

PRIME SPERIMENTAZIONI DI NAVIGAZIONE MEDIANTE UN SENSORE INTEGRATO INS E GPS

Maria Antonia BROVELLI (*), Diego MAGNI (*), Antonio SIBAUD (**),
Vincenza TORNATORE (***)

(*) Politecnico di Milano - Polo Regionale di Como, via Valleggio, 11 – 22100 Como, tel + 39 031 3327517,
fax + 39 031 332 7519, e-mail maria.brovelli@polimi.it, diego@geomatica.como.polimi.it

(**) Instrumentation Devices srl, via Acquanera, 34/M – 22100 Como, tel + 39 031 525391, fax + 39 031 507984,
e-mail asibaud@instrumentation.it

(***) DIIAR – Sez. Rilevamento, Politecnico di Milano, p.zza L. da Vinci, 32 – 20133 Milano, tel. + 39 02 23996502,
fax + 39 02 23996530, e-mail vincenza.tornatore@polimi.it

Riassunto

Il presente lavoro descrive i primi risultati di un esperimento effettuato utilizzando il sensore della Crossbow NAV420, dotato di tre accelerometri, tre giroscopi, un magnetometro triassiale, quattro sensori di temperatura e un ricevitore GPS integrato. Lo strumento è in grado di fornire un'accuratezza CEP (Circular Error Probable) di posizionamento di 3 metri, che può essere migliorata con correzioni RTCM o WAAS.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con valori di riferimento considerati rappresentativi della realtà, acquisiti tramite un rilievo GPS RTK di precisione centimetrica, effettuato con ricevitore Topcon GB-500 e correzioni RTCM, trasmesse via internet in modalità RIR (RTCM Internet Receiver[®]) dalla stazione permanente di Como, ubicata a poche centinaia di metri dal luogo della sperimentazione. Infine si è valutata la deriva del sensore inerziale NAV420 mediante posizionamento statico dell'IMU della durata di tre ore.

Abstract

The paper illustrates the first results of an experiment performed using the Crossbow NAV420 system. This is a GPS-aided inertial system consisting of the following subsystems: Inertial sensor array that is an assembly of three accelerometers and three gyros and four temperature sensors, a three axis magnetometer, a built-in GPS receiver. The system has a CEP (Circular Error Probable) positioning accuracy of 3 meters, that can be improved by using RTCM and WAAS Compatibility. The obtained results have been compared with reference values acquired by a GPS RTK survey of centimetric accuracy, performed by a Topcon GB-500 receiver and RTCM message Internet broadcasting by the RIR (RTCM Internet Receiver[®]) system coming from the permanent station of Como, located at a few hundreds of meters from the experiment site. Finally it has been evaluated the inertial sensor NAV420 drift by a static positioning of the IMU of three hours.

Introduzione e descrizione della strumentazione utilizzata

Il rilevamento dinamico multisensore sta acquisendo un notevole interesse anche in ambito topografico in quanto consente una rapida acquisizione delle caratteristiche del territorio e di tutto ciò che è presente in esso. I sistemi di rilevamento dinamico terrestre (o multisensore o Mobile Mapping Systems, MMS) sono attrezzati con sensori di rilevamento, ad esempio camere fotogrammetriche, telecamere o LIDAR, e si basano sull'utilizzo integrato di sensori di navigazione

inerziale e GPS che forniscono, in corrispondenza di istanti di tempo fissati, la posizione e l'assetto della piattaforma mobile (il veicolo stradale, nel caso dei MMV, Mobile Mapping Vehicles), sulla quale sia essi che gli altri sensori di rilevamento sono montati.

Per applicazioni che necessitano di elevata precisione, anche i ricevitori GPS integrati devono consentire accuratezze elevate nel posizionamento, ovvero devono essere di tipo geodetico, al fine di poter limitare in maniera adeguata la deriva strumentale a cui l'IMU è soggetto a causa dell'accumulo degli errori di misura dei giroscopi e degli accelerometri nell'integrazione delle equazioni di moto da cui si ottiene la posizione.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di valutare l'accuratezza del posizionamento ottenibile da sistemi integrati INS e GPS nel caso in cui il ricevitore GPS non sia un ricevitore geodetico, ma sia un ricevitore di codice e singola frequenza.

