

ANALISI DELLA QUALITÀ DEL POSIZIONAMENTO INS CON STRUMENTAZIONE DI BASSO COSTO IN MANCANZA DI MISURE GNSS

Horea I. BENDEA, Alberto CINA, Mattia DE AGOSTINO,
Ambrogio M. MANZINO, Chiara PORPORATO

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie
Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino (Italy), tel. +39 (011) 564.7630/7675/7687; fax. +39 (011) 564.7699
(iosif.bendea/alberto.cina/mattia.deagostino/ambrogio.manzino/chiera.porporato)@polito.it

Riassunto

I primi studi relativi all'allestimento di un veicolo rilevatore sono stati realizzati negli anni '80 in Canada; da allora, tali veicoli sono stati impiegati in diversi campi e con diverse tipologie di integrazione GNSS/INS. Una caratteristica che accomuna questi dispositivi è l'elevato costo dei sensori adottati, della realizzazione e manutenzione dell'intero sistema. Per questo motivo il nostro gruppo di ricerca ha progettato e costruito un sistema GNSS/INS, adattabile ad ogni veicolo, composto da dispositivi di basso costo. In questo articolo, dopo una descrizione del sistema, si analizzano i risultati ottenuti nelle prove effettuate per valutarne l'affidabilità.

Abstract

The first studies for the mobile mapping and creation of a vehicle for this kind of research were carried out in the 1980's in Canada. Since then these vehicles have been widely employed in several applications. Generally the GNSS/INS vehicles present high costs of the sensors, of the realization and of the maintenance. To overcome this problem a GNSS/INS system, that is suitable for any vehicle, made up of low cost devices (two GPS receivers, an INS and a camera rigidly placed on a metallic bar), has been designed and built by our Research Group.

Two tests run at different velocities have been carried out to evaluate the reliability of the system.

Introduzione

Le prestazioni attuali dei più comuni veicoli rilevatori, i *Mobile Mapping Vehicles* (MMV), sono tali che riescono a raggiungere, a velocità di navigazione di 50-80 km/h, un'accuratezza sub-metrica (El-Sheimy, 1996).

La georeferenziazione dei dati è realizzata mediante la definizione della posizione del veicolo, definita solitamente con l'impiego di uno strumento inerziale (IMU), di uno o più ricevitori GNSS e di una o più camere.

I campi di applicazione principali dei MMV sono essenzialmente legati alla raccolta dati per la realizzazione o per l'aggiornamento di DB del catasto stradale o per GIS urbani, e ad applicazioni riguardanti la sicurezza stradale e la manutenzione delle strade.

Integrazione fra i sensori impiegati nei MMV

L'integrazione fra i dati GNSS e i dati inerziali consente di ottenere una migliore soluzione degli stati della navigazione, ovvero della posizione, della velocità e dell'assetto del veicolo, e conseguentemente di migliorare la qualità dei rilievi effettuati, grazie alla maggiore affidabilità che un sistema integrato generalmente offre rispetto a quella fornita dai due sistemi distinti.

L'impiego all'interno degli algoritmi di stima di modelli di errore degli strumenti e l'implementazione di algoritmi robusti di integrazione di più sensori, come ad esempio la soluzione *Tightly Coupled*, permettono di sfruttare maggiormente tutte le informazioni disponibili, soprattutto all'interno di scenari in cui i soli dati GNSS siano frammentari, a causa della presenza di ostacoli che disturbano la ricezione del segnale. Purtroppo, l'uso di tali sensori e procedure non sempre è sufficiente a garantire l'affidabilità del sistema. A volte, infatti, *outliers* e errori di modello non compensati, anche solamente di un sensore, possono condurre a stime errate di posizione o di traiettoria, anche di diversi metri. Nel caso più comune di integrazione tra i sistemi GNSS e INS, è consuetudine definire all'interno di un *filtro dinamico* (ad esempio, un filtro di Kalman) dei pesi opportuni per i dati provenienti dai due sensori, così da limitare all'interno della soluzione finale il contributo degli errori che affliggono i dati. In particolare, dal momento che spesso la componente maggiore di errore è contenuta all'interno dei dati provenienti dal sensore inerziale, il sistema di norma impiega le osservazioni GNSS, ove presenti, per limitare gli effetti di questi ultimi. Se le lacune nei dati GNSS sono considerevoli, ad esempio a causa di frequenti *cycle-slip* dovuti alla presenza di ostacoli di notevoli dimensioni, le derivate dell'IMU non vengono più compensate dal posizionamento satellitare, e conseguentemente diminuisce l'accuratezza dei dati di posizione.

