

Problemi e soluzioni legati all'impiego di sensori GNSS ed INS di basso costo per la navigazione geodetica

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 articolo si propone di riassumere i risultati ottenuti negli ultimi anni dagli Autori nel campo della navigazione geodetica con sensori GNSS ed INS di basso costo, con particolare attenzione all'analisi e alla compensazione degli errori sistematici ed accidentali che affliggono le misure, oltre che alla qualità della soluzione finale. Lo sviluppo di appositi software per la calibrazione ed il posizionamento ha consentito, attraverso sessioni di misura sia statiche sia cinematiche, di ottenere una soluzione di navigazione ininterrotta, con accuratezze sub-metriche anche all'interno di ambienti (canyon urbani, viali alberati) in cui il segnale GNSS risulta essere parzialmente ostruito.

Abstract

The results obtained in recent years by the authors in the geodetic navigation with low cost GNSS and INS sensors are in this article summarized. Particular attention was dedicated to the analysis and the compensation of systematic and accidental errors affecting the measurements, as well as the quality of the final solution. The development of specific software devoted to sensor calibration and positioning, through both static and kinematics measurements, allows to obtain a continuous navigation solution, with sub-metric accuracies even within environments (urban canyons, tree-lined streets) in where GNSS signal is partially covered.

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, tali sistemi impiegano, oltre che uno o più ricevitori GNSS (*Global Navigation Satellite System*), anche un sistema di navigazione inerziale INS (*Inertial Navigation System*), necessario per fornire le informazioni di assetto del mezzo ad ogni epoca, e per coadiuvare il sistema GNSS nel calcolo della posizione del mezzo, soprattutto quando questo si trova ad operare in ambienti disturbati, ove la ricezione del segnale satellitare risulta essere difficoltosa (es. canyon urbani).

Nell'ultimo decennio, accanto alle soluzioni commerciali più tradizionali, caratterizzate da costi di acquisto e di gestione particolarmente elevati (>30k€), hanno fatto la loro comparsa anche sensori inerziali micro-elettro-meccanici (MEMS - *Micro-Electro-Mechanical Sensors*) e ricevitori GNSS singola frequenza, entrambi di categoria "low cost" (<3k€) che hanno incrementato l'interesse e la curiosità degli utenti *mass market* verso l'utilizzo di tali sistemi di navigazione. L'impiego di questi sensori richiede tuttavia la risoluzione di una serie di problemi, sia teorici che pratici, legati ad esempio alla loro sincronizzazione e calibrazione. In genere, tali problemi possono essere risolti mediante lo sviluppo di appositi strumenti *hardware* e *software*, in cui gli errori sistematici (*bias*) e le derivate (*drift*) dei sensori vengono analizzati e compensati, con l'obiettivo finale di ottenere una soluzione navigazionale sufficientemente accurata, anche in relazione al tipo di applicazione in cui i

sensori sono impiegati. Il presente articolo si propone di riassumere i risultati ottenuti negli ultimi anni dagli Autori nel campo della navigazione geodetica, con particolare attenzione all'analisi e alla compensazione degli errori sistematici ed accidentali (incertezze di misura) che affliggono le misure inerziali, oltre che alla qualità della soluzione finale di navigazione ottenuta impiegando sensori GNSS e INS di basso costo.

Analisi delle incertezze di misura

Un'unità di misura inerziale IMU (*Inertial Measurement Unit*) è composta da un insieme di sensori, generalmente accelerometri e giroscopi, necessari per consentire la stima di tutti gli stati della navigazione ad una elevata frequenza temporale. Trattandosi di sensori di natura elettro-meccanica, le misure effettuate risultano affette da errori di tipo sistematico (*bias* di misura, fattori di scala o non ortogonalità delle terne di sensori) ed accidentale (disturbi e rumori). Tali incertezze di misura risultano essere particolarmente elevate nei sensori inerziali *MEMS*. Per sfruttare appieno le potenzialità di tali tipologie di sensori, è pertanto necessario sottoporre gli stessi a diverse procedure di calibrazione e di filtraggio, con lo scopo di valutare e modellare i diversi tipi di errori e il loro andamento nel tempo.

