

Studio del sistema di posizionamento GNSS/INS con strumentazione di basso costo

Alberto Croci, Mattia De Agostino, Ambrogio M. Manzino

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino (Italy), Tel. +39 (011) 564.7661/7675, Fax +39 (011) 564.7699
alberto.croci@polito.it, mattia.deagostino@polito.it, ambrogio.manzino@polito.it

Riassunto

La complementarietà tra i sistemi GPS ed INS è ben nota: mentre i primi consentono un posizionamento con un'elevata ripetibilità, ma influenzato dalla presenza di ostacoli che limitano la ricezione del segnale, la navigazione inerziale consente un posizionamento continuo ed indipendente da ostacoli, ma caratterizzato da incertezze crescenti, a causa dell'accumularsi degli errori sistematici ed accidentali. L'integrazione tra i due sistemi permette di ottenere una soluzione al contempo accurata e continua. Inoltre, lo sviluppo dei sensori di tipo MEMS, caratterizzati da costi e dimensioni ridotte, ha permesso di utilizzare questo tipo di posizionamento anche per applicazioni non prettamente di rilievo di precisione. Lo scopo del presente lavoro è quello di ottenere un sistema di posizionamento a bassissimo costo per applicazioni di infomobilità, monitoraggio delle flotte e trasporto di merci pericolose, basato sull'utilizzo di un sensore inerziale non nato per applicazioni di posizionamento, ed un ricevitore GPS da automobile, con un costo finale dei due sensori che, comprensivo dell'ingegnerizzazione, risulta inferiore ai 250 €.

Abstract

The GPS and INS complementarity is well known: while the former allows positioning with high repeatability but it is influenced by obstacles, the inertial navigation allows a continuous and autonomous positioning, but that is characterized by increasing uncertainty, due to the growth of systematic and accidental errors. The integration of these two navigation systems allows an accurate and continuous solution. Furthermore, the development of MEMS sensors, characterized by low costs and small sizes, permits these systems to be used not only for precise navigation applications. The aim of this work is to obtain a very low-cost positioning system for infomobility, fleets and dangerous goods monitoring applications, based on the use of an inertial measurement unit not specifically designed for positioning, and of a car GPS unit. It should be noted that the final cost of the two sensors is lower than 250 euros.

Introduzione

I sistemi di posizionamento satellitare GPS, o più genericamente GNSS (acronimo di *Global Navigation Satellite System*), permettono di ottenere, in modalità *stand-alone*, le coordinate dell'utente con accuratezze metriche e con un'elevata ripetibilità (Pertusini et al., 2009). Queste coordinate risultano però essere fortemente influenzate dalla qualità del segnale GNSS: qualora si operi in viali alberati o canyon urbani, la precisione del posizionamento satellitare può diminuire drasticamente, con il rischio di non fornire addirittura alcun risultato.

Alla luce di quanto visto, nel caso in cui si voglia raggiungere un posizionamento di precisione e che sia nel contempo affidabile in qualsiasi ambiente ci si trovi a lavorare, è necessario integrare il sistema GPS con un sensore che, per caratteristiche, sia il più possibile complementare.

Il posizionamento tramite sensori inerziali (INS, acronimo *Inertial Navigation System*) si presenta come una delle alternative al GPS più utilizzate dal punto di vista navigazionale (El-Sheimy, 2003; Mok et al., 2007; Retscher e Fu, 2009). Tali sensori (generalmente chiamati IMU, acronimo di *Inertial Measurement Unit*) consentono di ottenere un posizionamento continuo ed indipendente dagli ostacoli di tipo ambientale, ma caratterizzato da un'incertezza nella soluzione finale che aumenta con il passare del tempo, a causa dell'accumularsi degli errori sistematici ed accidentali propri degli accelerometri e dei giroscopi.

L'utilizzo integrato dei due sensori consente di utilizzare la soluzione GPS, quando calcolabile, per ridurre gli errori a lungo termine dell'INS. Nello stesso tempo, l'INS è in grado di fornire una soluzione continua ed indipendente nei periodi in cui la soluzione GNSS non sia disponibile.

