

ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI SISTEMI DI POSIZIONAMENTO E ORIENTAMENTO PER VEICOLI STRADALI

Raffaella BRIGANTE (*), Guido fastellini (*), Fabio RADICIONI (*),
Armando SCHIAVONI (*), Aurelio STOPPINI (*)

(*) Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Via Duranti, 93, 06125 Perugia, topos@unipg.it

(**) ITALECO S.p.A., via Ostiense 131/L, 00154 Roma - tel. 06454095234, a.schiavoni@italeco.it

Riassunto

Il D.M. 1/6/2001 impone agli enti proprietari e/o gestori di strade di dotarsi di un Catasto delle strade da mantenere aggiornato nel tempo. In tale ambito, il Laboratorio di Topografia del DICA ha approfondito l'aspetto topografico della descrizione del tracciato stradale attraverso l'allestimento di un van, che è stato dotato di quattro ricevitori GNSS doppia frequenza abilitati al campionamento delle osservazioni satellitari con frequenza a 5 Hz, e di un sistema Applanix PosLV, costituito di: piattaforma inerziale IMU Pos LV 420, due antenne GPS doppia frequenza e un odometro. Le soluzioni ottenute dai ricevitori GNSS sul veicolo in cinematico post-processato sono state sottoposte a procedure semi-automatiche per filtrare gli outlier e le epoche con valori elevati di RMS e PDOP. Alle soluzioni di un tracciato è stato anche applicato un filtro Kalman *loosely coupled*. Questi risultati sono stati comparati con quelli forniti dall'elaborazione *tightly coupled* in post-elaborazione del sistema PosLV. Tali test sono stati eseguiti su uno stesso tracciato per due volte per verificare la ripetibilità delle soluzioni ottenute, e successivamente su un percorso più lungo dotato di numerosi ostacoli alla visibilità satellitare. Infine è stata analizzata con una apposita prova la deriva del sistema inerziale privato della correzione GNSS.

Abstract

An Italian law issued the first of June 2001 commands the public agencies owning or managing roads to create a Road Cadastre and to keep it up to date. In that frame, at the DICA Laboratory of Surveying has been deepened the topic of the geometrical description of a road track by means of a van, that has been equipped with four GNSS double frequency receivers set at a sampling frequency of 5 Hz, and an Applanix system including an inertial platform IMU Pos LV420, two GPS antennas and an odometer. The positions obtained from the GNSS receivers mounted on the van, in kinematic post-processing mode, have been submitted to semi-automatic filtering procedures in order to remove the outliers and the epochs with worse values of RMS and PDOP. For one route, a loosely coupled Kalman filter has also been applied. The results have been compared with those obtained by the tightly coupled post-processing solution of the PosLV system. Such tests have been performed twice on the same route, to estimate the solutions repeatability, and later on a longer route characterized by a number of obstacles to satellite visibility. Finally, a specific test has been effected to estimate the drift of the inertial system when working without GNSS correction.

1. Descrizione del lavoro

La sperimentazione è stata effettuata su tre diversi percorsi, tutti localizzati nella zona di Perugia, dei quali il primo è stato ripetuto due volte (tracciati 1 e 2 riportati in Figura 1), per avere maggiori soluzioni da valutare e verificarne la ripetibilità. Il secondo (tracciato 3 riportato in Figura 2) presenta

una lunghezza totale di circa trenta km; per esso è stato scelto un tratto di strada che presenta notevoli ostacoli artificiali (gallerie nella prima parte) e naturali (alberature lungo la seconda parte) alla visibilità satellitare. Parte del percorso è rappresentato da una strada extraurbana principale (raccordo E45-A1), perciò è stato eseguito il rilievo mantenendo velocità sostenute senza costituire intralcio al traffico presente. Un quarto test relativo alla deriva del sistema è descritto nel § 2.2.