Architettura del sistema a basso costo per il *mobile mapping*

Con la finalità di ridurre in maniera sensibile i costi, notoriamente elevati, di realizzazione e manutenzione dei MMV, il gruppo di ricerca del DITAG del Politecnico di Torino ha progettato e sviluppato un sistema universale per il *Mobile Mapping* (Figura 1). Questo sistema, composto da una barra metallica in grado di essere montata su qualsiasi autoveicolo, è attualmente composto da tre ricevitori GNSS doppia frequenza di tipo geodetico, per la stima della posizione e dell'assetto del veicolo in assenza di ostacoli, tre webcam ad alta risoluzione (Logitech Quickcam Pro 9000, con risoluzione fino a 2 MPixel) per il rilevamento generale dei particolari stradali (segnaletica orizzontale e verticale, ad esempio) e alloggiamenti per ospitare sino a due sensori inerziali (un IMU 700-CA e un IMU 400-CC della Crossbow) per la stima degli stati della navigazione, in particolare in assenza del segnale GNSS. Al fine di produrre una soluzione più accurata, tutte le distanze fra i sensori (*level-arm*) sono fissate e sono state misurate con precisione sub-centimetrica.



Figura 1: Il sistema a basso costo GNSS/INS progettato al Politecnico di Torino (DITAG) nella sua configurazione attuale (a) e nella configurazione adottata durante il test a Morozzo (CN): si noti l'adattabilità del sistema realizzato a veicoli differenti

Test del Sistema GNSS/INS

Per valutare l'affidabilità del posizionamento GNSS/IMU incluso nel sistema realizzato è stato effettuato un test specifico nei pressi del comune di Morozzo (CN). Nelle due prove eseguite si è percorso lo stesso tragitto, ma con differente velocità di navigazione: nella prima prova la velocità

adottata era di 50 km/h, mentre nella seconda si è viaggiato ad una velocità media di 70 km/h. Per valutare l'affidabilità del sistema inerziale durante entrambe le prove si sono impiegati entrambi i sensori della Crossbow sopra citati. Come detto, le prove eseguite avevano la finalità di testare i limiti reali dell'integrazione dei sensori GNSS ed IMU a basso costo di *cycle-slip* (nel seguito indicati come c.s.) di differenti entità nei dati GNSS. Per questo motivo, all'interno dei dati GNSS sono stati introdotti dei c.s. artificiali, di durata differente. I dati GNSS memorizzati a 2 Hz sono stati analizzati per individuare un numero sufficiente di epoche di misura che non presentassero c.s. (circa 200-300 secondi): in tale intervallo sono stati generati i c.s. di lunghezza sempre maggiore, da 0 ad 80 secondi con *step* di 10 secondi (per un totale di 9 scenari). L'elaborazione dei dati GNSS e la successiva integrazione delle misure IMU sono stati effettuati per ciascuno dei set di dati generati. Le traiettorie risultanti per ciascuno scenario sono state confrontate con quelle di riferimento ottenute dal post-processamento dei soli dati GNSS integri.

Tutti i trattamenti GNSS sono da intendersi eseguiti in modalità differenziale, utilizzando le vicine stazioni permanenti di Cuneo, Mondovì e Savigliano della Rete Test di Stazioni Permanenti gestita dal Politecnico di Torino. Tutti i trattamenti GNSS e IMU sono stati fatti utilizzando il software Inertial Explorer v. 8.10 della Waypoint.

Analisi della prova condotta a 50 km/h

La prima prova è stata effettuata mantenendo una velocità di crociera di 50km/h percorrendo un itinerario di circa 10 km (5 km in andata e 5 km in ritorno). All'inizio ed alla fine del tragitto il veicolo è rimasto fermo per circa 4-5 minuti, al fine di ridurre gli errori di deriva degli accelerometri e dei giroscopi dell'IMU. Le coordinate GNSS sono state integrate con quelle di ciascun inerziale utilizzando l'algoritmo Loosley-Coupled (che effettua l'integrazione fra le coordinate determinate con i soli dati GPS e i dati IMU), e processando i dati all'interno di un filtro di Kalman sia nella direzione del moto sia nella direzione contraria, e combinando poi le due soluzioni ottenute per migliorare la qualità dei risultati.

