

SISTEMI INS/GPS A BASSO COSTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI NAVIGAZIONE INTEGRATO

Aldo TRECROCI (*), Giuseppe ARTESE (*)

(*) Università della Calabria, Facoltà d'Ingegneria, Dipartimento di Pianificazione Territoriale, Arcavacata di Rende (CS), ponte Pietro Bucci cubo 46b – g.artese@unical.it, aldo.trecroci@unical.it

Riassunto

L'integrazione tra le strumentazioni GPS e l'utilizzo di sensori inerziali è un campo di notevole interesse per le sue numerose possibili applicazioni tecnologiche. Le nuove tecnologie digitali hanno permesso la costruzione di nuovi modelli di sensori miniaturizzati ed a basso costo che combinati con una strumentazione GPS anch'essa ormai concepita di piccole dimensioni e di costo relativamente basso, racchiudono in una unica piattaforma portatile per peso e dimensioni, le funzionalità armonizzate delle diverse strumentazioni, costituendo uno strumento di navigazione completo e di buona precisione e soprattutto ottenuto con costi molto ridotti rispetto al più recente passato. In particolare l'utilizzo di microsensori con tecnologia MEMS consente la realizzazione di strumentazioni integrate di dimensioni e peso estremamente ridotti.

L'articolo, dopo una disamina di alcune tipologie di sensori inerziali a basso costo di interesse, discute le problematiche di integrazione dei sensori inerziali con strumentazione GPS, ed alcuni aspetti relativi all'integrazione di più piattaforme integrate INS/GPS rigidamente collegate tra loro, fornendo, infine, alcune informazioni su una ricerca nel settore attualmente in corso presso l'Università della Calabria.

Abstract

The integration of GPS and inertial systems is very interesting for their many technological applications. The MEMS technology allows the realization of new miniaturized low cost sensors. These sensors, matched with miniaturized GPS receivers, are the basis of complete low cost and low weight navigation systems.

The paper, after an examination of common commercial low cost sensors, debates the problems of GPS/INS integration. The problems related to the integration of several INS/GPS systems on a single platform are discussed; information about a research under development at University of Calabria are provided.

Introduzione

La tecnologia dei sensori si è negli ultimi anni notevolmente evoluta verso una miniaturizzazione sempre più spinta della componentistica e una gestione software delle funzionalità sempre più complessa e sofisticata.

L'integrazione di sensori giroscopici e accelerometri triassiali in un'unica strumentazione costituisce un sistema inerziale (INS) che, utilizzato sinergicamente con una strumentazione GPS, permette la costruzione di sistemi di navigazione più precisi, affidabili ed efficienti.

I sistemi inerziali garantiscono, infatti, un funzionamento continuo con errori di posizionamento crescenti con la durata del tempo di osservazione; l'integrazione con il sistema GPS diventa perciò notevolmente vantaggiosa, per la possibilità da una parte di correggere la deriva tramite le misurazioni effettuate dal GPS e dall'altra di permettere la navigazione anche nelle zone di copertura dei segnali dei satelliti; viene favorita, inoltre, una rapida reinizializzazione del ricevitore GPS a seguito della perdita del segnale.

Tra i sistemi inerziali quelli *gimbaled* che isolano i misuratori di accelerazione dai movimenti del veicolo sul quale essi sono installati, sono attualmente meno utilizzati dei sistemi *strapdown*. In

questi ultimi il raggruppamento di sensori inerziali (giroscopi e accelerometri) è fissato al telaio del veicolo e con esso è solidale negli spostamenti. Bisogna quindi integrare le equazioni del moto tenendo conto dei sei gradi di libertà del corpo nello spazio. Rispetto ai sistemi *gimballed* occorre introdurre un modulo per la trasformazione di coordinate dal sistema del veicolo al sistema inerziale. Inoltre occorre compensare le misure accelerometriche per tenere conto degli errori indotti dalla rotazione del corpo che induce accelerazione centrifuga negli accelerometri.

L'integrazione GPS/INS permette lo sviluppo di alcune applicazioni che non sarebbero consentite con l'uso di uno solo dei due sistemi come, ad esempio, i sistemi di controllo automatico di precisione per veicoli terrestri, di atterraggio automatico per aerei e in generale di controllo dei mezzi utilizzati per tutte le attività antropiche.

I costi delle strumentazioni inerziali e GPS, adesso notevolmente ridotti rispetto anche al recente passato, permettono l'utilizzo combinato di più piattaforme inerziali installate sullo stesso veicolo ed interagenti tra loro. Ovviamente la gestione di tali sistemi più complessi necessita di un'architettura software più sofisticata che riconduca ad un unico sistema di riferimento spazio-temporale le misurazioni acquisite dalle singole strumentazioni.