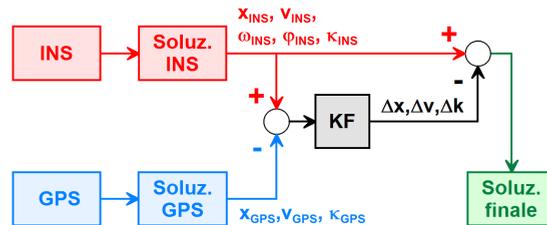


Figura 1 – Schema di integrazione GPS/INS.

Nel presente lavoro si è scelto di utilizzare il metodo di integrazione GPS/INS schematizzato in Figura 1 (De Agostino, 2010), in cui le posizioni calcolate a partire dalle misure GPS (in azzurro) vengono impiegate all'interno di un filtro di Kalman alla stregua di vere e proprie misure, allo scopo di compensare gli errori legati all'uso dei dati inerziali (in rosso).

La soluzione finale (in verde) sarà dunque rappresentata dalla soluzione del sistema inerziale (in rosso) corretta con le stime degli errori (in nero) ottenute nel filtro di Kalman a partire dall'integrazione GPS/INS.

Strumentazione utilizzata

Il sistema di navigazione in progetto si basa sull'utilizzo di sensori di basso costo. In particolare, sono stati utilizzati:

- il ricevitore GPS HAICOM – HI 204III (dal costo di circa 50 €)
- la piattaforma IMU STEVAL–MKI062V1 (dal costo, già ingegnerizzata, di poco inferiore a 200 €)

Oltre al costo contenuto, un'altra caratteristica che rende i due sensori adatti all'applicazione oggetto di studio è la dimensione ridotta, evidenziata in Figura 2, che permette di installarli, ad esempio, sul cruscotto del veicolo.

L'algoritmo di navigazione

L'algoritmo di navigazione si divide in una prima fase di inizializzazione dei sensori a bordo del veicolo, detta allineamento, da eseguirsi a veicolo fermo, ed una seconda fase di navigazione sia in condizioni di moto statico che cinematico.

Per la fase di allineamento si è posta una durata pari a 60 secondi, al fine di raccogliere una quantità sufficiente di misure GPS ed INS, necessarie per stimare (Groves, 2010):

- l'assetto iniziale del mezzo (rollio ω_0 , beccheggio ϕ_0 e sbandamento κ_0) tramite le misure degli accelerometri e dei magnetometri di cui è dotata la piattaforma IMU (cfr. Figure 3 e 4);

- il valore degli errori sistematici (*bias*) degli accelerometri. In Figura 5, ad esempio, è mostrato come, a veicolo fermo, le accelerazioni misurate non siano costanti, ma oscillino intorno ad un valore medio;
- la posizione iniziale del veicolo, ottenuta attraverso una media pesata delle posizioni GPS rispetto al numero di satelliti visibili a ciascuna epoca.



Figura 2 – Strumentazione utilizzata.

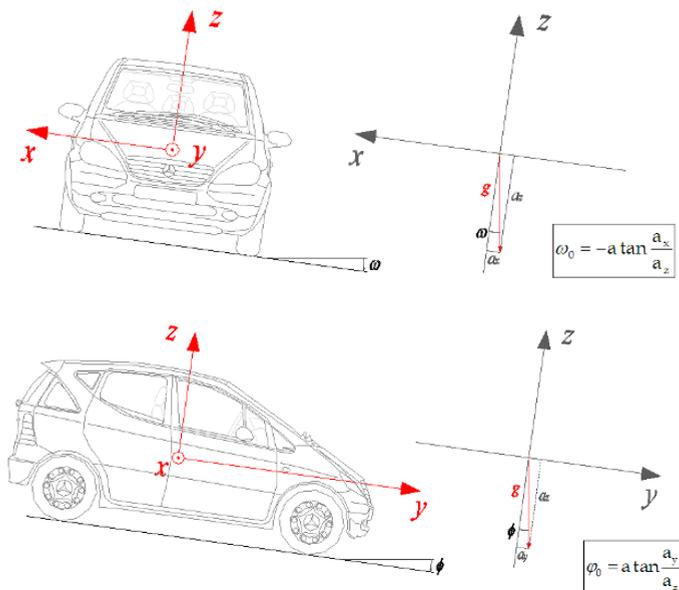


Figura 3 – Calcolo degli angoli ω_0 e ϕ_0 tramite gli accelerometri.