Per ciascuno scenario si è esaminato l'errore rispetto alla traiettoria di riferimento. La figura 2, ad esempio, mostra gli errori prodotti dalla deriva del sensore IMU 700-CA nel caso di un c.s. di 80 secondi, espressi nel sistema del corpo in movimento (la Est coincide con l'asse X, la Nord con l'asse Y e l'h con l'asse Z) per una soluzione ottenuta con il filtro di Kalman diretto: l'errore di deriva in questo caso è approssimativamente uguale lungo gli assi X e Y, ed è inferiore nella direzione Z.

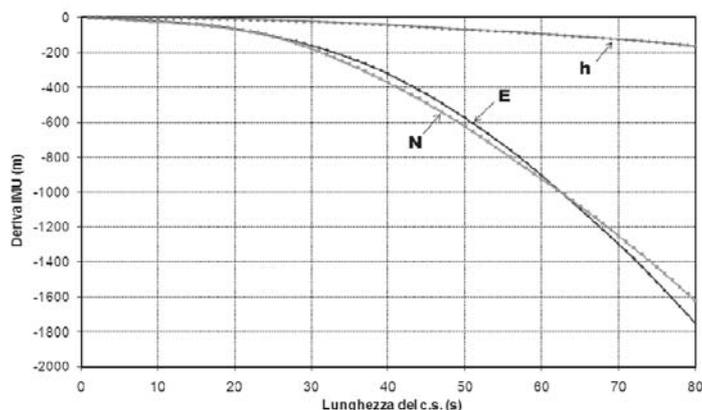


Figura 2: Errore nel caso di un c.s. di 80 secondi per ciascun asse IMU

In assenza del dato GNSS, gli errori all'interno dei dati IMU possono venire parzialmente rimossi con altre tecniche; ad esempio, è possibile filtrare gli effetti delle vibrazioni del motore impiegando le metodologie offerte dall'analisi dei segnali come ad esempio quella suggerita da De Agostino (2008). È inoltre possibile ridurre gli errori di calcolo con una procedura di trattamento dati più complessa, come ad esempio il liscio RTS del filtro di Kalman introdotto nelle nuove versioni

del software Inertial Explorer, e contenere l'errore di deriva del sensore introducendo un modello di errore specifico per il sensore impiegato. Tutte queste procedure migliorano la qualità della soluzione finale: la Figura 3(a) mostra la riduzione dell'errore tridimensionale per il sensore IMU 700-CA relativa all'applicazione "in cascata" delle procedure sopra citate, per un c.s. di 80 secondi. Nella Figura 3(b) viene invece rappresentata la traiettoria planimetrica relativa agli stessi casi.

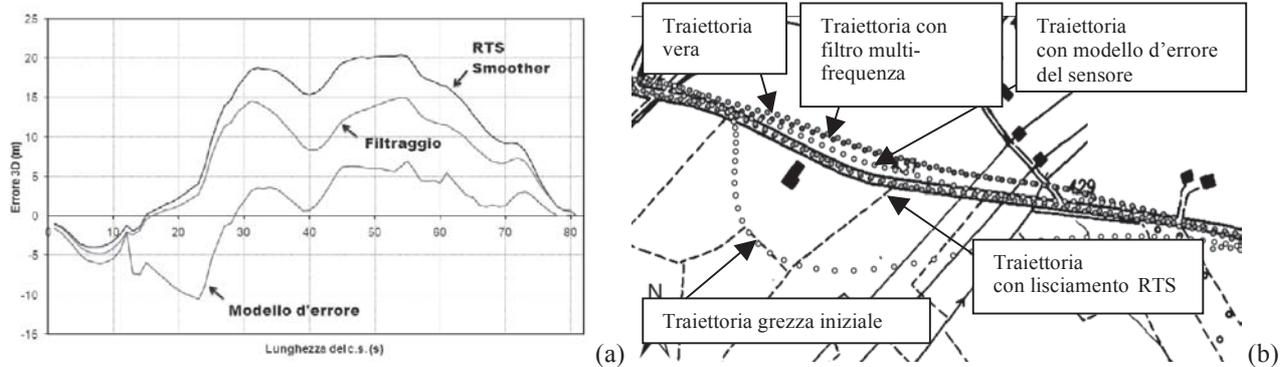


Figura 3: Andamento dell'errore tridimensionale dopo le diverse correzioni (a) e confronto tra le diverse soluzioni planimetriche (b)