Recenti sviluppi della tecnologia dei sistemi inerziali

I sistemi inerziali di costruzione più recente ed attualmente in commercio sfruttano principi fisici differenti. Particolare importanza riveste la tecnologia dei MicroSistemi Elettro-Meccanici (MEMS).

Tali apparati concentrano in pochissimi centimetri tutte le funzionalità dei giroscopi ed accelerometri triassiali e forniscono in output un segnale analogico o digitale; vari tipi di interfaccia seriali o parallele permette la connessione con il computer che elabora anche i segnali provenienti dalla strumentazione GPS.

I giroscopi MEMS rilevano generalmente la velocità di rotazione di un corpo in termini di gradi al secondo rispetto ad un sistema di riferimento. Normalmente il principio fisico sfruttato è l'effetto di *Coriolis*. La tecnologia adottata realizza i giroscopi MEMS secondo due modalità fondamentali, riassunte in tabella, con risoluzione massima ottenibile, in entrambi i casi, compresa tra 0,01 deg/s e 2 deg/s.

<i>Tecnologia</i>	<i>Principio fisico</i>	<i>Attuazione</i>	<i>Rilevamento</i>
<i>Quartz Tuning Forks</i>	Effetto di <i>Coriolis</i>	piezoelettrica	piezoelettrico
<i>Silicon Micromachining</i>	Effetto di <i>Coriolis</i>	Piezoelettrica elettrostatica elettromagnetica	Piezoelettrico capacitivo

Tab. 1 – Caratteristiche costruttive dei giroscopi MEMS

I sensori di accelerazione sono invece sostanzialmente costituiti da una massa inerziale sostenuta da supporti elastici di comportamento riconducibile a quello delle molle. Sotto l'azione di un'accelerazione la massa inerziale si sposta dalla posizione di equilibrio e lo spostamento viene convertito in un segnale elettrico dal quale si estrae l'output del sensore.

Integrazione INS/GPS

L'integrazione tra un sistema inerziale e un sistema GPS richiede dapprima una sincronizzazione spazio-temporale dei sistemi di riferimento del misuratore inerziale e del GPS.

Qualora i sistemi inerziali utilizzati siano più di uno, occorre procedere a uniformare i loro sistemi di riferimento e le equazioni del moto. Tali trasformazioni si semplificano qualora si supponga un collegamento rigido tra le piattaforme di misurazione inerziale.

L'integrazione delle misurazioni ottenute con GPS e con misuratori inerziali viene effettuata con un filtro di Kalman e può essere condotta secondo due modalità differenti: *loosely coupled system* oppure *tightly coupled system*.

Nella prima modalità le misure GPS vengono utilizzate per correggere gli errori della misurazione ottenuta con i sensori inerziali. In sostanza le misure GPS vengono dapprima analizzate separatamente con un filtro di Kalman ricavando una stima della posizione e della velocità, e quindi queste informazioni sono utilizzate per correggere la posizione ed i parametri del moto misurati dal sistema inerziale.

Nella modalità *tightly coupled system*, invece le informazioni raccolte dal GPS e dal sistema inerziale sono analizzate contemporaneamente mediante un filtro di Kalman che provvede a correggere simultaneamente le informazioni di posizione. Questa ultima metodologia, a fronte di una maggiore complessità, garantisce una maggiore flessibilità di utilizzo in particolare quando sono visibili meno di quattro satelliti. Il filtro di Kalman in questa modalità viene utilizzato per analizzare i dati di posizionamento sia all'indietro che in predizione mediante un algoritmo di *smoothing*. Ciò appunto garantisce un gap minore degli errori INS che crescono con il tempo di misurazione soprattutto in assenza di segnale GPS.

Piattaforme inerziali rigidamente collegate tra loro

L'integrazione tra sensori inerziali e GPS richiede, come detto, una sincronizzazione temporale delle misure acquisite ed una trasformazione di coordinate che riconduca ad un unico sistema di riferimento esterno (*mapping system*), le misure acquisite dai sensori inerziali e dal sistema GPS.

Se si indicano con:

r_p^m il vettore coordinate di un generico punto P nel sistema di riferimento esterno (*mapping system*);

$r_{GPS}^m(t)$ il vettore coordinate dell'antenna GPS al generico tempo t nel *mapping system*;

$R_{si}^m(t)$ i parametri misurati della matrice di rotazione tra sistema di riferimento del sensore i e *mapping system* al tempo t;

r_{GPS}^{si} il vettore coordinate dell'antenna GPS rispetto al sistema di riferimento del sensore i

μ_{pi} il fattore di scala per la trasformazione di coordinate relativa al sensore i nel *mapping system*;

r_p^{si} il vettore coordinate del generico punto P nel sistema di riferimento del sensore i;

sarà:

$$r_p^m = r_{GPS}^m(t) + R_{si}^m(t) (r_{GPS}^{si} - \mu_{pi} r_p^{si})$$

Le relazioni sopra scritte saranno in numero pari al numero di sensori presenti.

