

Sviluppo ed analisi di differenti algoritmi di integrazione di sensori GNSS/INS di basso costo per la navigazione terrestre

Mattia De Agostino, Ambrogio M. Manzino, Marco Piras

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
(mattia.deagostino/ambrogio.manzino/marco.piras)@polito.it

Riassunto

Il presente lavoro si propone di studiare gli algoritmi di integrazione di sensori GNSS/INS di basso costo e le loro effettive prestazioni in ambito urbano. Una prima parte del lavoro è pertanto finalizzata allo studio di diverse procedure di integrazione basate sull'impiego congiunto del filtro di Kalman, appositamente tarato per l'impiego di dati GNSS ed INS derivati da sensori a basso costo, di un lisciamento "retro-propagato" appositamente ideato, e sul possibile uso delle informazioni derivanti dall'impiego di una o tre antenne GNSS integrate a un INS. La seconda parte invece presenta i risultati ottenuti dal confronto dei diversi metodi applicati a *cycle slip* simulati di diversa durata.

Abstract

The work aims to study the low-cost GNSS/INS integration algorithms and their performance in urban environments. The first part of the paper is concerning on the study studying different integration algorithms based on the use of the Kalman filter, specially calibrated for the use of GNSS and INS data deriving by low cost sensors, a Back-Propagated Kalman Smoother and the use of information from one or three GNSS antennas. The second part of the paper shows the results obtained comparing the trajectories during cycle slip simulations of different lengths.

Introduzione

I sistemi di navigazione hanno conosciuto negli ultimi anni una grande diffusione, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni aeree, marine e terrestri. Nella maggior parte dei casi, il calcolo dell'esatta posizione e dell'assetto del mezzo è reso possibile dall'integrazione di uno o più ricevitori GNSS (*Global Navigation Satellite System*) con un sistema di navigazione inerziale INS (*Inertial Navigation System*), eventualmente coadiuvato con odometri o altri sensori.

In particolare, esistono sistemi di navigazione terrestre (MMV, *Mobile Mapping Vehicles*) ed aerea (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) che sono basati sull'impiego di strumenti di basso costo, quali ad esempio i sensori inerziali micro-elettro-meccanici (MEMS - *Micro-Electro-Mechanical Sensors*). La realizzazione di tali sistemi richiede la risoluzione di una serie di problemi, sia teorici che pratici, legati all'impiego di strumentazione di basso costo, come ad esempio la sincronizzazione tra i diversi sensori e la calibrazione degli stessi (Piras et al., 2008). Se però tali problemi possono essere risolti mediante lo sviluppo di appositi strumenti *hardware* e *software*, i problemi legati al posizionamento integrato con strumenti di basso costo rimane di difficile soluzione. Infatti, a causa degli errori sistematici (*bias*) e delle derivate (*drift*) elevati, i sensori inerziali di tipo MEMS sono difficilmente utilizzabili per scopi di posizionamento di precisione.

Occorre allora studiare nel modo più completo possibile tali sorgenti di errore, sia a veicolo fermo che in moto, in maniera da ottenere una soluzione di navigazione affidabile anche durante i periodi di assenza del segnale GNSS. Per tale motivo, l'impiego di un sistema GNSS multi-antenna,

l'inserimento di equazioni di vincolo (ad esempio, le mutue distanze tra le antenne) ed il calcolo delle velocità del veicolo mediante le osservabili Doppler o TDCP (*Time Difference Carrier Phase*), rappresentano senza dubbio un valido aiuto per rendere più robusto il sistema di navigazione.

Il presente lavoro si propone di studiare le effettive prestazioni che possono avere le integrazioni di sensori di differente qualità, attraverso lo studio di diverse procedure di integrazione GNSS/INS *loosely-coupled* e *tightly-coupled* (Cina et al., 2009) basate sull'impiego congiunto del filtro di Kalman, appositamente tarato per l'impiego di sensori GNSS ed INS a basso costo e sull'impiego delle informazioni aggiuntive provenienti da una o tre antenne GNSS. Nell'articolo si considererà già risolto il problema relativo al passaggio dalle accelerazioni e dalle velocità angolari misurate dal sensore inerziale agli stati della navigazione (ovvero posizione, velocità ed assetto del corpo) mediante quelle che in letteratura vengono indicate come le *equazioni di meccanizzazione* di un sistema inerziale. Per ulteriori dettagli su queste equazioni si rimanda ai testi in letteratura, come ad esempio (Titterton and Weston, 2004), (Groves, 2008) e (De Agostino, 2009).