A tale fine, gli Autori nel corso di questi anni hanno incentrato parte delle loro attività nello sviluppo di metodi di calibrazione e di filtraggio, modificati, e talvolta sviluppati *ex-novo*, a partire da quelli reperibili dalla letteratura internazionale, in maniera da essere impiegati per la compensazione di tali errori. Tali metodi sono già stati descritti in precedenti lavori (crf. De Agostino, 2010) e pertanto non verranno analizzati in questa sede. Si riporta tuttavia, a titolo di esempio, una tabella riassuntiva contenente i valori di *bias* (e le relative deviazioni standard) e di *random walk* (RW nella Tabella) ottenuti per un sensore Crossbow IMU 400CC, scelto in quanto rappresentativo della fascia di sensori *MEMS* di basso costo. I risultati ottenuti mostrano una certa uniformità nei valori sistematici ed accidentali, in linea con quanto prevedibile per il tipo di sensore considerato. Con lo scopo di verificare la ripetibilità dei *bias* ricavati, la prova di calibrazione è stata ripetuta in tre giorni differenti. L'analisi dei risultati ottenuti, sintetizzata in Figura 1, mette in luce l'influenza, per sensori di basso costo, della componente accidentale del bias.

Tabella 1: *Bias e s.q.m. per gli accelerometri del sensore Crossbow IMU 400CC*

	Accelerometri	Giroscopi		Accelerometri	Giroscopi
Bias X	1.6 mg ($\pm 20 \mu\text{g}$)	-0.34 °/s ($\pm 2 \text{°/hr}$)	RW X	620.33 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.338 deg/ $\sqrt{\text{hr}}$
Bias Y	0.9 mg ($\pm 10 \mu\text{g}$)	0.07 °/s ($\pm 2 \text{°/hr}$)	RW Y	542.16 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.306 deg/ $\sqrt{\text{hr}}$
Bias Z	1.5 mg ($\pm 30 \mu\text{g}$)	0.10 °/s ($\pm 2 \text{°/hr}$)	RW Z	667.66 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.347 deg/ $\sqrt{\text{hr}}$

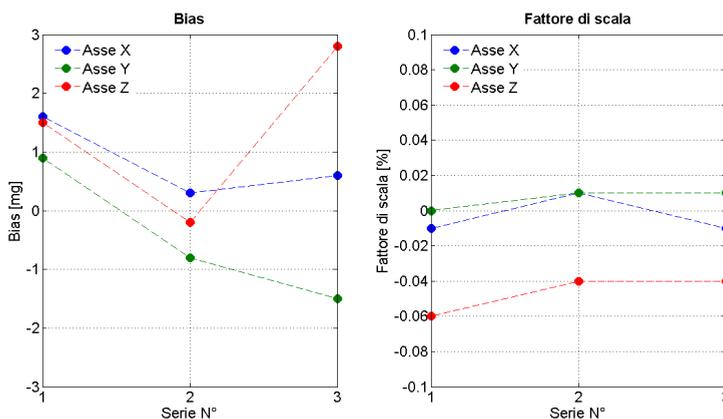


Figura 1 – Ripetibilità dei bias e dei fattori di scala degli accelerometri.

Integrazione GNSS/INS

In generale, le architetture di integrazione GNSS/INS possono essere classificate in tre tipologie: *loosely-coupled*, *tightly-coupled* e *deeply-coupled*. Gli Autori, in particolare, hanno concentrato il loro interesse allo sviluppo di algoritmi di posizionamento basati sulle prime due tipologie, appositamente adattati per l'impiego con sensori inerziali di basso costo. La Figura 2 mostra gli schemi di integrazione GNSS/INS di tipo *loosely-coupled* (in seguito indicata con LC, a sinistra) e *tightly-coupled* (in seguito indicata con TC, a destra) sviluppati (cfr. De Agostino et. al., 2009).

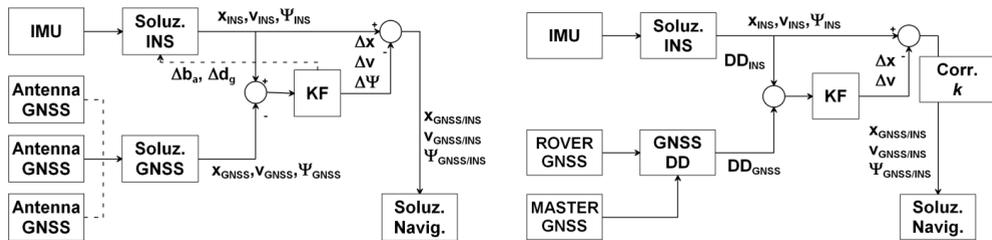


Figura 2 – Schemi dell'integrazione GNSS/INS di tipo *loosely-coupled* (a sinistra) e *tightly-coupled* (a destra) realizzati.

