

Confronto dei parametri cinematici del moto di un veicolo determinati con metodi satellitari GNSS e con sistema integrato GPS/IMU

**Guido FASTELLINI (*), Fabio RADICIONI (*),
Armando SCHIAVONI (**), Aurelio STOPPINI (*)**

***DICA - Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale - Università di Perugia - Laboratorio di Topografia e Fotogrammetria - Via Duranti 93, 06125 PERUGIA tel. 0755853765; e-mail: topos@unipg.it**

****ITALECO S.p.A. via Ostiense 131/L, 00154 Roma tel. 06454095234; e-mail: a.schiavoni@italeco.it**

Riassunto

Il rilievo cinematico con tecnologie satellitari ha assunto negli ultimi anni un'importanza notevole in relazione soprattutto alle novità normative che impongono agli Enti proprietari e/o Gestori di strade di dotarsi di un Catasto adeguato.

Il Laboratorio di Topografia dell'Università di Perugia ha approfondito l'aspetto topografico della descrizione del tracciato stradale attraverso una sequenza di punti ottenuta da rilievo satellitare GNSS. L'analisi si è basata inizialmente sul rilievo cinematico con campionamento a frequenza elevata (massimo 20 Hz) disponendo in prossimità del tracciato una serie di ricevitori GNSS di riferimento e successivamente definendo procedure semi-automatiche per il confronto ed il filtraggio statistico dei risultati ottenuti in post-elaborazione delle traiettorie derivanti da configurazioni ridondanti. Nella fase successiva si è dotato il veicolo anche di un sistema integrato IMU-GPS, abilitato a ricevere correzioni differenziali OMNISTAR-HP. E' stato perciò possibile confrontare le soluzioni dei parametri cinematici forniti dal sistema IMU-GPS con quelle ottenute attraverso la tecnica GNSS, mentre è tuttora in corso l'elaborazione dei dati di assetto del veicolo ricavati da quattro antenne GNSS con le corrispondenti misure fornite dal sistema IMU-GPS.

Abstract

The kinematic survey with GNSS measurements is becoming very important because of the new Italian laws about road cadastre.

The Laboratory of surveying of Perugia University has deepened the aspect of the survey of the road axis with GNSS measurements. The analysis has began with a kinematic survey with GNSS measurements with a sampling rate of maximum 20 Hz. This survey was made with three GNSS static receivers beside the surveyed road, all the redundant results has been checked and statistically filtered with semi-automatic procedures. In the next step it has been installed on a van also an inertial and GPS measurement system, that it is able to receive OMNISTAR-HP corrections. It was possible to compare the solutions about kinematic parameters from the IMU-GPS system with the same kind made by GNSS measurements. Now it is being carried out the data about the orientation of the van by means of four GNSS antennas together with the measurements deriving from the IMU-GPS system.

1. Introduzione al D.M. LL. PP. 1/6/2001 e ai M.M.S.

Già il Codice della Strada del 1992 richiedeva che gli Enti proprietari e/o gestori di strade si dotassero di un Catasto, inteso come inventario di tutti i beni stradali pubblici all'interno del territorio nazionale; con il D.M. LL. PP. 1/6/2001 si specifica che, a medio/lungo termine, il Catasto delle Strade deve poter essere integrabile con il Catasto dei terreni e fabbricati. "Il Catasto deve obbligatoriamente contenere gli elementi relativi alle caratteristiche geometriche delle strade e delle relative

pertinenze nonché gli impianti ed i servizi permanenti connessi alle esigenze della circolazione.” Tale Decreto impone il rilievo dell’asse stradale come sequenza di punti con una tolleranza di 1 metro nelle coordinate piane dell’asse stesso. Per quanto concerne il profilo longitudinale, la precisione della quota geoidica di tali punti rispetto al riferimento altimetrico nazionale deve essere migliore di 5,0 metri ma la precisione relativa deve essere tale che l’errore massimo nella pendenza sia dello 1%, ovvero deve essere migliore di 10 centimetri se calcolata fra punti distanti meno di 10 metri. L’errore massimo nella determinazione della larghezza della strada va contenuto in 10 cm. Il Decreto lascia la possibilità di utilizzare la cartografia esistente a condizione che tale cartografia sia inquadrata nella rete nazionale e non pone alcun vincolo riguardo alle tecniche da utilizzare per il rilievo diretto, ciò ha determinato lo sviluppo di molte varianti dei Mobile Mapping Systems (M.M.S.).