Integrazioni GNSS/INS *loosely-coupled*

La tipologia di integrazione GNSS/INS più comune e diffusa è senza dubbio quella *loosely-coupled* (integrazione "lasca"), che consente di calcolare la stima degli stati di navigazione a partire dalle soluzioni dei due sistemi GNSS ed INS, considerati indipendenti.

Lo schema riportato in

Figura 1.(a) mostra come sia possibile ottenere, semplicemente integrando INS ed una antenna GNSS, informazioni ausiliarie sull'assetto del veicolo. Infatti l'angolo di imbardata del mezzo può essere calcolato come:

$$k_{GNSS} = -\arctan \frac{v_E}{v_N} \quad [1]$$

dove con v_E e con v_N si sono indicate le velocità planimetriche lungo Est e lungo Nord nel *navigation-frame*, calcolate a partire dalle informazioni contenute all'interno del segnale Doppler o dalle differenze di fase GNSS.

Mediante l'impiego congiunto di almeno tre antenne GNSS è invece possibile ricavare, oltre alle posizioni ed alle velocità del veicolo, anche il suo assetto completo. Questo è possibile o all'interno del processamento GNSS mediante differenze doppie tra le osservabili di due dei tre ricevitori rispetto ad uno assunto come riferimento (Lu, 1995) o, in analogia con l'architettura *loosely-coupled*, direttamente a partire dalle tre soluzioni GNSS.

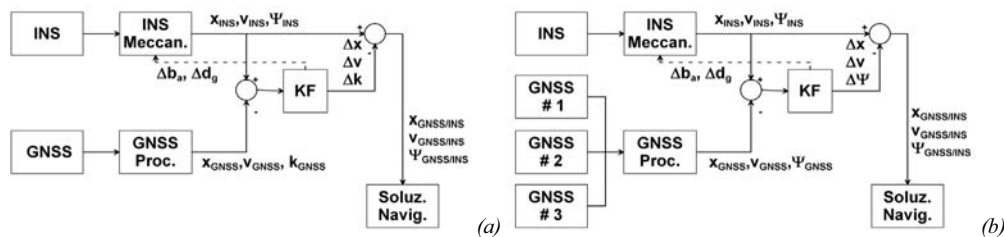


Figura 1 - Schemi di integrazione *loosely-coupled* tra INS ed una (a) o tre (b) antenne GNSS

In entrambi i casi, come riportato nella

Figura 1, la stima degli stati viene compiuta ogni qual volta le epoche INS siano coincidenti con quelle GNSS, mediante l'applicazione di un filtro di Kalman.

Nel presente lavoro, l'algoritmo di tipo *loosely-coupled* è realizzato mediante un filtro di Kalman a 15 stati, comprensivo dell'errore contenuto all'interno della variazione di ciascuno stato della

navigazione (posizione, velocità ed assetto del veicolo), oltre che delle variazioni di bias degli accelerometri e dei giroscopi.

Indicando con ogni elemento un vettore o una matrice tridimensionale, si ha che:

$$x_{kal} = [\Delta \dot{x} \quad \Delta \dot{v} \quad \Delta \dot{\Psi} \quad \Delta \dot{b}_a \quad \Delta \dot{b}_g]^T \quad [2]$$

Per quanto concerne la descrizione completa dell'algoritmo di integrazione *loosely-coupled*, si rimanda a (De Agostino, 2009) e a (Cina et al., 2009).

Integrazioni GNSS/INS *tightly-coupled*

L'approccio di integrazione *tightly-coupled* (integrazione "stretta") permette di ottenere la soluzione degli stati di navigazione a partire dalle osservabili GNSS (codici e fasi), e non dalla posizione GNSS. Tale approccio, di recente diffusione in ambito geodetico, presenta degli indubbi vantaggi soprattutto in presenza di ambienti che possono disturbare la ricezione del segnale satellitare, come ad esempio viali alberati ed *urban-canyons*. Infatti, un approccio di tipo *tightly-coupled* consente di calcolare una correzione alla soluzione inerziale anche quando vengano tracciati meno di quattro satelliti GNSS. In aggiunta, la possibilità di lavorare direttamente con le osservabili del sistema consente l'inserimento di ulteriori variabili, come ad esempio il ritardo di propagazione del segnale GNSS, gli errori degli accelerometri e dei giroscopi, ecc.