Nell'architettura LC sviluppata le posizioni calcolate a partire dalle misure GNSS vengono impiegate all'interno di un filtro di Kalman come misure, allo scopo di compensare gli errori sugli stati della navigazione ottenuti a partire dai dati inerziali. La soluzione navigazionale finale sarà dunque rappresentata dalla soluzione del sistema inerziale, corretta con le stime degli errori ottenute a partire dall'integrazione con la soluzione GNSS. Nel caso in cui si impieghino sensori GNSS ed INS di basso costo, che presentano errori di natura sistematica ed accidentale di grossa entità, è necessario incrementare per quanto possibile la ridondanza in ciascuno stato di navigazione, includendo all'interno del sistema anche una stima degli angoli di assetto del mezzo in movimento. Tale informazione può essere ottenuta a partire dall'impiego congiunto di tre antenne GNSS o stimando l'angolo di imbardata a partire dalle velocità planimetriche di una singola antenna.

In generale, l'integrazione LC porta con sé due grandi vantaggi: la semplicità di realizzazione e la ridondanza delle misure. Tale architettura presenta tuttavia anche alcuni problemi di natura teorica. Essendo infatti basata sulla conoscenza della soluzione GNSS, è necessario disporre di almeno quattro satelliti in vista. Di conseguenza, nelle situazioni in cui vi siano ostacoli che disturbino la tracciabilità dei satelliti, il sistema GNSS non può essere utilizzato con continuità per compensare la soluzione INS.

All'interno dell'architettura di integrazione TC vengono impiegate direttamente le osservabili GNSS (codici e/o fasi) ed inerziali (accelerazioni e velocità angolari). Il principale vantaggio di tale approccio è che anche poche informazioni provenienti dal GNSS possono essere impiegate per correggere le derivate dei sensori inerziali: se in linea di principio, infatti, occorrono almeno quattro satelliti per ottenere una soluzione GNSS di tipo tridimensionale, all'interno dell'algoritmo di integrazione è possibile utilizzare le informazioni provenienti anche solo da due o tre satelliti in vista. Anche in questo caso la soluzione di navigazione finale è costituita dalla stima ottenuta con il sistema inerziale in cui gli errori vengono compensati per mezzo del sistema integrato GNSS/INS. Il modello di integrazione può includere tra le incognite, analogamente al caso precedente, anche i valori di *bias* e di deriva di accelerometri e di giroscopi, oltre ad altre variabili proprie del sistema GNSS, quali ad esempio l'errore di orologio del ricevitore ed eventuali errori atmosferici, e alle ambiguità di fase. In aggiunta, l'impiego di una soluzione esterna quale quella inerziale può aiutare nel miglioramento delle osservabili di fase, oltre ad incrementare la velocità di fissaggio delle ambiguità di fase e al mantenimento delle stesse.

Esperimento di misura

Allo scopo di verificare gli effettivi miglioramenti raggiungibili a seguito delle procedure di calibrazione e di integrazione sopra presentate, è stato realizzato un test cinematico in Torino, guidando per circa un'ora ad una velocità di 50-70 km/h. La traiettoria compiuta nel test è stata tale da coprire tutti gli scenari possibili nel caso di navigazione terrestre (es. ambiente libero da ostacoli, presenza di viali alberati o di edifici alti...) come è possibile vedere in Figura 3.

Il test è stato preceduto da una fase di acquisizione statica di circa 10 minuti, compiuta in un ambiente privo di ostacoli, allo scopo di consentire un'inizializzazione dei sensori GPS ed un corretto allineamento delle piattaforme inerziali. Un secondo periodo di acquisizione statica, sempre della durata di 10 minuti, è stato effettuato al termine del test cinematico.



Figura 3 – Traiettoria dell'esperimento cinematico (sfondo: Google Earth™).