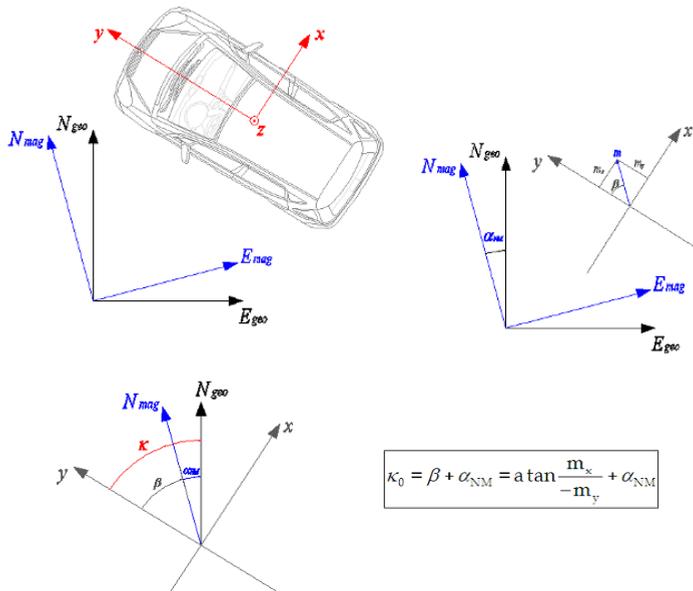


Figura 4 – Calcolo dello sbandamento κ_0 tramite i magnetometri.

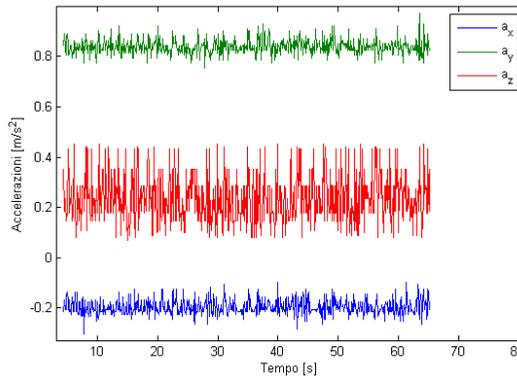


Figura 5 – Accelerazioni misurate durante la fase di allineamento.

Per scelta progettuale si è deciso di non utilizzare le misure provenienti dai giroscopi in quanto, nelle piattaforme IMU di basso costo come quella utilizzata in questa fase, questi sensori sono affetti da basse sensibilità (dell'ordine del deg/s) e da derivate molto elevate, spesso di difficile modellazione (Artese e Trecroci, 2007).

Una ulteriore scelta progettuale riguarda l'imposizione di moto non-olonomico, nell'impossibilità, da parte del veicolo, di muoversi trasversalmente al senso di marcia (El-Sheimy, 2003).

Concluso l'allineamento si procede al calcolo delle posizioni per ogni epoca di misura. Durante questa fase è necessario considerare la differente frequenza di campionamento tra i due sensori utilizzati (1Hz per il GPS e 10 Hz per il sensore INS). A causa di questo differente *rate* di campionamento, l'integrazione dei due sistemi di posizionamento sarà quindi possibile esclusivamente nel caso si abbiano contemporaneamente sia le posizioni GPS che INS. In tutte le altre epoche non comuni (sia quelle comprese fra due misure GPS consecutive, sia in corrispondenza

di un'interruzione del segnale GPS) è comunque possibile calcolare il posizionamento attraverso le sole misure inerziali, ed apportando le opportune correzioni ricavate dalle precedenti epoche comuni.