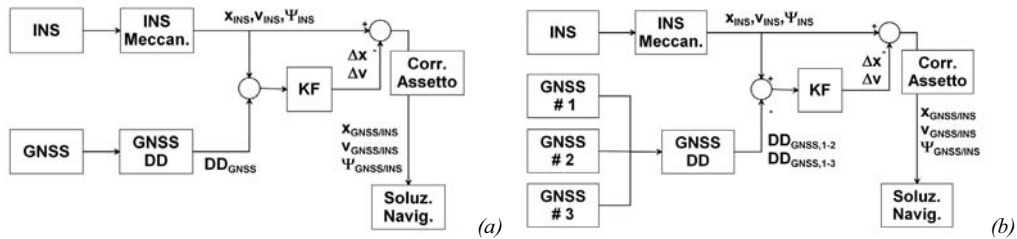


Figura 2 - Schemi di integrazione *tightly-coupled* tra INS ed una (a) o tre (b) antenne GNSS

La Figura 2.(a) mostra l'integrazione tra una singola antenna GNSS ed un sensore inerziale. Questa integrazione avviene combinando le differenze doppie dei codici, eventualmente lisciati utilizzando le fasi, e quelle calcolate utilizzando le fasi, insieme agli stati (posizioni e velocità del mezzo) calcolati a partire dalle misure inerziali. Così come avviene negli algoritmi *loosely-coupled*, anche in questo caso la correzione avviene ogni qual volta le epoche INS siano coincidenti con quelle GNSS, mediante l'applicazione di un filtro di Kalman.

In particolare, l'integrazione tra le misure GNSS e quelle INS avviene costruendo, per ciascun satellite in vista, uno "*pseudorange* predetto" a partire dalla posizione del satellite (nota dalle effemeridi GNSS) e dalla posizione del veicolo calcolata a partire dalle sole misure inerziali. Il vettore di stato del filtro di Kalman sarà pertanto composto dagli errori sulla posizione del mezzo (espressi in un sistema ECEF) e dalle ambiguità di fase di ciascun satellite tracciato:

$$x_{kal} = [\Delta X_{rov} \quad N]^T \quad [3]$$

Un sistema più completo può essere realizzato integrando tre antenne GNSS e un sensore inerziale. In questo caso, lo schema di integrazione viene modificato in maniera da poter considerare tutte le osservabili a disposizione. A partire da tre antenne GNSS, infatti, possono essere scritte le differenze doppie tra le osservabili, oltre alle equazioni delle mutue distanze tra le antenne, in maniera da rendere più robusto il sistema navigazionale (cfr. Figura 2.(b)).

In questo caso, l'algoritmo *tightly-coupled* è realizzato considerando un vettore di stato contenente le correzioni alle posizioni delle tre antenne (denominate A, B e C), oltre alle ambiguità di fase per ciascun ricevitore.

Indicando in grassetto i vettori a tre dimensioni, si ha:

$$x_{kal} \quad \% \Delta X_A \quad \Delta X_B \quad \Delta X_C \quad N_A \quad N_B \quad N_C \quad \# \quad [4]$$

Per quanto concerne la descrizione completa degli algoritmi di integrazione *tightly-coupled*, si rimanda anche in questo caso a (Cina et al., 2009).

Studio della lunghezza dei *cycle slip* in un ambiente urbano

Con lo scopo di valutare quale sia, statisticamente, la durata media dei *cycle slip*, e di conseguenza quale possa essere l'affidabilità delle integrazioni di sensori GNSS ed INS, è stato effettuato un rilievo cinematico in ambiente urbano all'interno della città di Vercelli. Durante tale test, effettuato guidando ad una velocità di circa 50 km/h per circa 40 minuti, si sono verificati 49 perdite di segnale, dovute alla presenza di ostacoli (edifici, viali alberati, ...) che hanno disturbato la corretta ricezione del segnale GNSS.



Figura 3 – Traiettorie (a) ed esempio di ostacolo alla ricezione del segnale satellitare (b) del test in ambiente urbano

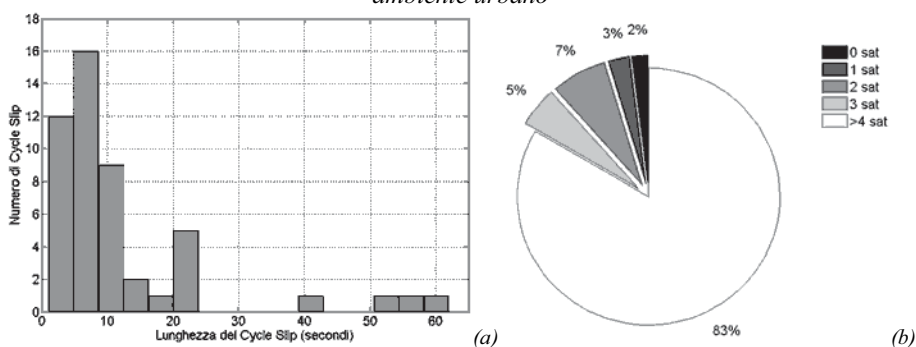


Figura 4 – Durata dei *cycle slip* (a) e numero di satelliti tracciati ogni epoca (b) durante il test