Il sistema utilizzato durante le sperimentazioni è il NAV420 della Crossbow, ossia un sensore inerziale integrato con un ricevitore GPS con antenna esterna. In particolare il sensore inerziale è costituito da tre accelerometri e tre giroscopi realizzati tramite la tecnologia MEMS (Micro Electrical Mechanical Structure). Questa tecnologia permette di ridurre notevolmente le dimensioni dei sensori e di ottenere sistemi inerziali stabili e affidabili oltre che facili da usare. Inoltre presenta al suo interno un magnetometro triassiale a nucleo saturabile, usato per determinare la direzione del campo magnetico terrestre, un processore digitale, che riceve i segnali dai sensori inerziali e dal magnetometro, li converte in segnali digitali, filtra i dati e calcola le soluzioni di assetto e posizione e trasmette i risultati all'utente. Il ricevitore GPS ha la possibilità di ricevere le correzioni differenziali RTCM e WAAS (Wide Area Augmentation System).

L'algoritmo utilizzato per integrare le misure fornite dal sensore inerziale e dal GPS e stimare lo stato di navigazione del sistema è il filtro di Kalman: la traiettoria, data da velocità e assetto, viene 'propagata' tramite le misure degli accelerometri e dei giroscopi, mentre i sensori di supporto (GPS e magnetometro) forniscono le misure di velocità e campo magnetico terrestre che il filtro usa per calcolare le 'correzioni' alla traiettoria e stimare gli errori del sensore inerziale e gli effetti magnetici di materiali ferrosi. Questi ultimi sono molto importanti in quanto il magnetometro è sensibile ai disturbi magnetici, che alterano le misure del campo magnetico terrestre. Il NAV420 dovrebbe essere isolato da materiali magnetici il più possibile, in quanto tali materiali possono distorcere il campo magnetico vicino al sensore e inficiare le misure dello yaw. Campi magnetici locali, se costanti, possono essere misurati e corretti dal sensore stesso tramite una procedura di calibrazione, che tuttavia non può fare nulla per campi che variano nel tempo o campi creati da parti che si muovono rispetto al NAV420. La procedura di calibrazione da effettuare quando il sistema è installato nella sua posizione definitiva richiede la lenta rotazione del veicolo per 380 gradi; questa procedura può essere ripetuta diverse volte fino a quando il sistema non ha collezionato abbastanza dati per correggere i campi magnetici residui.

Inoltre bisogna anche considerare che immediatamente dopo l'accensione il NAV420 utilizza gli accelerometri e il magnetometro per calcolare gli angoli di assetto iniziali, per tale ragione esso deve essere tenuto fermo per circa 60 secondi perché possa compiere l'inizializzazione.

Lo strumento fornisce a 100 Hz i tre angoli di assetto *roll*, *pitch* e *yaw*, e la loro variazione nel tempo, la posizione, la velocità e la temperatura. Il motivo per cui viene indicata anche la temperatura è che essa influenza la precisione delle misure fornite e può quindi essere utile conoscerla. Nel modello NAV420 gli accelerometri sono in grado di misurare un range di forze specifiche che va da -10 a +10 G (dove $1\text{ G} = 9.81\text{ m/s}^2$); mentre i giroscopi misurano le velocità angolari in un range che va da -200 a +200 °/sec . L'accuratezza del posizionamento espressa in CEP (Circular Error Probabile, ossia il raggio del cerchio contenente il 50% delle stime) è di 3 m. L'accuratezza di *roll* e *pitch* dichiarata dalla casa costruttrice è di $\pm 0.5^\circ$ con GPS disponibile e $\pm 2^\circ$ senza GPS. Mentre è di $\pm 3^\circ$ per lo *yaw*.

Il sistema di riferimento interno dell'IMU, indicato col nome di *body-frame* o sistema *body* è disposto come in figura 1:

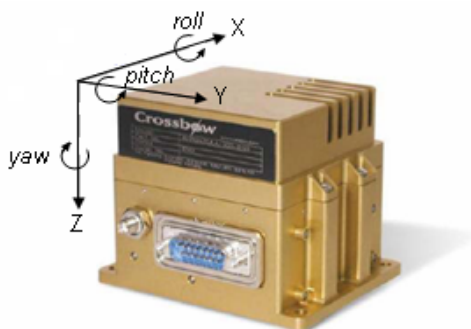


Figura 1 –Il sistema NAV420

Il sensore è caratterizzato da una configurazione '*stabilized*' ossia è costruito in modo tale da essere isolato rispetto ai movimenti rotatori del veicolo sul quale è montato, pertanto gli assi strumentali si mantengono sempre paralleli all'allineamento iniziale. I sistemi '*strapdown*' invece, di costo più limitato, hanno gli assi strumentali solidali al corpo dell'apparecchiatura, per cui il sistema di riferimento in cui si effettuano le misure cambia al variare dell'assetto del veicolo. Insieme all'IMU la società costruttrice fornisce un apposito programma, chiamato NAV-VIEW, che si occupa di prendere i dati dall'interfaccia seriale, visualizzarli a video e creare un file di *logging* al campionamento desiderato.