I M.M.S. sono sistemi multi-sensore che integrano su una singola piattaforma sistemi di navigazione/posizionamento e sistemi di acquisizione dati di varia natura, inizialmente impiegati per “mapping applications” ora vengono utilizzati per molte applicazioni, grazie anche al contemporaneo sviluppo della tecnologia hardware e software degli strumenti per il rilievo.

La struttura di acquisizione dati può essere costituita da molti tipi di sensori:

- camere CCD di accuratezza geometrica dipendente dalla risoluzione del sensore, queste hanno ormai sostituito le camere tradizionali, perchè consentono di saltare il passaggio della digitalizzazione;
- telecamere (B/W, RGB, IR) e camere panoramiche;
- laser scanner (rotanti, a scansione, profilometri, ecc.) impiegati per il rilievo degli oggetti che circondano il mezzo e, nel caso dei M.M.V. per l’analisi della rugosità della superficie stradale;
- radar e sensori ultrasonici;
- altri tipi di sensori legati alla particolare applicazione del mezzo.

I sistemi di posizionamento sono stati introdotti per poter risolvere il problema dell’orientamento esterno delle immagini senza l’uso dei GCPs o procedure block adjustment, ora vengono anche utilizzati per la georeferenziazione di tutti i dati acquisiti e, nel Catasto Strade, per il rilievo dell’asse stradale. Vengono impiegati sistemi GNSS che, per il posizionamento nel caso di rilievo cinematico, forniscono soluzioni di posizioni e velocità piuttosto stabili nel tempo, se l’ambiguità intera è correttamente fissata. Nel corso del rilievo il mezzo in movimento può incontrare ostacoli accidentali o permanenti che impediscono la visibilità dei satelliti, perciò i M.M.S. sono anche dotati, generalmente, di un sensore inerziale che, in queste circostanze nel breve periodo fornisce i valori di posizione e assetto in sostituzione del sistema di posizionamento satellitare. Le misure inerziali sono soggette però ad una deriva nel tempo che porta la soluzione a divergere, tanto che in condizioni di visibilità satellitare il GPS controlla la deriva nella navigazione da parte del sensore inerziale. Tali mezzi sono anche dotati di odometri per la misura delle distanze. Sistemi di sincronizzazione e memorizzazione sono fondamentali vista la notevole massa di dati acquisiti.

Secondo il tipo di applicazione:

- su strada: catasto strade, 3D city models, rilievo e localizzazione infrastrutture;
- su ferrovia: controllo di gallerie, rilievo passaggi a livello, ...;
- da aereo o elicottero: laser scanning, fotogrammetria aerea, rilievi di modesta estensione in zone impervie o inaccessibili;
- a piedi, rilievo urbano: con fotocamera e/o laser range finder + GPS;

tali sistemi vengono applicati su vari tipi di piattaforme (aerei, elicotteri, furgoni, veicoli a due ruote...).

2. Rilievo cinematico di un tratto stradale con ricevitori GPS/GLONASS.

Uno dei punti deboli dei M.M.S. è costituito dagli elevati errori sistematici di sensori quali INS e odometri e dal posizionamento isodeterminato del GPS. Quest’ultimo è tipico del rilievo cinematico e costituisce l’elemento su cui non c’è possibilità di controllo, pur essendo, il dato di posizione da