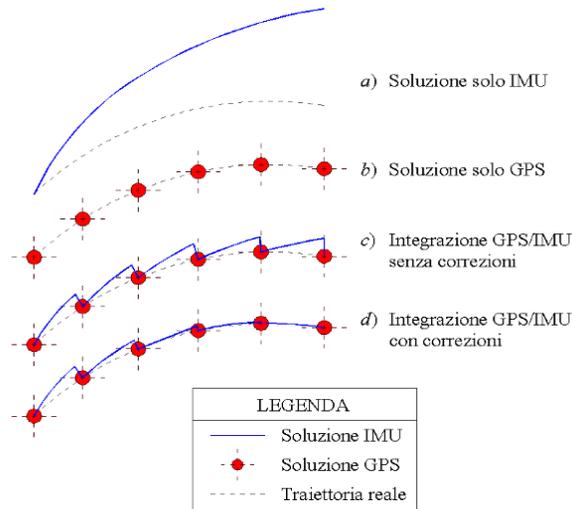


Figura 6 – Confronto fra le soluzioni di navigazione.

La Figura 6 mostra come:

1. l'utilizzo del solo sensore inerziale comporti un posizionamento continuo, ma il cui errore aumenti proporzionalmente al quadrato del tempo;
2. l'impiego di un ricevitore GPS offra una soluzione più accurata ma che potrebbe non essere calcolabile nel caso di perdite di segnale.

L'integrazione dei due strumenti, se interpretata come mero accoppiamento dei sensori, ovvero senza il calcolo dinamico delle correzioni da apportare alla soluzione, potrebbe comportare, nel caso di un lungo periodo di assenza di segnale GPS, gli stessi problemi illustrati al punto 1. Se invece si sceglie di calcolare dinamicamente le correzioni da apportare alla soluzione inerziale, tramite il confronto con quella GPS, il risultato è esattamente quello mostrato dalla Figura 6-d, in cui si apprezza la progressiva riduzione del comportamento comunemente detto "a dente di sega", ovvero della differenza fra la soluzione inerziale e quella GPS (De Agostino, 2009).

La soluzione finale di navigazione

Per verificare il funzionamento del software di posizionamento sono state compiute alcune traiettorie cinematiche nei pressi di Siena, utilizzando la strumentazione descritta in precedenza.

I percorsi scelti sono stati prevalentemente extraurbani, in ambienti privi di ostacoli alla ricezione del segnale GPS. Tale scelta è stata fatta in fase progettuale per poter tarare l'algoritmo di calcolo, e per poter ottenere poi una soluzione di riferimento rispetto alla quale calcolare le derivate in assenza del segnale GPS.

Il risultato del posizionamento sull'intero set di misure ha consentito di calcolare la traiettoria mostrata in Figura 7. Si noti come, in questo caso, la soluzione GPS governi, di fatto, l'andamento del risultato finale.

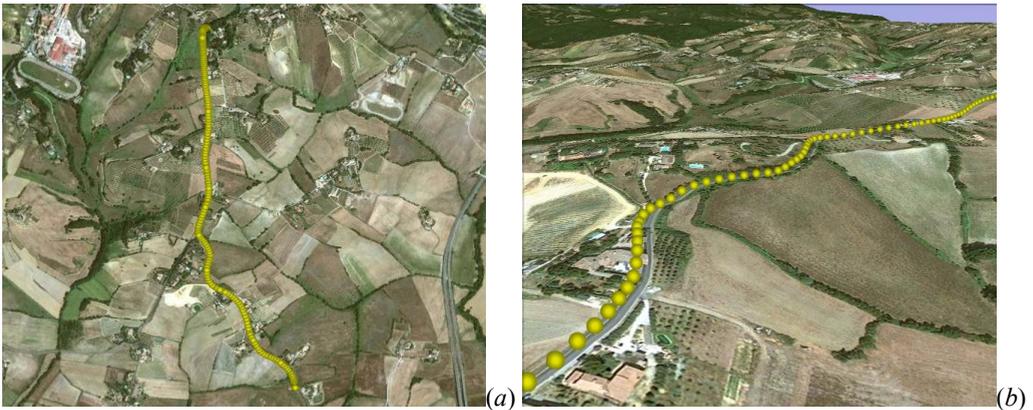


Figura 7 – Andamento planimetrico (a) e vista 3D (b) della soluzione di navigazione su Google Earth™.