Al fine di poter valutare i risultati ottenuti con il NAV420, per lo meno in termini di accuratezze raggiungibili nel posizionamento, le coordinate dei punti interessati dall'esperimento sono state determinate anche in modalità GPS RTK, ossia con precisione di qualche centimetro. In particolare, si è utilizzata come stazione *master* la stazione permanente di Como e la trasmissione del messaggio RTCM è avvenuta tramite rete Internet impiegando il sistema denominato RIR. Per il *rover* si è utilizzato un ricevitore Topcon GB-500 RTK. Ciascuna coordinata RTK è stata determinata acquisendo una misura al secondo, e mediando le prime 10 *fixed*.

Descrizione degli esperimenti effettuati

Le misure sono state effettuate in un'area adiacente al campus Castelnuovo-Valleggio del Polo Regionale di Como del Politecnico di Milano. In particolare si sono determinate sia le coordinate dei punti d'angolo e di mezzeria (in totale sei punti), sia le traiettorie delle linee perimetrali che delimitano il campo da basket sito in via Ambrosoli. Inoltre, sia sui punti che lungo le linee perimetrali si sono registrati i valori dei tre angoli di assetto (*roll*, *pitch* e *yaw*).

- **Analisi degli angoli di assetto per misure statiche su punti noti**

Durante il rilievo dei punti sono state utilizzate due diverse configurazioni: nel primo caso (11 marzo 2005) il NAV420 è stato posizionato su un carrello in legno, mentre nel secondo (14 marzo 2005) l'INS è stato posto direttamente sul punto; in entrambi i casi l'antenna GPS è stata posizionata sopra l'INS. Per quanto riguarda gli angoli di assetto, le tolleranze indicate dalla casa produttrice sono state rispettate come si può evincere dai grafici di rollio, beccheggio e imbardata in funzione del tempo; si può notare inoltre che l'imbardata è la componente maggiormente disturbata in quanto, avendo come riferimento il Nord magnetico, è la componente più sensibile alla presenza di eventuali campi anomali locali. Il disturbo sembra essere più evidente nel caso in cui la strumentazione è stata posta sul carrello (vedi figure 2 e 3): in questo caso, infatti, sensore INS e GPS risultano essere più vicini al computer portatile e alla batteria di alimentazione, fonti di campi elettromagnetici.

Si è analizzato il caso del punto 2 come rappresentativo.