Dall'analisi della Figura 3 si può notare come la componente d'errore prodotta dal rumore può essere ridotta radicalmente impiegando un filtro multi-risoluzione, e come la modellizzazione della deriva del sensore consenta di contenere notevolmente gli errori in tutta la durata del c.s.. L'errore massimo passa da circa 50 metri nel caso di dati grezzi a 20 metri per dati liscati con RTS, fino a 15 metri dopo un filtraggio multi-frequenza e, infine, a 5 metri (con un errore medio di 2 metri) dopo l'applicazione del software di modellazione della deriva del sensore. Lo stesso miglioramento si riscontra anche dall'analisi delle traiettorie, dove la soluzione modellizzata si avvicina molto alla traiettoria di riferimento (il confronto è effettuato rispetto alla soluzione grezza iniziale).

Come precedentemente accennato, la stessa prova è anche stata effettuata con il sensore IMU 400-CC della Crossbow, che ha due triadi di sensori elettromeccanici (MEMS), di costo e accuratezza inferiori. Anche per questo sensore, le misure GNSS e IMU sono state processate seguendo la stessa metodologia del caso precedente. È stato poi condotto un confronto fra gli errori 2D e gli errori 3D per i due sensori IMU impiegati, riportato in Figura 4. In particolare, la linea inferiore indica l'andamento dell'errore planimetrico e tridimensionale dell'IMU 700-CA al variare della lunghezza dei c.s., mentre quella superiore rappresenta gli stessi errori ottenuti processando i dati dell'IMU 400-CC.

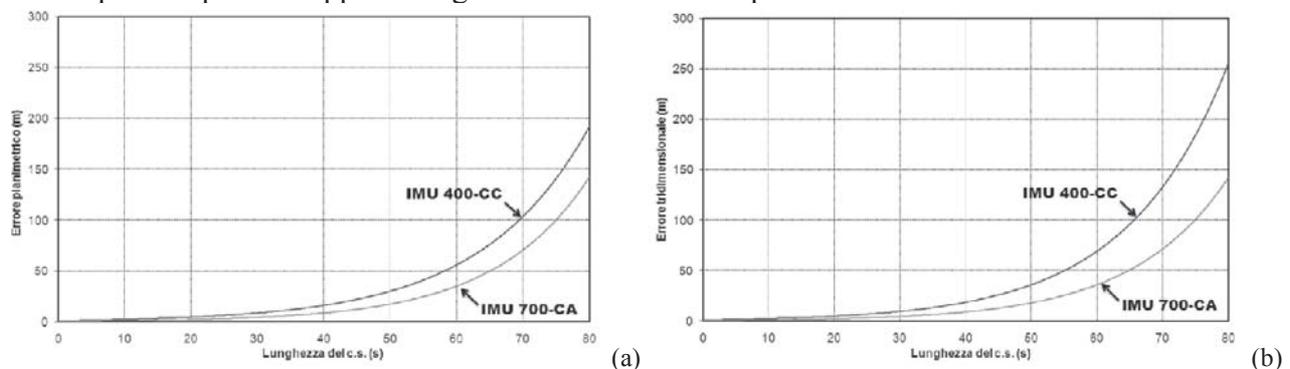


Figura 4: Errore planimetrico (a) e tridimensionale (b) in funzione dei c.s. per i due sensori utilizzati

Come era prevedibile, l'IMU 400-CC presenta una deriva maggiore rispetto all'IMU 700-CA, principalmente dovuta ai sensori MEMS che utilizza. Tuttavia, per c.s. dell'ordine di 30-40 secondi, comuni nelle applicazioni di rilievo stradale in assenza di gallerie o di grossi viali alberati, gli errori

dei due sensori sono fra loro paragonabili, e giustifica pertanto l'impiego del sensore più economico per alcune applicazioni di bassa precisione. D'altro canto, per c.s. più lunghi, l'errore prodotto dal sensore MEMS aumenta rapidamente (in particolare la componente altimetrica), per cui è preferibile impiegare un sensore IMU più accurato.