esso fornito, di fondamentale importanza per gli altri sensori. Questa esperienza si è basata nel rilievo di un tratto di strada di circa 7 Km. con un'antenna disposta al centro del tetto del veicolo in movimento e tre stazioni di riferimento collocate approssimativamente all'inizio, a metà e alla fine del percorso. Il percorso è stato compiuto cinque volte in andata e ritorno. Tutti gli strumenti avevano le stesse caratteristiche: ricevitori Legacy-E_GGD e antenne Legant (Topcon), abilitati all'acquisizione in doppia frequenza dei segnali GPS e GLONASS con campionamento a 10 Hz. L'impiego della costellazione GLONASS è risultata particolarmente utile per aumentare le osservazioni disponibili, visto l'alta probabilità di ostruzioni della volta celeste. Le tre stazioni di riferimento sono state georeferenziate attraverso un calcolo di compensazione con i dati delle stazioni permanenti della rete della Regione Umbria e dell'Università di Perugia (UPG2, REFO e RETO). I dati acquisiti sono stati elaborati con il software Geogenius; per ogni tracciato si sono ottenute tre soluzioni derivanti dall'elaborazione delle osservazioni del rover con ciascuno dei ricevitori fissi. Tutti i tracciati sono stati elaborati con tecniche OTF, in singola base e, tenendo conto della lunghezza delle basi relativamente limitata (al massimo 10 km.), sono state utilizzate esclusivamente le effemeridi trasmesse.

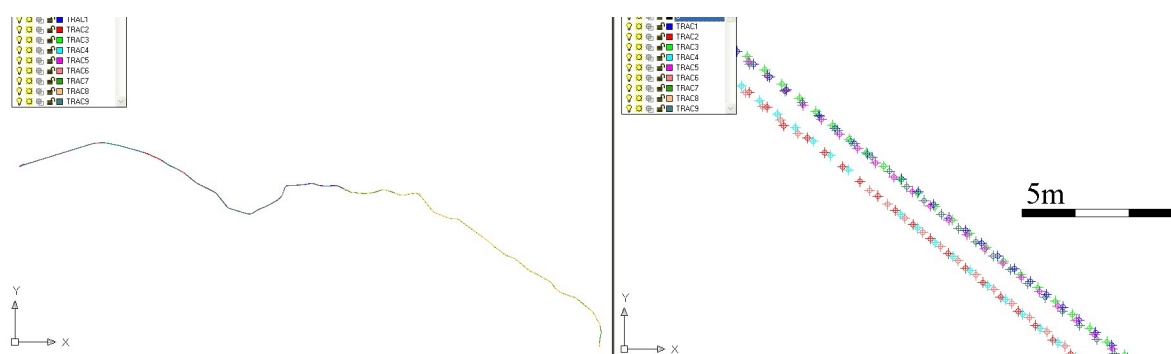


Figura 1 - Totalità dei tracciati rilevati e un particolare del percorso in andata e ritorno.

I valori di ogni parametro (posizione, velocità, PDOP, numero dei satelliti...) determinati da ciascuna delle tre stazioni di riferimento sono stati confrontati sulla base della comune epoca GPS e, vista la grande mole di dati da analizzare (a 10 Hz 3500 epoche circa per ogni stazione e per ogni tracciato), sono state implementate delle procedure che, in via automatica, eseguono una serie di operazioni sui dati ottenuti dalle tre stazioni fisse:

- sincronizzazione delle epoche GPS per le differenti soluzioni;
- esclusione soluzioni di codice;
- controllo degli RMS: esclusione delle soluzioni con RMS superiori ad una fissata soglia (es.: $RMS > 0,2$ m in planimetria e $RMS > 0,3$ m in altimetria);
- eliminazione degli outliers;
- calcolo delle posizioni finali medie e generazione dei report.

E' stata evidenziata peraltro la presenza di outliers in alcune posizioni dopo il verificarsi di cycle slips, probabilmente a causa di una stima OTF non corretta delle ambiguità iniziali di fase: alcune posizioni tendono a *shiftare* e il fenomeno è particolarmente significativo in relazione alla maggiore lunghezza della base.

Partendo dalle posizioni determinate nella fase precedente è stata ricavata la velocità risultante. Si è scelto in questo caso un campionamento a 1 Hz, in quanto più opportuno per tale analisi. Il confronto fra le velocità ricavate dal software di elaborazione attraverso l'effetto Doppler e quelle ricavate derivando le posizioni, opportunamente filtrate nel passaggio precedente, mostrano la maggiore stabilità delle seconde (figura 2). Tale approfondimento è stato compiuto, perché nella progettazione stradale è utile disporre di queste informazioni per comprendere il comportamento di un utente in relazione alla geometria del tracciato.