E' evidente che se i sensori sono rigidamente collegati tra loro, le matrici di rotazione $R_{si}^m(t)$ sono relazionate tra loro. La sovrabbondanza di osservazioni permette, quindi, a fronte di una maggiore complessità del problema, un filtraggio degli errori più accurato.

La ricerca in corso presso l'Università della Calabria

Il sistema di navigazione integrato in fase di progettazione presso l'Università della Calabria prevede l'implementazione di un sistema inerziale costituito da un accelerometro triassiale e un giroscopio triassiale. E' integrato inoltre un sensore di temperatura con range di misurazione da -40° a 85° che provvede alla calibrazione della sensitività, bias ed allineamento. Il range di misurazione dei giroscopi è di $\pm 300^\circ/\text{sec}$, mentre quello degli accelerometri è di ± 10 g. La risoluzione dei dati misurati è di 14 bit.

Il fattore di bias per i giroscopi è di $0,015^\circ/\text{sec}$, mentre per gli accelerometri è di ± 20 mg.

Le dimensioni del sistema inerziale sono estremamente ridotte e pari a pochissimi centimetri per lato.

Il ricevitore GPS è un modello multifunzione a 12 canali, con memoria interna di 56 Mb, interfaccia USB e seriale RS232 con uscita dati NMEA, antenna quadrifilare integrata, nonché dotato di

barometro e bussola elettronica. Il ricevitore è abilitato per la ricezione del segnale WAAS/EGNOS. L'autonomia delle batterie è di circa 30 ore.

In una prima fase della ricerca saranno effettuati *test* sul sistema inerziale, valutandone le prestazioni su traiettorie note. I segnali provenienti dall'accelerometro e dal giroscopio triassiale sono analizzati e, modellando opportunamente la gravità, forniscono orientamento e posizione in un sistema di riferimento assoluto. Le prove su traiettorie note consentiranno una modellazione degli errori del sistema.

Per la navigazione, le misure del GPS devono essere rese sincrone con le misurazioni del sistema inerziale e quindi formeranno, con le equazioni di posizione dell'INS, un sistema la cui soluzione fornisce posizione, orientamento, velocità e accelerazione. Un'analisi con filtro di Kalman provvederà a correggere gli errori di posizionamento trovando la soluzione ottimale del sistema sopra detto.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia da riviste:

A.D. King, B. Sc. Frin, 1998 - *Inertial Navigation – Forty years of evolution* – GEC Review, vol. 13, NO. 3

Mohamed M.R. Mostafa, 2000 – *Digital Multi-Sensor Systems – Calibration and performance analysis* – OEEPE_publ_n_43_4_5

Martin Salzmann, 1993 – *Least Squares Filtering and Testing for Geodetic Navigation Applications* Netherlands Geodetic Commission Publication on Geodesy New Series Nr. 37.

Sherryl H. Stovall, 1997 – *Basic Inertial Navigation* – Naval Air Warfare Center Weapons Division China Lake California

Alison Brown, Dien Nguyen, Yan Lu, Chaochao Wang, 2005 – *Testing of Ultra Tightly-Coupled GPS Operation Using a Precision - GPS/Inertial Simulator* – Proceedings ION GNSS September 2005

N. Shantha Kumar and T. Jann, 2004 – *Estimation of attitudes from a low cost miniaturized inertial platform using Kalman Filter based sensor fusion algorithm* – Sadhana vol. 29 Part 2 April 2004

Alexander T. Ihler, Randolph L. Moses, John W. Fisher III, Alan S. Willsky – *Nonparametric Belief Propagation for Self-Calibration in Sensor Networks* – IPSN 04 April 2004

Progetto SISA COREP – *Microsensori MEMS: Lo stato dell'arte* – 15 gennaio 2007

Bibliografia da convegni e seminari

Klaus Peter Schwarz and Dr. Naser Al Sheimy, 2004 – *Mobile Mapping Systems - State of the art and future trends* – ISPRS Istanbul 2004

Sultan Kocaman, Hilmar Hingensand, 2003 – *GPS and INS Integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery* - ETH Hönggerberg, Zürich Institute of Geodesy and Photogrammetry GEODETIC SEMINAR REPORT

Naser El Sheimy, Mohamed Moustafa, Charles Toth, Dorota Grejner Brzezinska – *Mobile Mapping System Tutorial* – Padova MMT 2007

Bibliografia da libri

Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, 2001 – *Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab Second edition* – Wiley Interscience Publication John Wiley & Sons Inc.

Simon Haykin, 2001 - *Kalman Filtering and Neural Networks* - Wiley Interscience Publication John Wiley & Sons Inc.

Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews, 2001 – *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration* - Wiley Interscience Publication John Wiley & Sons Inc.