In particolare, tali test sono stati compiuti con il veicolo a basso costo LCMMS (*Low Cost Mobile Mapping System*, Figura 4) 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). Per il test realizzato, sono stati impiegati tre ricevitori GPS singola frequenza (2 u-blox LEI 4T ed 1 u-blox LEI 5T), connessi singolarmente ad antenne di tipo geodetico, in maniera da migliorare la qualità del segnale ricevuto. Inoltre, sono stati utilizzati tre sensori inerziali di diverse precisioni (Crossbow IMU 700CA, Crossbow IMU 400CC e XSens MTi), in maniera da poter valutare le effettive prestazioni di tali sensori dal punto di vista navigazionale. La soluzione di riferimento è stata ottenuta attraverso un ricevitore geodetico doppia frequenza Leica GNSS 1200+.



Figura 4 – Il sistema LCMMS sviluppato dal Politecnico di Torino ed impiegato nell'esperimento di misura.

Risultati

I dati cinematici raccolti durante l'esperimento di misura sono stati processati attraverso gli algoritmi LC e TC sviluppati. In particolare, i valori risultanti dalle procedure di calibrazione e dall'analisi degli errori accidentali sono stati introdotti come valori approssimati all'interno degli algoritmi di integrazione, in maniera tale da rappresentare un buon punto di partenza per la stima dei *bias* di accelerometri e di giroscopi.

Le diverse traiettorie, ottenute a seguito del processamento dei dati provenienti dai tre ricevitori GPS con i sensori inerziali montati sul veicolo, sono state poi confrontate con la soluzione di riferimento, ottenuta con la post-elaborazione dei dati in modalità post-processing kinematic (PPK), utilizzando il software commerciale LGO. In questo modo è stato possibile valutare le effettive prestazioni raggiungibili mediante l'impiego di sensori inerziali di diversa precisione e costo. Le analisi, sinora principalmente di tipo qualitativo, hanno interessato sia tratti di strada curvi che rettilinei e sono riassunti nelle figure seguenti.

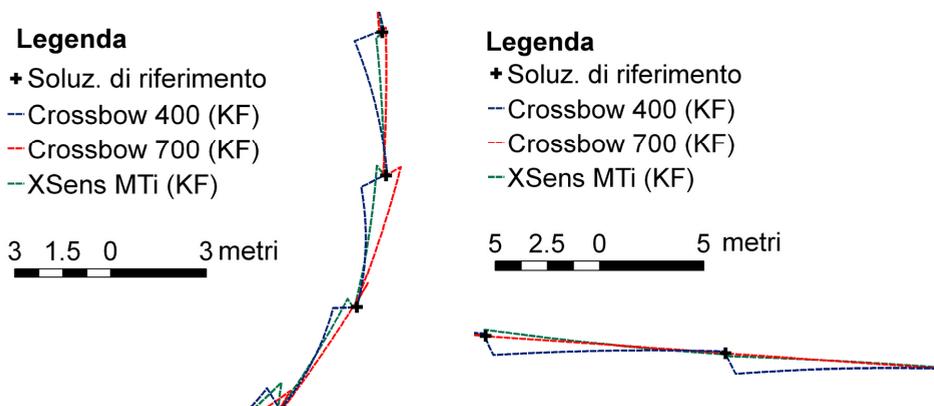


Figura 5 – Confronto tra le traiettorie cinematiche ottenute con i diversi sensori inerziali in un tratto di strada curva (a sinistra) ed in un tratto rettilineo (a destra).

Le traiettorie riportate in Figura 5 mostrano l'andamento a “dente di sega” tipico del processamento di dati GNSS/INS, e dovuto principalmente all'accumulo degli errori sistematici non compensati dei giroscopi. Dall'analisi delle figure precedenti è possibile distinguere chiaramente la qualità dei diversi sensori inerziali impiegati. La soluzione ottenuta impiegando il sensore Crossbow IMU 700CA (con giroscopi a fibre ottiche, molto più accurati rispetto ai giroscopi MEMS) mostra infatti un andamento molto simile alla soluzione di riferimento, sia nel caso del tratto di strada curvo sia, soprattutto, nel caso del tratto rettilineo. L'errore massimo riscontrato in questo caso è di circa 40-50 cm immediatamente prima dell'aggancio con la posizione GPS successiva (*rate* di acquisizione del GPS: 1 secondo). Per quanto concerne la traiettoria ottenuta a partire dai dati del sensore Crossbow 400CC, questa mostra un'accuratezza minore, giustificate dalla presenza di giroscopi MEMS con derive non trascurabili, con errori massimi riscontrati di circa 70-90 cm/s, in entrambi i tratti di strada. Anche il sensore inerziale XSens MTi mostra, nel tratto curvilineo, un comportamento molto simile a quello del sensore 400CC, ma evidenzia anche una maggiore stabilità degli errori sistematici ed accidentali, con effettivi vantaggi soprattutto nel tratto di strada rettilineo, in cui la traiettoria finale risulta molto prossima a quella di riferimento.

