	-0.157	-1.074	-0.443	-0.166	-0.485
# campioni	3630	4002	4103	3553			3168		

Tabella 2 - Statistica dei confronti nel test di posizionamento cinematico dei veicolo

La lettura della tabella necessita di alcune precisazioni. La variabilità della numerosità dei campioni dipende dal non aver acceso e spento i 3 ricevitori in modo sincrono e dal fatto che sono state utilizzate nel confronto solo le soluzioni di tipo *fixed*; la numerosità della soluzione NRTK è inferiore alle altre per effetto dei differenti tempi di inizializzazione. Le sensibili variazioni delle soluzioni, evidenziate dalla differenza tra i valori minimi e massimi, sono da ascrivere in larga parte al percorso in zona urbana (nella parte alta della figura 3); tali differenze sono più marcate in quota piuttosto che nelle componenti planimetriche. I valori poco significativi delle medie nei confronti "VRS vs SP" e "NRTK vs PPK" escludono la presenza di errori sistematici. Infine le dispersioni dei risultati, sempre contenute in qualche centimetro (tranne per la quota nel confronto "VRS vs SP"), sono conformi alle precisioni attese in questo tipo di applicazioni. Nella figura 3 viene graficizzato il percorso del veicolo, sia in andata che in ritorno, riportando con differenti simboli i differenti

valori dello scarto planimetrico del confronto “NRTK vs PPK”. Si noti che gli scarti maggiori sono concentrati in corrispondenza della perdita del segnale GPS.

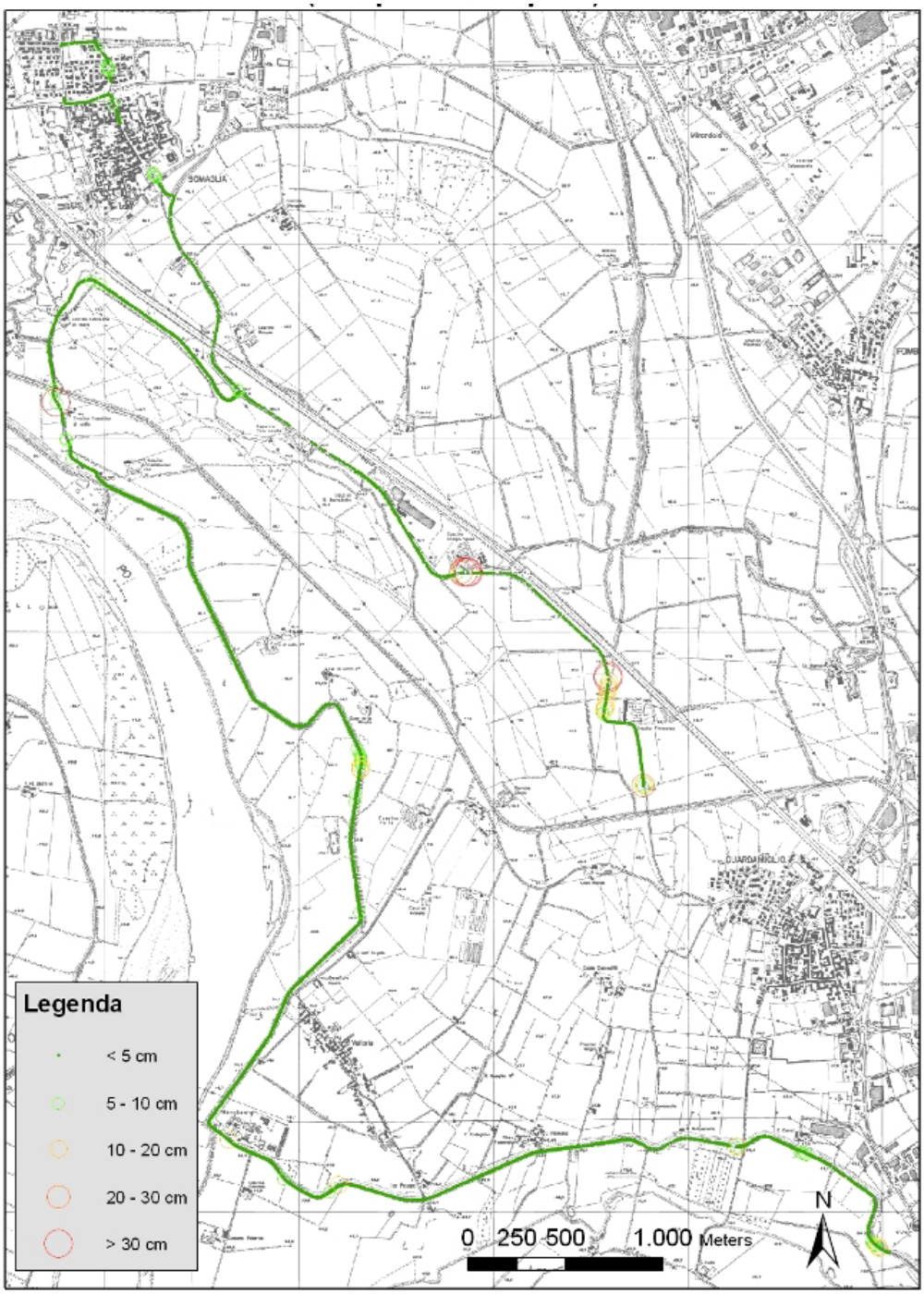

Figura 3 – Graficizzazione dei risultati del confronto tra soluzione NRTK e PPK.