L'affidabilità della soluzione GPS

Come già anticipato nei paragrafi precedenti, i problemi sopraggiungono qualora si verificano delle perdite del segnale GPS più o meno lunghe. A questo proposito, è stato condotto un test avente lo scopo di valutare quanto lunghe potessero essere le perdite di segnale GPS in ambito urbano. Si è dunque scelto di testare il ricevitore GPS all'interno di un percorso urbano nel centro storico di Vercelli, procedendo ad una velocità media di circa 50 km/h.

Per avere un'indicazione visiva ed immediata della qualità della soluzione ottenuta, sono state prodotte due immagini nelle quali ciascuna posizione calcolata assume un colore differente (verde, giallo o rosso) in funzione, nel primo caso, del numero di satelliti visibili e, nel secondo caso, della rumorosità del segnale ricevuto.

Il filtraggio relativo al numero di satelliti visibili evidenzia come il ricevitore, durante l'intera sessione di misura durata circa 30 minuti, abbia tracciato con continuità un elevato numero di satelliti, anche nelle zone caratterizzate dalla presenza di ostacoli comunemente fonte di disturbo alla ricezione del segnale GPS (edifici, viali alberati ecc.).

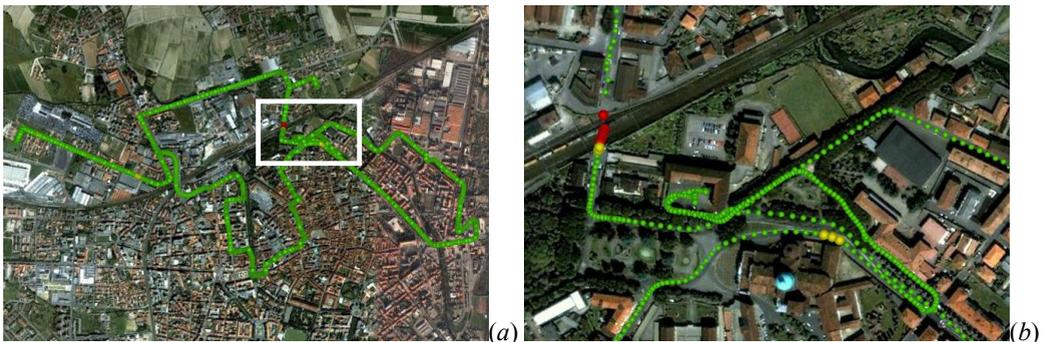


Figura 8 – Numero di satelliti in vista per ogni epoca di misura (a) e relativo ingrandimento (b) (Verde: ≥ 8 ; Giallo: $4 \div 8$; Rosso: < 4).

In particolare, si è riscontrato un solo caso di assenza di segnale, di durata inferiore a 10 s, in corrispondenza del sottopassaggio ferroviario (cfr. Figura 8.b).

I risultati ottenuti dall'analisi del solo numero di satelliti in vista potrebbe far supporre che il posizionamento ottenuto possa essere ritenuto affidabile anche nel centro cittadino ed all'interno dei canyon urbani. Tuttavia, l'analisi relativa alla rumorosità del segnale (cfr. Figura 9) dimostra come, negli ambienti caratterizzati da una limitata visibilità (il centro storico), il posizionamento sia scarsamente affidabile.