Analisi della prova condotta a 70 km/h

La seconda prova è stata effettuata a 70 km/ora, seguendo le stesse metodologie operative e di analisi già descritte per il primo test. La Figura 5 riproduce la differenza media, in E, N e h (asse y nella figura), in funzione della lunghezza del c.s. (asse x nella figura) nel caso di utilizzo dell'IMU 700-CA e dell'IMU 400-CC.

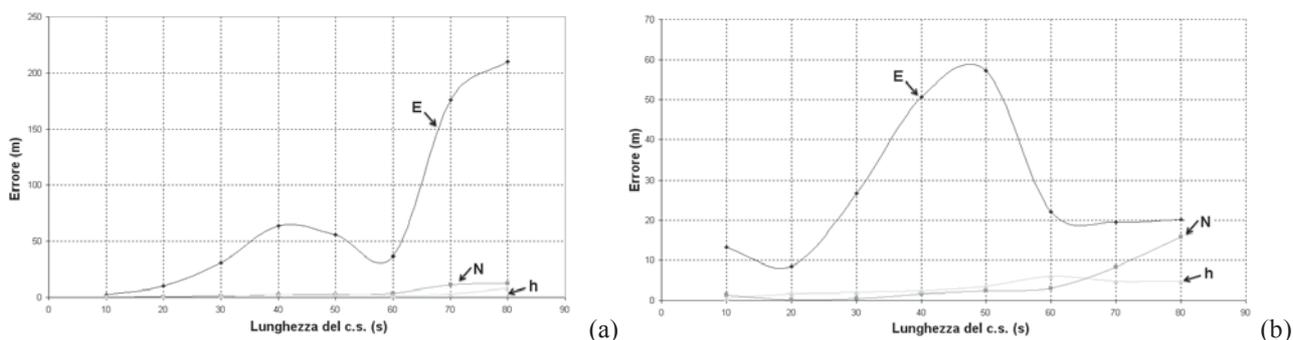


Figura 5: Andamento dell'errore nelle tre coordinate cartografiche (E, N, h) in funzione della lunghezza del c.s. per il sensore IMU 700-CA (a) e IMU 400-CC (b)

Come già rilevato nel caso della prova a 50 km/h, in entrambi i casi l'errore massimo si verifica lungo la componente Est, ma in questo caso raggiunge errori elevati molto più velocemente, probabilmente a causa della velocità più elevata.

Per quanto concerne invece il sensore IMU 400-CC, l'andamento dell'errore riportato in figura 5(b) mostra che per un c.s. di ampiezza superiore a 30 secondi l'andamento della soluzione diventa poco modellabile, e con valori privi di significatività; il risultato conferma l'inadeguatezza dell'IMU 400-CC unito all'algoritmo di calcolo utilizzato per applicazioni di *mobile mapping* condotte a velocità di crociera che superino i 50 km/ora.

Concentrando l'attenzione sul sensore IMU 700-CA, con lo scopo di limitare gli effetti degli errori è stata eseguita la medesima procedura di filtraggio dei dati dello scenario precedente, adottato anche in questo caso un modello specifico di errore per il sensore, ma non ottenendo gli stessi benefici. In questo caso, infatti, i livelli di soglia su cui è impostato il filtraggio dei dati è risultato troppo invasivo, dato che si evidenzia una perdita di informazione alle frequenze più elevate, come evidente dall'analisi della Figura 6 relativa ad un c.s. di 80 secondi. L'errore tridimensionale in questo caso aumenta dopo 40 secondi dall'inizio del c.s., in corrispondenza di una variazione di velocità rilevabile mediante il confronto con la soluzione di riferimento. Tale incremento dell'errore è, come detto, derivato, con tutta probabilità, dall'eccessivo filtraggio a cui sono stati sottoposti i dati IMU, e che ha eliminato in parte la componente ad alta frequenza della dinamica del veicolo.