Test di navigazione geodetica con verifica fotogrammetrica

Il 24 ottobre 2005 è stato realizzato un test con il veicolo rilevatore nei pressi del parcheggio del Polisportivo di Lodi (figura 4). Preventivamente gli incroci della segnaletica orizzontale del parcheggio erano stati rilevati topograficamente al fine di costituire un denso poligono di punti fotografici noti.

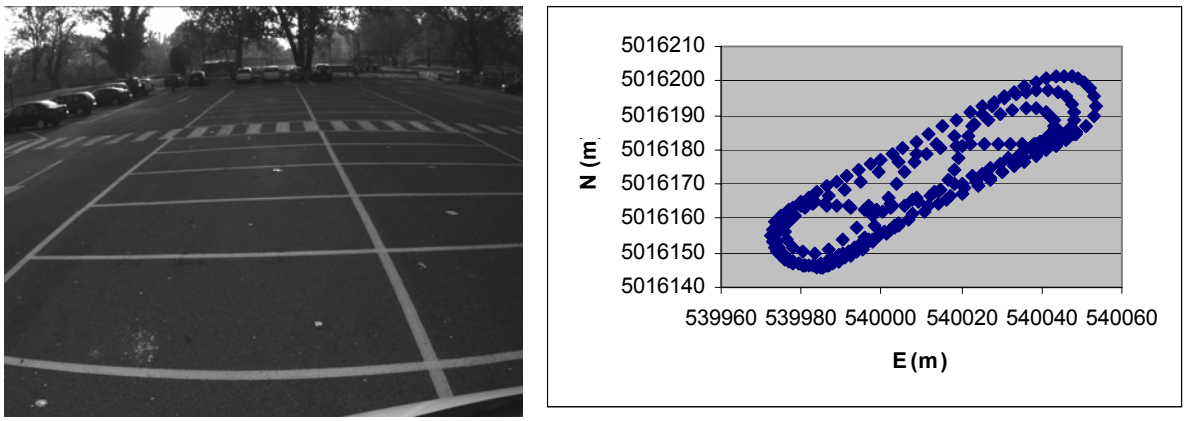

Figura 4 – Un'immagine del poligono di Lodi a) e sviluppo del percorso b).

Il veicolo era attrezzato con tre antenne GPS Leica, le due fotocamere Basler e l'IMU (figura 1). Sono stati realizzati 5 differenti percorsi intervallati da una sosta; uno di questi (il quarto) è uscito dal parcheggio, percorrendo un viale alberato con conseguente perdita del segnale GPS.
Il trattamento dei dati GPS è stato realizzato in PPK rispetto ad una stazione *master* posta nelle vicinanze e ad una VRS generata dalla rete di Stazioni Permanenti di IREALP. Le differenze, nelle tre coordinate, hanno uno sqm di qualche millimetro (al massimo 7) e le medie sono comparabili, quindi non significative.
Dalle posizioni delle tre antenne sono stati ricavati posizione e assetto del veicolo e, applicando i parametri di calibrazione a^c e R_V^c, in grado di convertire posizione e assetto dal sistema di riferimento legato al veicolo a quello di ciascuna fotocamera, si sono determinati gli OE delle camere fotogrammetriche secondo le relazioni (1) che rappresentano le equazioni della georeferenziazione diretta delle immagini.

$$X_c^m(t) = X_V^m(t) + R_V^m(t)\, R_c^V\, a^c$$
$$R_c^m(t) = R_V^m(t)\, R_c^V \qquad (1)$$

dove:
$X_c^m(t)$, $R_c^m(t)$ = orientamento esterno della fotocamera al tempo (t)
$X_V^m(t)$, $R_V^m(t)$ = posizione e assetto del veicolo al tempo (t) (determinato con le antenne GPS)
R_c^V , a^c = parametri di calibrazione determinati a veicolo fermo.

Come prima verifica della georeferenziazione diretta dei fotogrammi si sono ricavati per via fotogrammetrica gli orientamenti esterni di circa una decina di immagini: non si evidenziano scostamenti sistematici significativi; gli RMS delle differenze sono del tutto confortanti anche come verifica indiretta del posizionamento GPS. Il contributo degli errori angolari e di posizionamento è comparabile solo entro una decina di metri: superando tale limite, gli errori angolari prendono il sopravvento.