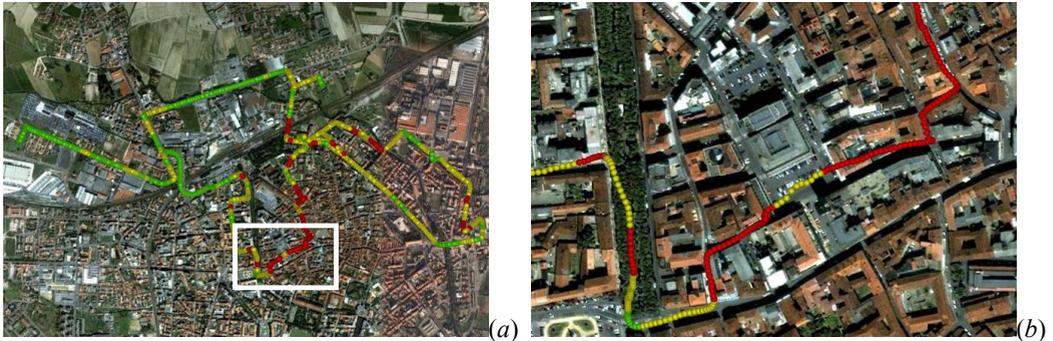


Figura 9 – Rapporto segnale/rumore per ogni epoca di misura (a) e relativo ingrandimento (b)
(Verde: ≥ 40 dB/Hz; Giallo: $35 \div 40$ dB/Hz; Rosso: < 35 dB/Hz).

Quanto appena detto è evidenziato nella Figura 9.b, dove si nota come, in corrispondenza delle epoche con segnale/rumore molto basso, la traiettoria si discosti da quella effettivamente percorsa.

L'affidabilità della soluzione GPS/INS

Quanto premesso nel paragrafo precedente conferma la necessità di affiancare al ricevitore satellitare un sensore inerziale, allo scopo di migliorare la qualità e l'affidabilità del posizionamento per brevi periodi.

Proprio per valutare la stabilità della soluzione in relazione ad interruzioni del segnale satellitare, è stato ripetuto il calcolo del posizionamento, relativo alla traiettoria nei pressi di Siena, simulando delle perdite di segnale di durata variabile (pari a 10, 20, 30 e 60 secondi).

Tali simulazioni hanno permesso di ricavare empiricamente la relazione fra l'errore planimetrico commesso ed il periodo di assenza del segnale (De Agostino e Porporato, 2008). Come si può notare dalla Figura 10 tale curva ha il classico andamento parabolico dovuto alla doppia integrazione nel tempo del *bias* degli accelerometri.

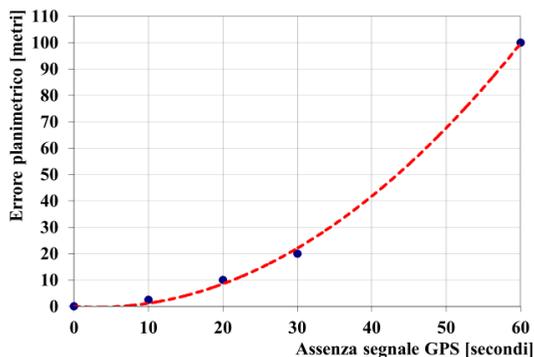


Figura 10 – Curva di errore.

La Figura 10 mostra come vi sia un errore molto elevato in corrispondenza di una perdita di segnale di 60 s. Tale durata risulta tuttavia incompatibile con le applicazioni di infomobilità per le quali è stato sviluppato tale algoritmo.

Le Figure 11.a e 11.b mostrano la traiettoria calcolata in corrispondenza di un'interruzione del segnale GPS di 10 e 30 secondi rispettivamente.