Nella stessa Figura è anche visibile il beneficio apportato dal lisciamento dei dati tramite l'algoritmo RTS presente all'interno del software: l'errore tridimensionale massimo presente nei dati grezzi diminuisce più di 400 m nella soluzione lisciata. Tuttavia, l'applicazione del modello di errore definito per il sensore non offre alcun vantaggio evidente.

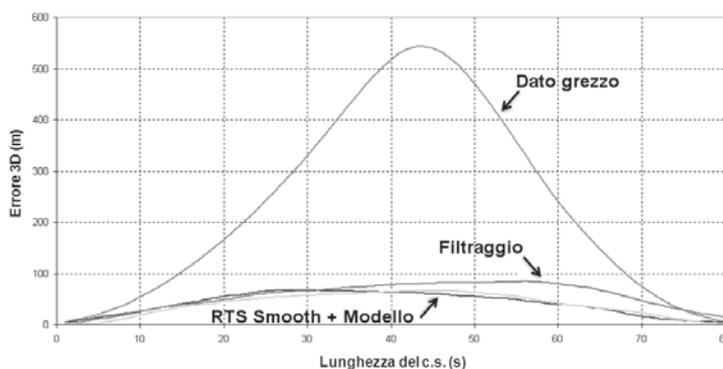


Figura 6: Andamento dell'errore tridimensionale dopo le diverse correzioni (IMU 700-CA)

Conclusioni

Le prove effettuate introducendo *cycle-slip* artificiali all'interno dei dati GNSS permettono di comprendere quale sia il reale contributo dell'IMU per ricostruire la traiettoria percorsa, e di quanto tali strumenti siano sensibili alla velocità del veicolo.

Dall'analisi delle due prove condotte a velocità differenti ed utilizzando due sensori inerziali di prestazioni e costo differenti sono emersi alcuni risultati interessanti. È infatti emersa l'importanza di impiegare, con la dovuta cura, particolari accorgimenti durante il processamento dei dati: l'uso di un modello di errore specifico definito per il sensore, al posto di un modello generico di deriva, migliora considerevolmente le soluzioni e riduce gli errori di posizione di alcuni metri. Il filtraggio dei dati IMU ha permesso di ridurre gli errori dovuti alla rumorosità del veicolo, strettamente connessi alla velocità di guida. In particolare, il filtro deve essere applicato prestando molta attenzione alla frequenza del segnale, e cercando di individuare, mediante l'analisi degli spettri di potenza del segnale, la corretta frequenza di *cut-off* del rumore. Nella prova a 70 km/h, l'impiego del filtro multi-frequenza elimina in parte l'informazione di moto contenuta all'interno dei dati, producendo un deterioramento della soluzione. Anche l'impiego di un algoritmo più complesso, quale ad esempio il lisciamento RTS del filtro di Kalman introdotto all'interno del software Waypoint Inertial Explorer, ha portato alla riduzione dell'errore nel corso dei *cycle-slip* di intervalli di tempo più elevati.

Per quanto concerne la qualità del sensore impiegato, dalle prove fatte è stato possibile evidenziare come sensori basati sulla tecnologia MEMS possano trovare impiego anche nelle comuni applicazioni di *Mobile Mapping*, a patto di non raggiungere elevate velocità di guida e nel caso in cui si prevedano c.s. dei dati GNSS inferiori a 40 secondi. In caso contrario, per c.s. più lunghi, l'errore prodotto dal sensore MEMS aumenta rapidamente (in particolare la componente altimetrica), per cui è preferibile impiegare un sensore IMU più accurato.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano esprimere un sentito ringraziamento al prof. Andrea Lingua e all'ing. Marco Piras per il loro fondamentale contributo all'ideazione e alla realizzazione del sistema a basso costo per il *mobile mapping* impiegato nel corso dei test.

Bibliografia

- M. De Agostino (2008), "A multi-frequency filtering procedure for inertial navigation". *PLANS Conference Proceedings*, Monterey (CA), USA, 5-8 Maggio 2008.
- N. El-Sheimy (1996), *The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications*, Tesi di Dottorato, Dept. of Geomatics Engineering, Calgary, Canada.
- Waypoint Consulting (2005), *Improvements in Position, Velocity and Attitude when using Waypoint Consulting's RTS Smoother during Periods of GPS Data Outages*.