ΔE [m]	ΔN [m]	Δh [m]	Δω [gon]	Δϕ [gon]	Δκ [gon]
0.041	0.058	0.019	0.5000	0.4221	0.6415

Tabella 5 – RMS delle differenze dell'O.E. delle immagini acquisie con 3 antenne GPS e fotogrammetricamente.

Sono state infine restituite le coordinate dei *check points* di una serie di coppie di immagini per ciascun "giro", vale a dire con sempre maggior distanza temporale dall'inizio del rilievo. Il software

utilizzato è MMT dell'Università di Parma (Varini et alii, 2005). I risultati, in termini di differenze di coordinate dipendono, come era ovvio aspettarsi, data la limitata base di presa, dalla distanza della coppia di immagini dal punto osservato; questa evidenza è meno marcata in quota in quanto la configurazione di presa garantisce, in questa direzione, una precisione circa doppia (figura 6a). L'evidenza sperimentale è stata confrontata con la propagazione della varianza nel caso fotogrammetrico di tipo normale, verificando l'aderenza dei dati sperimentali alla precisione teorica (figura 6b).

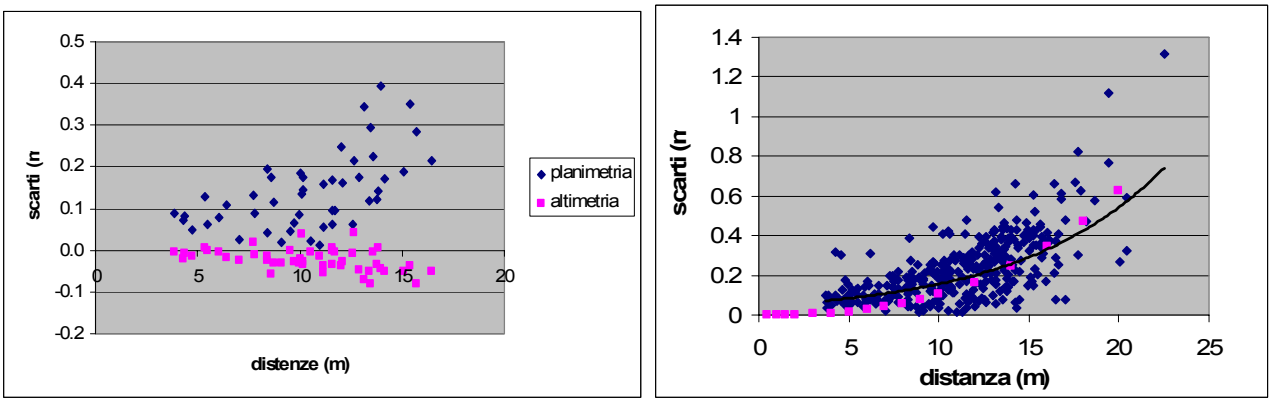

Figura 6 – Distribuzione degli scarti planoaltimetrici in un "giro" (a) e confronto tra risultati teorici e quelli sperimentali(b)

Conclusioni

Il presente lavoro, seppur nella limitatezza dei test effettuati, ha messo in luce che le reti Regionali di Stazioni permanenti e i suoi prodotti sia in termine di VRS per il PPK, che di NRTK possono essere validamente utilizzati per la georeferenziazione di veicoli rilevatori.

Le esperienze condotte con il veicolo dotato di 3 antenne GPS hanno permesso di mettere a punto una metodologia di calcolo dell'OE delle camere fotogrammetriche e di verificarne la correttezza metrica. Le precisioni empiriche riscontrate sono state suddivise in fasce di distanza di collimazione: gli RMS delle differenze sui punti di controllo sono contenute in circa un decimetro entro una decina di metri dal veicolo, adatte quindi per l'inserimento in un Sistema Informativo finalizzato al Catasto Stradale.

Ringraziamenti e riconoscimenti

Un grazie all'ing. Roberto Urso che ha eseguito le misure fotogrammetriche del test realizzato a Lodi, discutendo su queste problematiche la tesi di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio del Politecnico di Milano.

Il presente lavoro è stato finanziato con fondi del MIUR- Cofin 2004 prot. 2004088511, nell'ambito del progetto PRIN "*Applicazioni di metodologie innovative di rilevamento dati per Sistemi Informativi Stradali di aree urbane e industriali e agricole in evoluzione"*, coordinato dal Prof. G. Manzoni dell'Università di Trieste.

Bibliografia

Roncella R., Forlani G., Varini A. (2005). "Georeferenziazione fotogrammetrica automatica in applicazioni Mobile Mapping". Atti del Convegno Nazionale SIFET "Attuali Metodologie per il rilevamento a grande scala e per il monitoraggio".

Varini A., Roncella R., Forlani G.. (2005). "Test di Precisione di un Veicolo Rilevatore". Atti del Convegno Nazionale SIFET "Attuali Metodologie per il rilevamento a grande scala e per il monitoraggio".