Su un van è stato collocato un telaio rigido realizzato in profilati di acciaio e alluminio (Figura 3), appositamente realizzato per ospitare più sistemi per il posizionamento. Ai quattro vertici di un rombo sono state montate altrettante antenne Topcon *Legant*, tutte collocate alla stessa altezza per mezzo di appositi distanziatori. Il veicolo è stato inoltre dotato di un sistema di navigazione inerziale PosLV420 della Applanix Corporation, costituito da: due ricevitori GPS doppia frequenza collegati ad altrettante antenne (*Zephyr* Trimble) collocate agli estremi anteriore e posteriore del telaio, un'unità di misura inerziale (IMU) posta al centro del telaio, uno strumento per la misura di distanze (DMI) applicato sulla ruota posteriore sinistra del veicolo e un computer di sistema POS (PCS), che compie un pre-trattamento dei dati acquisiti dai sensori. Le foto di questi strumenti e delle loro collocazioni sono riportate in Figura 3. Le sei antenne sono state poste in modo da risultare allineate lungo le due direzioni principali la cui intersezione coincide con l'origine degli assi della IMU.



Figura 1 - Tracciati 1 e 2 (in primo piano le soluzioni in rosso ottenute dai ricevitori GNSS, in secondo piano le soluzioni IMU in ciano, sempre presenti, ma visibili solo nei casi di assenza delle soluzioni GNSS)

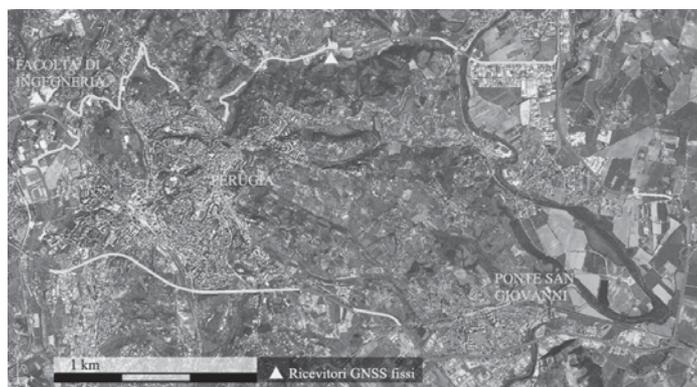


Figura 2 - Tracciato 3 (in primo piano le soluzioni in rosso ottenute dai ricevitori GNSS, in secondo piano le soluzioni IMU in ciano, sempre presenti, ma visibili solo nei casi di assenza delle soluzioni GNSS)

Il confronto è stato eseguito tra i risultati ottenuti dal sistema di navigazione inerziale PosLV420 (elaborazione eseguita attraverso il software di post-elaborazione POSpac Land 5.0 impiegando i dati GPS con campionamento 1 Hz della stazione permanente UNPG) e le soluzioni ottenute dal

merging dei dati acquisiti dalle quattro antenne GNSS. Un ulteriore controllo planimetrico è rappresentato dalla sovrapposizione all'ortofoto realizzata dalla Regione Umbria nel 2005, dei tracciati ottenuti con i due metodi.

Il veicolo è stato quindi dotato di quattro ricevitori Legacy-E_GGD (Topcon) collegati alle corrispondenti antenne Legant e abilitati all'acquisizione in doppia frequenza dei segnali GPS e GLONASS con campionamento a 5 Hz. Proprio per questa ragione non sono state impiegate stazioni permanenti come basi fisse, ma sono stati collocati due ricevitori GPS/GLONASS (Topcon *HiPer Pro*), abilitati al campionamento a 5 Hz, di cui uno nell'area della Facoltà d'Ingegneria e l'altro in una posizione tale da fornire un contributo utile sia nei primi due tracciati (breve) che nel terzo (lungo). In particolare, l'impiego del secondo ricevitore ha permesso di ottenere la doppia soluzione per ogni epoca processata, fornendo così maggiore ridondanza al rilievo, ed è stato importante nel tracciato lungo, in quanto nei punti diametralmente opposti alla stazione fissa, la lunghezza delle baselines era piuttosto elevata per un rilievo cinematico. Le due stazioni fisse sono state innanzitutto georeferenziate attraverso un calcolo di compensazione insieme alle osservazioni delle stazioni permanenti: UNPG e UPG2 (deviazioni standard inferiori ai 4 mm in planimetria e 5 mm in altimetria).