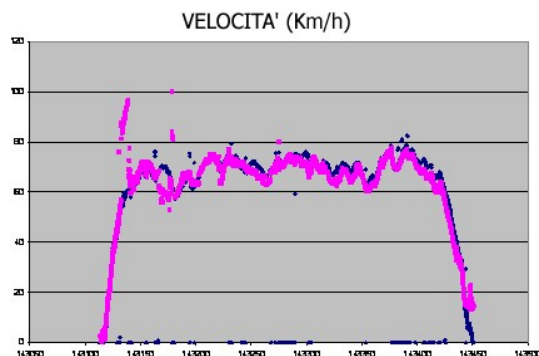


Figura 2 - In blu le velocità derivate dalla posizione e in magenta quelle stimate attraverso effetto doppler per uno dei tracciati in esame

3. Rilievo con M.M.S.

Nella fase successiva di questa esperienza la collaborazione tra il Laboratorio di Topografia e la Società Italeco S.p.a. ha permesso di confrontare due diversi sistemi di posizionamento. Su un furgone è stato collocato un telaio rigido in acciaio appositamente realizzato per ospitare un dispositivo IMU assistito da un sistema GPS, la cui antenna è stata collocata al centro del telaio. Ai quattro vertici di un ipotetico rombo sono state montate altrettante antenne Topcon Legant, tutte collocate alla stessa altezza per mezzo di basette portaprisma. Il telaio è stato realizzato in modo che sull'asse centrale orientato verso la direzione di moto giace l'asse X del sistema IMU e i centri degli alloggiamenti delle antenne anteriore, posteriore e centrale (quest'ultima relativa al sistema IMU), invece sull'asse trasversale, ortogonale al precedente, giacciono le antenne laterali e quella centrale.

I ricevitori Legacy-E_GGD (Topcon) delle quattro antenne Legant sono stati abilitati all'acquisizione in doppia frequenza dei segnali GPS e GLONASS con campionamento massimo a 20 Hz.



Figura 3 - M.M.S.

Il sistema IMU impiegato nell'esperimento è il modello RT3040 dalla Oxford Technical Solution (OXTS), composto da tre accelerometri e tre giroscopi, un sistema GPS doppia frequenza a singola antenna Novatel OEM-4 con correzione differenziale Omnistar HP, computer di navigazione e sistema operativo real-time QNX (le principali caratteristiche tecniche sono riportate nella tabella 1). Un cavo multifunzione permette il collegamento ad un computer remoto, e l'input da un eventuale odometro, di segnali di event input e 1pps. Tramite il software in dotazione, oltre la configurazione ed il post-processamento, è possibile visualizzare in real-time parte dei parametri osservati, che forniscono all'operatore un valido aiuto nel fase del rilievo. Il software fornito con il sistema integrato è in grado di stimare i principali parametri con un campionamento di 100 Hz, le misure derivanti dai due sensori vengono trattate attraverso Filtro di Kalman impiegando un approccio loosely-coupled, in quanto vengono inseriti nella compensazione direttamente i valori di posizione e velocità. Si trat-

ta di un filtro di Kalman esteso (EKF) con vettore di stato a 24 elementi: 3 errori di posizione, 3 errori di velocità, 3 errori negli angoli: heading, pitch e roll, 3 biases per i giroscopi e altrettanti fattori di scala, 3 errori per gli accelerometri, 3 relativi alla posizione dell'antenna e 3 relativi all'orientamento dell'antenna GPS e del veicolo.