L'analisi della durata dei *cycle slip*, intesi in questo caso come la durata delle epoche in cui non è presente una soluzione GNSS, è sintetizzata nel diagramma a barre riportato in

Figura 4.(a), mostra come circa il 90% delle perdite di segnale in ambiente urbano abbia una durata inferiore ai 20-25 secondi. È pertanto ragionevole, al fine di ottenere una stima dell'errore che si può commettere nelle comuni applicazioni di navigazione terrestre, considerare l'andamento dell'errore nella posizione nei primi 30 secondi di assenza del segnale satellitare.

In aggiunta, se si considera il diagramma a torta riportato in Figura 4.(b), che riporta il numero di satelliti tracciati ogni epoca durante l'intero test cinematico, è possibile trarre un'altra importante conclusione. Come si può osservare, infatti, nell'83% delle epoche sono stati tracciati almeno i 4 satelliti necessari per il posizionamento GNSS. Oltre a questo, in un altro 12% dei casi, pur non

essendo disponibile una soluzione navigazionale, è comunque possibile tracciare almeno due satelliti. Questo numero di satelliti rappresenta, come detto, un valido aiuto all'interno delle integrazioni GNSS/INS di tipo *tightly-coupled*, soprattutto per la compensazione delle derivate del sensore inerziale.

Studio sull'affidabilità degli algoritmi di integrazione realizzati

Alla luce dei risultati ottenuti nel test urbano riportato al paragrafo precedente, e con lo scopo di valutare l'affidabilità pratica degli algoritmi di posizionamento GNSS/INS di basso costo presentati, sono stati effettuati alcuni test cinematici, impiegando il veicolo a basso costo LCMMS (*Low Cost Mobile Mapping System*) progettato e realizzato dal gruppo di ricerca del DITAG del Politecnico di Torino con la finalità di ridurre in maniera sensibile i costi, notoriamente elevati, di realizzazione e manutenzione dei MMS (Bendea et al. 2008). Tali test sono stati eseguiti alcuni test in ambiente extra-urbano in condizioni di ottima visibilità del segnale GNSS, ed impiegando tre ricevitori di tipo geodetico Leica 1200 ed un sensore inerziale Crossbow IMU 700-CA, composto da accelerometri di tipo MEMS. L'impiego di ricevitori GNSS di tipo geodetico e l'assenza di ostacoli alla ricezione del segnale GNSS è finalizzato alla necessità di avere a disposizione, oltre che un set di dati per i test di affidabilità, anche una traiettoria di riferimento rispetto alla quale valutare l'errore di posizionamento.

Dal punto di vista operativo, all'interno della soluzione GNSS sono stati introdotti dei *cycle slip* simulati, di durata differente. La traiettoria percorsa è stata inizialmente analizzata in maniera da individuare un numero sufficiente di epoche di misura (circa 200-300 secondi) in cui il segnale ricevuto fosse privo di *outages*: in tale intervallo sono stati generati *cycle slip* di lunghezza rispettivamente pari a 5, 10, 15, 20 e 30 secondi. La soluzione integrata GNSS/INS è stata poi calcolata per ciascuno dei set di dati generati, sia con l'algoritmo *loosely-coupled* sia con quello *tightly-coupled*. I risultati ottenuti sono stati infine confrontati con la soluzione di riferimento, ottenuta a seguito dell'applicazione dell'integrazione GNSS/INS ai dati dei tre ricevitori geodetici con campionamento a 5 Hz, senza interruzioni di segnale, soluzione che consente di ottenere una ottima rappresentazione dell'effettiva dinamica del veicolo.

Di seguito si riportano (Figura 5) le curve relative all'andamento dell'errore tridimensionale in funzione della durata dei *cycle slip* simulati, relative alle architetture *loosely-coupled* ad una e a tre antenne, sia per la soluzione ottenuta con il filtro di Kalman sia per quella ottenuta applicando un liscio della soluzione, denominato "*Back-Propagation Smoother*" (in seguito *BP Smoother*), di nuova concezione e sviluppato appositamente da uno degli Autori (De Agostino, 2009). La linea spessa indica in tutti i casi l'errore medio lungo il periodo di assenza di segnale GNSS, mentre le due linee tratteggiate evidenziano la deviazione standard della soluzione nello stesso periodo.