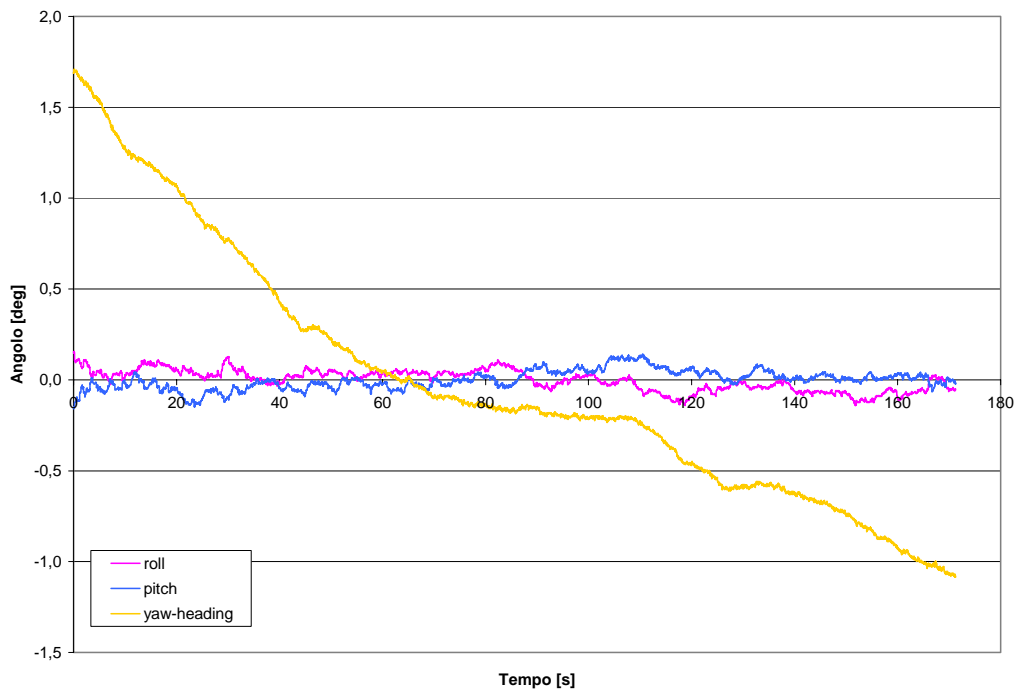


Figura 2 –Angoli di assetto per il punto 2 (INS/GPS su carrello)

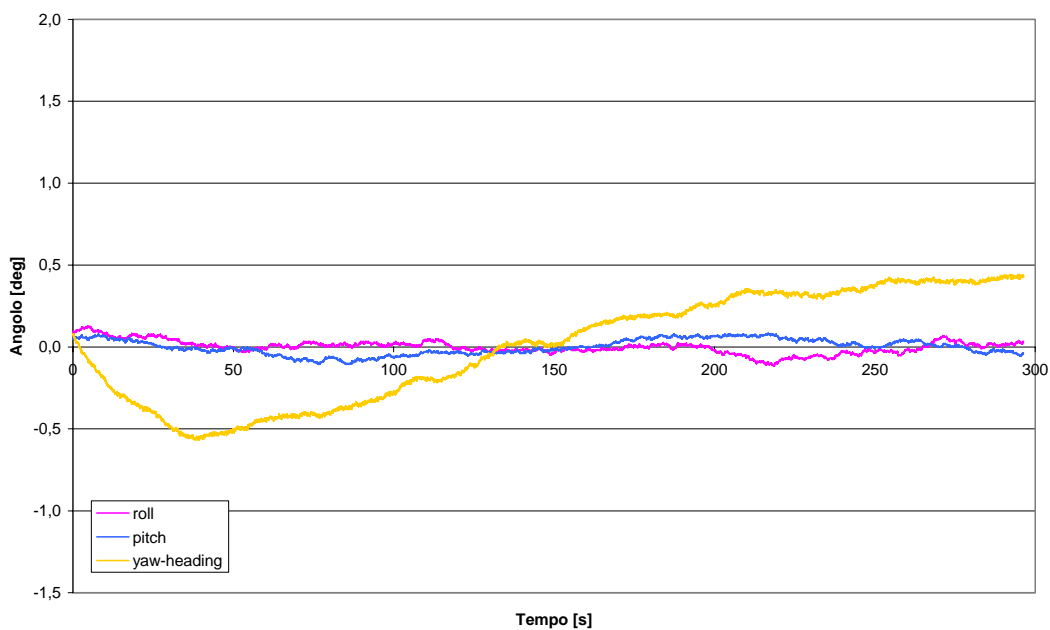


Figura 3 –Angoli di assetto per il punto 2 (INS/GPS direttamente su punto)

- **Analisi degli angoli di assetto lungo un percorso noto**

Le linee perimetrali del campo sono state determinate eseguendo dieci giri successivi; in figura 4 sono rappresentati i valori acquisiti per i tre angoli di assetto dal secondo 1 a 300 (poco più di due giri) il giorno 11 marzo 2005 con l'utilizzo del carrello. Gli angoli *roll* e *pitch* rimangono sostanzialmente costanti (a questa scala di visualizzazione, adottata per poter disporre di una visione

sinottica dei tre angoli di assetto, il *pitch* appare pressochè coincidente con l'asse del tempo), lo *yaw* mostra correttamente la variazione di 90° in corrispondenza dei vertici del campo da basket. Tuttavia, in corrispondenza di questi, al termine della svolta del carrello lo *yaw* presenta inizialmente un picco e necessita di circa 5 secondi per stabilizzarsi.