Si tenga presente che gli errori massimi riscontrati sinora sono relativi ad un algoritmo (basato sull'impiego del filtro di Kalman) sviluppato per applicazioni in tempo reale. L'impiego di un algoritmo di post-processamento dei dati, ed in particolare del *Back-Propagation Smoother* (BPS) appositamente sviluppato per dati inerziali da uno degli Autori (De Agostino, 2009), riduce

sensibilmente l'effetto delle derive di accelerometri e giroscopi, consentendo di ottenere traiettorie molto più simili a quella di riferimento (Figura 6).

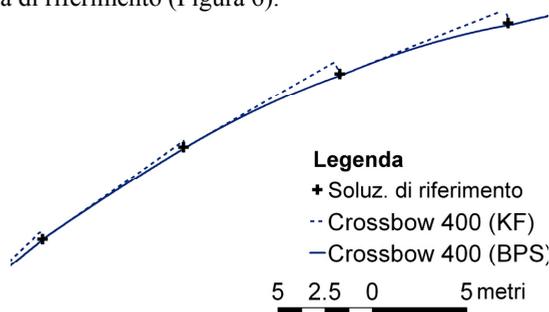


Figura 6 – Confronto tra le traiettorie ottenute processando i dati del Crossbow IMU 400CC mediante l'algoritmo in tempo reale (KF) e con quello in post-processamento (BPS).

Conclusioni

Le prove di calibrazione svolte hanno evidenziato l'utilità di eseguire una procedura di calibrazione anche per sensori inerziali MEMS di basso costo, a patto che queste abbiano come scopo fondamentale la determinazione di parametri approssimati di errore. Sebbene infatti l'analisi della ripetibilità di questi parametri nella sessione di misura mostri una sostanziale stabilità dei parametri sistematici ed accidentali, i test di ripetibilità dei sistematismi in giorni differenti hanno messo in luce la forte influenza, all'interno del *bias* del sensore, della componente accidentale, in grado di far cambiare addirittura di segno la componente sistematica.

I valori ricavati dalle procedure di calibrazione presentate possono essere utilizzati all'interno degli algoritmi di navigazione inerziale, al fine di compensare l'effetto legato alle incertezze di misura. Tale aspetto risulta particolarmente importante soprattutto nel caso in cui si impieghino sensori inerziali di basso costo, in cui tali incertezze non possono essere considerate trascurabili.

Allo scopo di disporre di una soluzione di navigazione geodetica, sono stati sviluppati diversi algoritmi di elaborazione dei dati inerziali e sull'integrazione di tali sensori con uno o più ricevitori GNSS. In particolare, le diverse misure sono state integrate secondo le due architetture più diffuse in letteratura (*loosely-coupled* e *tightly-coupled*), realizzando algoritmi specifici per l'impiego di sensori di basso costo.

L'integrazione GNSS/INS, applicata ad esempi di navigazione terrestre, ha restituito ottimi risultati, consentendo di raggiungere le accuratèzze metriche necessarie per gli usi ad oggi più consueti di tali sistemi integrati, anche in presenza dei *cycle-slip* di durata caratteristica per un ambiente urbano.

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.

De Agostino M. (2009), "Performance of different low-cost GNSS/IMU Land Systems", *ION GNSS 2009 proceedings*, Savannah (GA, USA), pp. 3064-3074.

De Agostino M. (2010), *I sensori inerziali di basso costo per la navigazione geodetica*, Tesi di Dottorato, Dottorato di Ricerca in Ambiente e Territorio (XXII ciclo), Politecnico di Torino.

De Agostino M., Manzano A., Piras M. (2009), "Sviluppo ed analisi di differenti algoritmi di integrazione di sensori GNSS/INS di basso costo per la navigazione terrestre", *Atti della 13a Conferenza Nazionale ASITA*, Bari, pp. 873-878.

De Agostino M., Manzano A., Piras M. (2010), "Performance comparison of different MEMS-based IMUs", *PLANS 2010 proceedings*, Indian Wells (CA, USA), pp. 187-201.