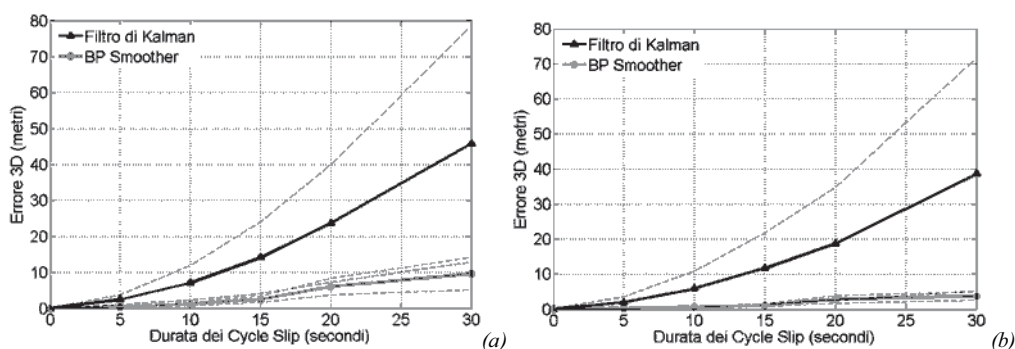


Figura 5 – Andamento dell'errore tridimensionale in funzione della durata dei cycle slip per il caso *loosely-coupled* ad 1 antenna (a) e a 3 antenne (b)

L'analisi delle curve di errore in funzione della lunghezza dei *cycle slip* evidenzia un comportamento molto simile; infatti, in entrambi i casi si ha un incremento parabolico dell'errore con il crescere della durata del periodo di assenza del segnale GNSS. Tale andamento è giustificabile con l'accumulo di errori non compensati sulle accelerazioni (tipicamente, *bias* del sensore) che si propagano sul calcolo delle posizioni. L'andamento mostrato nei grafici mostra, per la soluzione ottenuta con il *BP Smoother*, un notevole riduzione della componente di errore (tipicamente a circa il 10% del valore ottenibile con il filtro di Kalman) e soprattutto della dispersione dell'errore stesso. L'impiego di tre antenne GNSS e degli assetti derivati, consente inoltre una soluzione più robusta, ed una conseguente diminuzione dell'errore tridimensionale, soprattutto per *cycle slip* di lunga durata (> 20 secondi).

Conclusioni

Gli algoritmi di integrazione studiati ed i test eseguiti hanno permesso di valutare l'effettiva potenzialità che, al giorno d'oggi, può avere l'integrazione di sensori GNSS/INS di basso costo. Tali potenzialità sono ottenibili mediante lo sviluppo di algoritmi di calcolo appositi, come ad esempio le procedure di integrazione *loosely* e *tightly* presentate nella prima parte del lavoro, oltre all'impiego di algoritmi di lisciamento di nuova concezione (De Agostino, 2009).

Il test compiuto in ambiente urbano ha permesso di studiare come la maggior parte dei *cycle slip* abbia una durata non superiore ai 20-25 secondi. L'analisi dell'errore ottenuto in corrispondenza di *cycle slip* simulati ha consentito di evidenziare la possibilità di raggiungere, anche con strumentazioni di basso costo, accuratissime sub-metriche nel posizionamento per i primi 10-15 secondi di assenza del segnale GNSS, ed accuratissime di alcuni metri anche oltre i 30 secondi dalla perdita del segnale.

Riferimenti bibliografici

- Bendea H.I., Cina A., De Agostino M., Lingua A., Piras M. (2008), "Realizzazione di un GIS stradale con un veicolo rilevatore basso costo", *Atti della 12a Conferenza Nazionale ASITA*, L'Aquila, pp. 371-374, Vol. I.
- Cina A., De Agostino M., Piras M. (2009), "A Full-state Low-cost GNSS/INS System for Mobile Mapping Applications", *Proceedings of the 6th Symposium on Mobile Mapping Technologies*, Presidente Prudente, BRA.
- De Agostino M. (2009), "Performance of different low-cost GNSS/IMU Land Systems", *ION GNSS 2009 proceedings*, Savannah, GA, USA.
- Groves, P. (2008), *Principles of GNSS, Inertial and Multisensor Integrated Navigation System*, Artech House, London.
- Lu G. (1995), *Development of a GPS multi-antenna system for attitude determination*, Tesi di Dottorato, Department Of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, Canada.
- Piras M., Cina A., Lingua A. (2008), "Low cost mobile mapping system: an Italian experience" *PLANS 2008 proceedings*, Monterey, CA, USA.
- Titterton D., Weston J. (2004), *Strapdown Inertial Navigation Technology*, The American Institute of Aeronautics and Astronautics.