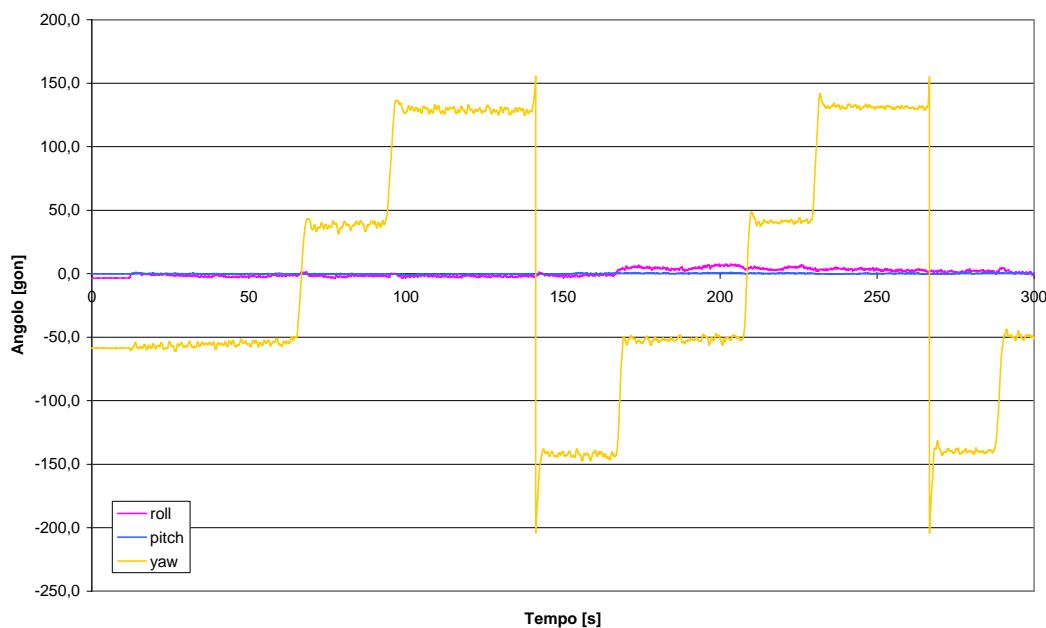


Figura 4 –Angoli di assetto lungo le linee perimetrali del campo (INS/GPS su carrello)

- **Analisi della deriva dello strumento**

Per valutare la deriva del sensore inerziale, il NAV420 è stato posto su una torretta di calcestruzzo (circa 1,50 m da terra) in zona aperta in località Pagnano (frazione di Merate, Lecco) con antenna GPS sopra l'INS e si è effettuata un'acquisizione dati per circa tre ore dalle 13 alle 16 circa del 17 aprile 2005. I valori di *roll*, *pitch* e *yaw* sono sempre in tolleranza, sebbene si noti la presenza di alcuni picchi nel *pitch* che cadono in corrispondenza di alcuni *outlier* nel posizionamento. Dall'esame delle misure di assetto e di posizionamento l'effetto della deriva sembra essere ben controllato dalle misure GPS.

- **Analisi dell'accuratezza delle coordinate: confronto con i valori RTK-RIR**

La media dei valori planimetrici ricavata dalle misure del NAV420 effettuate l'11 marzo 2005 durante i cinque minuti di acquisizione su ciascuno dei sei punti del poligono è stata rappresentata con ArcGIS™ (vedi figura 5) insieme al valore determinato in modalità GPS RTK. Il valore medio rispetta le tolleranze indicate dalle specifiche tecniche per tutti i punti anche se è evidente un'ampia dispersione dei singoli valori. Inoltre nella stessa figura sono riportate anche le misure cinematiche NAV420 fatte con l'ausilio del carrello lungo le linee perimetrali del campo da basket, percorso dieci volte.

Conclusioni

Il sistema NAV420 è un sistema molto sensibile ai disturbi legati a presenza di campi magnetici residui, soprattutto per quanto riguarda la misura dello *yaw*; è fondamentale effettuare la procedura di calibrazione all'inizio della sessione di misura per poter determinare e correggere tali effetti.

Tuttavia essi non sono eliminabili qualora siano effetti variabili nel tempo o determinati da parti in movimento rispetto al sistema.

Nel caso sia stato possibile effettuare una corretta calibrazione, lo strumento fornisce le accuratze indicate nelle specifiche tecniche. Sarebbe interessante valutare le prestazioni del sistema a bordo di veicoli in movimento anche a velocità più sostenute rispetto a quelle dell'esperimento qui descritto.