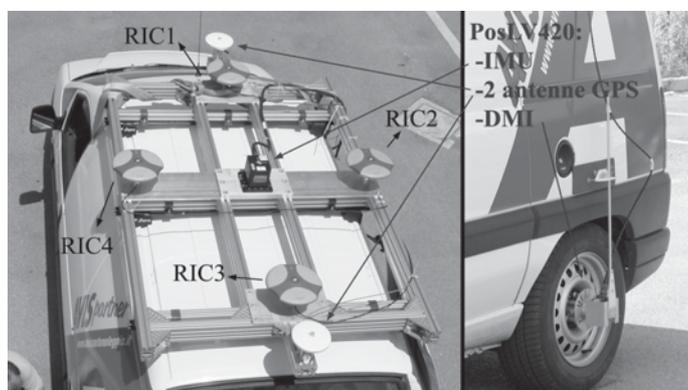


Figura 3 - Strumenti installati sul veicolo

A questo punto, per ciascun tracciato, sono state elaborate le osservazioni di ognuno dei quattro ricevitori installati sul van rispetto a entrambe le stazioni fisse. In questo modo sono state ottenute otto soluzioni (4 ricevitori x 2 basi fisse) per ogni epoca. Mediante procedure semi-automatiche, implementate in un foglio di calcolo, sono state escluse le soluzioni senza fissaggio delle ambiguità intere iniziali e tutte le soluzioni che presentavano deviazione standard superiore a 10 cm in planimetria e 20 cm in altimetria. Le soluzioni, estratte dai filtri applicati, erano corrispondenti agli estremi del rombo definito dal telaio, perciò sono state riportate all'origine del *body-frame* mediante l'utilizzo dei gli angoli *Pitch*, *Roll* e *Heading* forniti dalla IMU, infatti, essendo note e costanti le distanze tra IMU e ricevitori, è possibile ottenere da una matrice di rotazione i valori in direzione N, E ed h da sottrarre a quelli forniti dai ricevitori GPS per riportare le misure all'origine del *body-frame* per ogni epoca. Dopo tale operazione, per effettuare un ulteriore controllo relativo all'affidabilità dei valori, si sono implementate formule su un foglio di calcolo che fornissero istante per istante le distanze relative tra le soluzioni ottenute. Avendo a disposizione otto soluzioni per ogni istante, è stato necessario definire 28 formule diverse. A questo punto, sempre con procedure semi-automatiche, sono state escluse le distanze troppo elevate (80 cm rispetto a quelle rese dal sistema inerziale, infatti per effetto della deriva della IMU, in assenza di segnale GPS è verosimile arrivare ad avere tali scostamenti). Dopodichè per i valori accettabili ottenuti ad ogni epoca è stata calcolata una media pesata sommando i prodotti delle coordinate disponibili per il proprio peso (inverso del quadrato della deviazione standard), ed il risultato ovviamente diviso per la somma dei pesi. Il confronto delle soluzioni finali GNSS opportunamente trattate con tali metodi, con quelle del sistema inerziale, ha dimostrato un'ottima corrispondenza e affinità dei valori ottenuti, in quanto i metodi applicati consentono di raggiungere notevoli accuratezze nel rilievo cinematico, grazie alla

ridondanza dei dati. Come si può notare dal grafico di Figura 4, che riporta il confronto relativo al tracciato 1, le differenze sono raccolte in pochi centimetri sia in planimetria che in altimetria, mentre nelle condizioni di scarsa visibilità non si hanno soluzioni oppure si degrada notevolmente l'accuratezza. Nelle Figure 1, 2 e 4 sono ben evidenti i tratti in cui sono presenti solo le soluzioni del sistema inerziale rappresentate in ciano a dimostrazione dell'importanza di questo strumento nel rilievo cinematico.