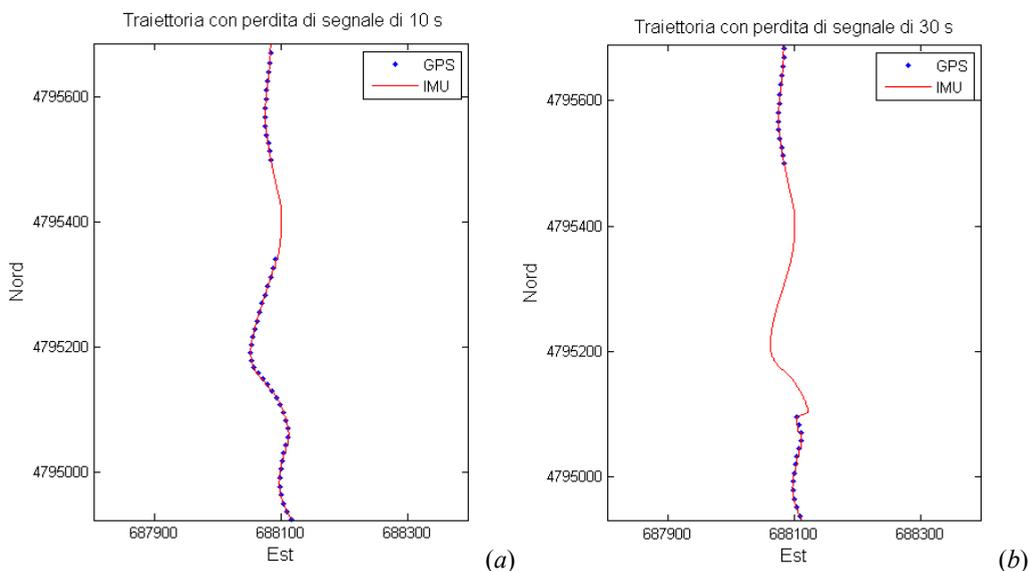


Figura 11 – Soluzione con cycle slip simulati di durata 10 (a) e 30 (b) secondi.

Conclusioni

L'algoritmo di posizionamento studiato, basato sul metodo *loosely-coupled*, e le prove di navigazione eseguite hanno permesso di valutare l'effettiva potenzialità derivante dall'integrazione di sensori GNSS/INS di bassissimo costo per scopi di infomobilità.

L'analisi dell'errore ottenuto con i *cycle slip* simulati ha consentito di evidenziare la possibilità di mantenere le precisioni metriche, caratteristiche del ricevitore GPS in dotazione, anche in presenza di perdite di segnale GNSS di durata pari a 10-15 secondi. Si sono inoltre ottenute, anche per perdite di segnale di durata superiore ai 20 secondi, accuratizie comunque compatibili con le applicazioni ipotizzate. È inoltre importante sottolineare come dai test svolti in ambiente urbano si sia evidenziato come la maggior parte dei *cycle slip* effettivamente registrati abbia una durata non superiore ai 10 secondi.

Bibliografia

- Artese G., Trecroci A. (2007), "Sistemi INS/GPS a basso costo per la realizzazione di un sistema di navigazione integrato", *Atti 11^a Conferenza Nazionale ASITA*, Torino, 6-9 Novembre 2007.
- De Agostino M. (2010), *I sensori inerziali di basso costo per la navigazione geodetica*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino.
- De Agostino M. (2009), "Performance of Different Low-cost GNSS/INS Land Systems", *ION GNSS Proceedings*, Savannah (GA – USA), 22-25 Settembre 2009.

- De Agostino M., Porporato C. (2008), "Development of an Italian Low Cost GNSS/INS Universally Suitable System for Mobile Mapping", *IEEE/ION Position, Location And Navigation Symposium Proceedings*, Monterey (CA – USA), 5-8 Maggio 2008.
- El-Sheimy N. (2003), *Inertial Techniques and INS/DGPS Integration*, Dispense, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- Groves P. (2008), *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Artech House, Boston.
- Retscher G., Fu Q. (2009), "An intelligent personal navigator integrating GNSS, rfid and INS for continuous position determination", *6th International Symposium on Mobile Mapping Technology Proceedings*, Presidente Prudente (Brasile), 21-24 Luglio 2009.
- Mok E., Retscher G., Xia L. (2007), "MRErA (minimum Range Error Algorithm): RFID - GNSS Integration for Vehicle Navigation in Urban Canyons", *5th International Symposium on Mobile Mapping Technology Proceedings*, Padova, 28-31 Maggio 2007 .
- Pertusini L., Realini E., Reguzzoni M. (2009), "Utilizzo del software goGPS per la navigazione di precisione con ricevitori a basso costo", *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA*, Bari, 1-4 Dicembre 2007.