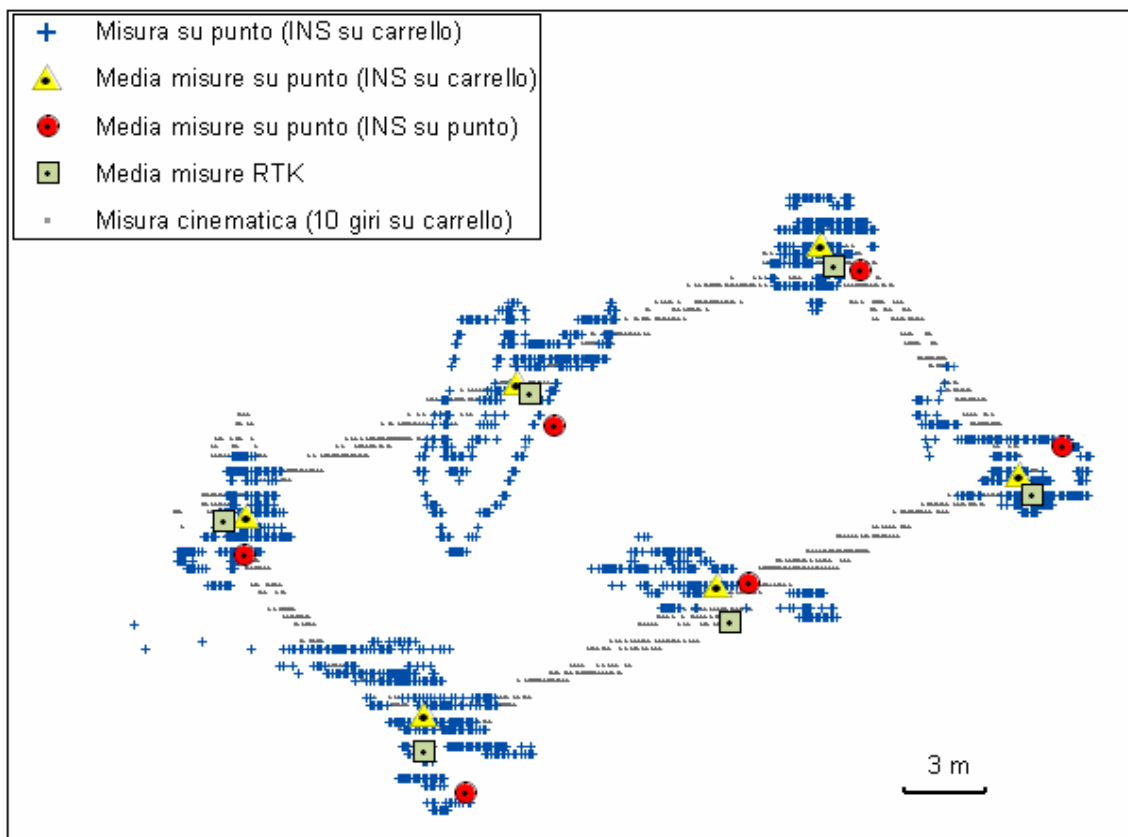


Figura 5 –Coordinate linee perimetrali NAV420 RIR (INS/GPS su carrello e coordinate RTK-RIR)

Ringraziamenti

Si ringraziano la ditta Instrumentation Devices srl, che ha fornito in prova il sensore inerziale NAV 420, e gli studenti dei corsi di Laboratorio di Navigazione (CCS Ambiente e Territorio - Politecnico di Milano, Polo Regionale di Como) e GPS e Navigazione B (CCS Ing. Civile - Politecnico di Milano), che hanno collaborato all'esecuzione di alcuni rilievi e all'elaborazione dei dati.

Bibliografia

- Cazzaniga N. E., Forlani G. (2004), "Integrazione di dati INS/GPS", Atti della 8^a Conferenza ASITA, Roma
- Jekeli C., (2001), "Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications" Walter de Gruyter, Berlin-New York.
- Kalman R.E., (1960), "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Transactions of the ASME –Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D): pp. 35-45.
- Manzino A. M., (2003). Introduzione all'uso del filtro di Kalman in Geodesia. *Bollettino SIFET* 2/2003: pp. 63-101.
- Pinto L., Passoni D., Forlani G., "Fotogrammetria diretta: considerazioni e proposte operative" Atti della 8^a Conferenza ASITA, Roma
- Nav420 Series User's Manual, Crossbow, www.xbox.com.