Positioning	Omnistar HP	Roll/Pitch	0,03° 1σ
Position accuracy	10cm CEP	Heading	0,1° 1σ (dynamic)
Velocity accuracy	0,07 Km/h RMS	Angular Rate	
Acceleration		bias	0,01°/s 1σ
bias	10 mm/s ² 1σ	scale factor	0,1% 1σ
linearity	0,01%	range	100°/s
range	100 m/s ²	Track (at 50 Km/h)	0,08° RMS
Update rate	100 Hz	Slip Angle(at 50 Km/h)	0,15° RMS

Tabella 1 - con le principali caratteristiche tecniche del sistema RT3040

Considerando l'allestimento del veicolo per la sperimentazione sarebbe più opportuno definirlo P.O.S. (Position and Orientation System), piuttosto che M.M.S., in quanto il mezzo è stato dotato esclusivamente di sistemi GNSS e sistemi integrati GPS/INS.

Si è deciso di rilevare lo stesso tratto stradale della precedente esperienza, in questo caso è stata collocata una sola stazione master approssimativamente a metà del percorso, costituita di ricevitore Legacy-E_GGD (Topcon) e antenna Dorne Margolin D.

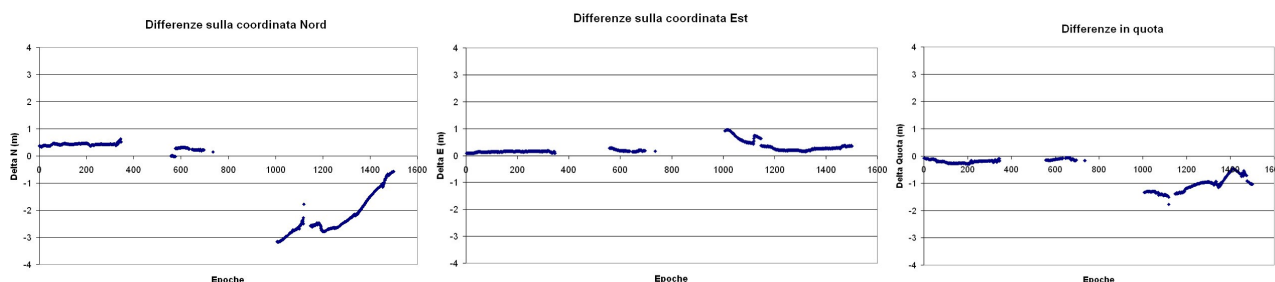


Tabelle 2 - Differenze in metri tra le coordinate ricavate con il sistema IMU-GPS solo nelle epoche in cui ha acquisito le correzioni Omnistar-HP e quelle ottenute dalla post-elaborazione delle osservazioni GPS/GLONASS (le epoche sono con campionamento 10 Hz).

Le osservazioni dei quattro ricevitori sono state elaborate applicando algoritmi OTF, in singola base e con effemeridi trasmesse, data l'esigua lunghezza delle basi. Sono stati applicati filtri analoghi ai precedenti sulle soluzioni di codice, sugli RMS, ma in questo caso, essendo presente una sola stazione fissa, il controllo sulle posizioni ottenute è stato compiuto considerando le distanze reciproche tra le antenne, note a priori e costanti nel tempo.

L'analisi dei dati del sistema IMU RT3040 e i confronti tra le posizioni e gli assetti ottenuti dai due sistemi sono tuttora in corso. In questa prima fase di elaborazione si è potuto notare che l'antenna GPS perde spesso il contatto con il satellite geostazionario EA-SAT da cui riceve le correzioni differenziali OMNISTAR-HP, anche in condizioni di buona visibilità satellitare. In tali situazioni la IMU opera solamente assistita dal GPS con posizionamento di codice e si ottiene una deriva che porta in breve tempo fuori dal range di precisione definito per il Catasto strade. Il confronto eseguito su 1600 epoche a 10Hz di un tracciato dimostra che se il sistema IMU-GPS acquisisce la correzione con continuità si hanno differenze dal GPS/GLONASS differenziale in post-elaborazione al di sotto dei 50 cm. Nel momento in cui si perde il contatto con il satellite Omnistar la sola IMU tende a derivare nel posizionamento, infatti le differenze nel confronto con il GPS/GLONASS aumentano progressivamente. Quando il sistema IMU-GPS riceve di nuovo le correzioni differenziali si ha una diminuzione delle differenze a testimonianza che la deriva dell'IMU viene rapidamente corretta dal GPS (tabelle 2).

Conclusioni

La notevole diffusione dei M.M.S. e la continua ricerca applicata su questi sistemi, accelerata in Italia dalla normativa che impone agli Enti proprietari e/o gestori di strade di dotarsi di un Catasto delle strade, consente l'uso di tali veicoli in numerose applicazioni. In questo caso si è dimostrato che tali mezzi possono costituire un valido aiuto nella progettazione stradale. Il rilievo cinematico può fornire i valori di traiettoria e velocità relativi ad un intero percorso con notevoli precisioni e, scegliendo un intervallo di campionamento al di sotto del secondo, distribuiti con elevata densità; si può quindi simulare il comportamento di un utente medio lungo un intero tratto stradale. Tali informazioni permettono di elaborare analisi statistiche su un data base comprendente diversi test eseguiti da sperimentatori con differenti stili di guida per interpretare la loro risposta alla geometria del tracciato, sono quindi molto più complete di quelle ricavabili ad esempio da stazioni di rilevamento fisse a bordo strada che consentono esclusivamente un rilievo puntuale.

Nella prima fase della sperimentazione, nell'elaborazione di tracciati cinematici, è stato inoltre dimostrato che le stesse soluzioni fixed, a volte, presentano degli outliers non accettabili per le precisioni normalmente raggiungibili, sarebbe quindi sufficiente confrontare le soluzioni derivanti da più stazioni fisse disseminate lungo il percorso per migliorare la precisione del rilievo. Semplici routine possono aiutare la gestione dei dati che sarebbero moltiplicati in misura direttamente proporzionale al numero delle stazioni fisse.

Il limite di questa prima fase è legato alla necessità della continua visibilità con la volta celeste, perciò si è testato anche un sistema IMU assistito dal GPS. E' stato quindi possibile confrontare il tracciato rilevato dal sistema integrato con quello ottenuto dalla post-elaborazione delle sole osservazioni GPS/GLONASS che ha portato a differenze piccole nel caso in cui il sistema IMU-GPS riceva le correzioni OMNISTAR-HP.

Si intende approfondire la conoscenza del sistema IMU analizzando ulteriormente la deriva dello strumento nel caso in cui non sia assistito dal GPS e inoltre si vogliono confrontare gli assetti determinati dal sistema IMU con quelli ottenuti dalle osservazioni GPS/GLONASS, con la consapevolezza che la distanza ridotta tra le stesse antenne e la precisione relativa tra le misure non garantiranno una precisione elevata.

Bibliografia:

- Cazzaniga N. E., Forlani G., Pinto L. (2005), "*Confronto fra misure di assetto con GPS e con giroscopi*", Atti della 9° Conferenza Nazionale ASITA, Catania 2005;
- Cina A., Manzino A. M., Piras M., Roggero M. (2003), "*Modellazione del tracciamento cinematico in post elaborazione*", Atti della 7° Conferenza Nazionale ASITA, Verona 2003;
- Cina A., Manzoni G. (1992), "*GPS cinematico e fotogrammetrico*", bollettino SIFET;
- El-Sheimy Naser (2005), "*An overview of Mobile Mapping Systems*", Acts from "From Pharaohs to Geoinformatics", Cairo 2005;
- Forlani G., Visintini D. (2006), "*I sistemi di rilevamento terrestre MMS: aspetti tecnologici, modelli di orientamento e restituzione, analisi delle precisioni*", relazione presentata al Corso "Tecniche di rilevamento per un catasto stradale in Italia", Udine 2006;
- Marchionna A. (2006), "*Sistemi informativi stradali e Catasto Strade*", relazione presentata al Corso "Tecniche di rilevamento per un catasto stradale in Italia", Udine 2006;
- Vincent Tao C. (1998), "*Mobile Mapping Technology for Road Network Data Acquisition*", Acts from International Symposium of Urban Multimedia/3D Mapping, Tokyo 1998;
- Manuale del sistema IMU-GPS "RT3000 Inertial and GPS Measurement System"