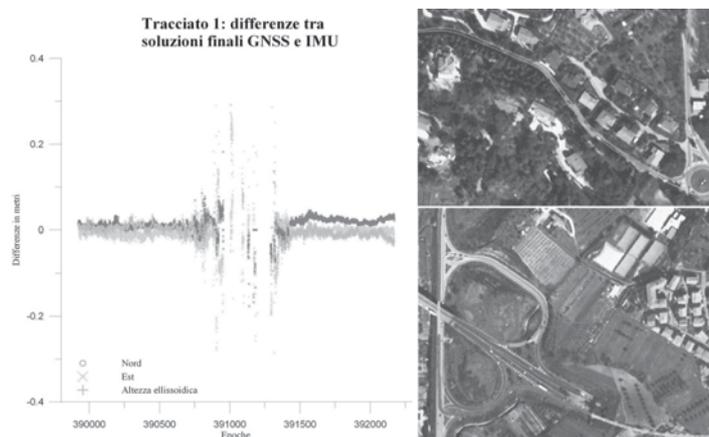


Figura 4 - Differenze tra soluzioni finali GNSS e IMU nel tracciato 1 e a destra esempi di assenza di soluzioni GNSS (in rosso) a causa di ostacoli alla visibilità satellitare

2. Esempio di applicazione del Filtro di Kalman.

Alle soluzioni relative al tracciato 2 è stato applicato un semplice filtro di Kalman *loosely coupled*, considerando le otto soluzioni dei ricevitori GNSS e i valori inerenti la velocità del veicolo in direzione N, E ed h forniti dalla INS. Il problema risulta da una parte semplificato, perché si fa solo riferimento ai valori di velocità e relative deviazioni standard fornite dalla INS, dall'altra più complesso rispetto allo standard, perché si prendono in esame le otto soluzioni GNSS. Inoltre, avendo a disposizione per questa elaborazione solo i valori forniti dalla INS con una frequenza di 5 Hz, nei tratti in cui non sono disponibili informazioni da parte dei ricevitori si notano maggiori fenomeni di deriva ed errori con ordini di grandezza inaccettabili, ma vengono comunque mantenute tutte le soluzioni per evidenziare il comportamento del filtro. Si sottolinea la necessità di introdurre un'ulteriore approssimazione, ovvero quella di considerare le misure nelle tre direzioni scorrelate, a causa dell'assenza di queste informazioni in output dell'elaborazione cinematica. Dal punto di vista analitico, il fenomeno fisico in esame può essere modellato, per ogni direzione dello spazio, considerando la posizione del veicolo all'istante t_1 e, tenendo conto della sua velocità (fornita dalla IMU), si stima (fase di *predizione*) la posizione all'istante successivo ($t_2=t_1+dt$ con $dt=0,2$ secondi):

$$x(t_2) = x(t_1) + u \cdot [t_2 - t_1] \quad [1]$$

Queste coordinate sarebbero però note con certi valori della deviazione standard dipendenti dai valori assunti per le velocità ($\sigma_x^2(t_2) = \sigma_x^2(t_1) + \sigma_u^2[t_2 - t_1]$, dove σ_u^2 è la varianza relativa alla velocità fornita dalla IMU), perciò occorre che il valore stimato venga messo in relazione con la coordinata e la relativa deviazione standard fornita dal rilievo GNSS all'istante t_2 . A questo punto, per quanto riguarda la fase di *correzione*, si è scritta una formula che consentisse, ricevitore per ricevitore, la possibilità di bypassare la correzione da parte del ricevitore stesso se questo all'istante considerato non era stato in grado di fornire una soluzione *fixed*, oppure, nel caso contrario, di calcolare la coordinata ottimale a seguito della nuova misura GNSS effettuata:

$$x(t_2) = x(t_1) + K(t_2) \cdot [z_2 - x(t_1)] \quad [2]$$

dove con z_2 si è indicata la misura della coordinata x effettuata dal ricevitore considerato, mentre con K si è indicata la matrice di guadagno o di Kalman, uguale in questo caso a:

$$K(t_2) = \sigma_{z1}^2 / (\sigma_{z1}^2 + \sigma_{z2}^2) \quad [3]$$

la relativa deviazione standard è data da $\sigma_x^2(t_2) = \sigma_x^2(t_1) - K(t_2) \cdot \sigma_x^2(t_1)$. Per ogni istante si considerano così tutte le misure disponibili, ottenendo ogni volta un valore finale per l'istante considerato, che serve poi come base per la predizione all'istante successivo, da effettuarsi secondo i valori di velocità rilevati dalla IMU. A questo punto si è deciso di effettuare anche una operazione di *smoothing* dei dati a disposizione. In sostanza, analogamente alla operazione di *predizione*, ma in questo caso a partire dal punto finale ottenuto con *predizioni* e *correzioni* ora descritte, si tratta di 'lisciare' la posizione ottenuta per i vari istanti muovendosi a ritroso nel tempo. Anche con la fase di *smoothing* non sono stati risolti i problemi evidenziati, ma in alcuni casi si sono ottenute sostanziali riduzioni degli scostamenti, soprattutto nei tratti di assenza di segnale satellitare; tale vantaggio si nota chiaramente nella parte finale dei tratti 2 e 3 in cui il processo a ritroso dello *smoothing* permette di migliorare le soluzioni del grafico a destra di Figura 5. Ovviamente il confronto delle soluzioni ottenute da questo approccio Kalman con le corrispondenti *Tightly Coupled* della IMU è improponibile, perché come detto in precedenza, si sono considerati anche i tratti senza soluzioni GNSS. Tale analisi permette di dimostrare l'importante contributo del Filtro di Kalman, soprattutto quando si applica lo *smoothing all'indietro*.

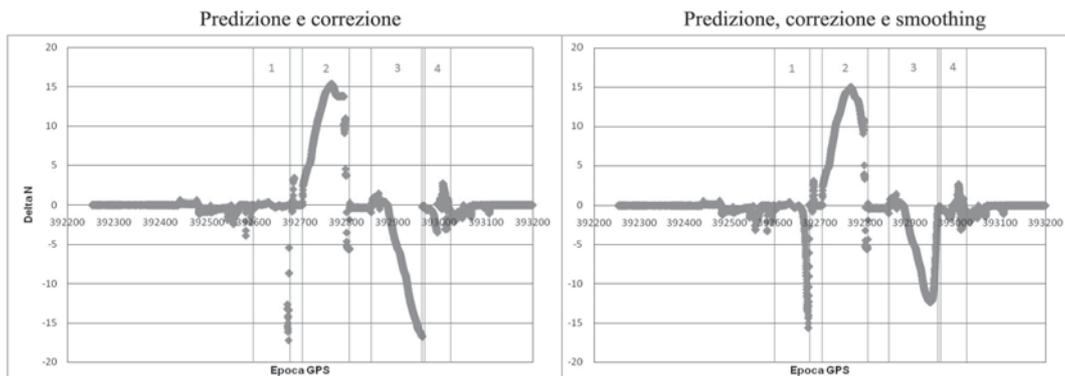


Figura 5 - Es. applicazione Filtro di Kalman al tracciato 2: differenze tra soluzioni GNSS con le corrispondenti IMU (le 4 zone evidenziate, soprattutto la 2^o, presentano notevoli ostruzioni alla visibilità satellitare)

3. Test sulla deriva del sistema inerziale.

La deriva di un sistema inerziale rappresenta un fattore fondamentale per garantire le performance di questo strumento, perciò è stato eseguito un test specifico per studiare questo aspetto. In fase di esecuzione del tracciato 4 sono state schermate con pellicola di alluminio (Figura 6) le antenne GPS del sistema inerziale, per valutarne la deriva nel tempo in assenza di correzione satellitare. Dall'epoca di oscuramento delle antenne (396922 secondi della settimana GPS), si è eseguito uno statico di circa 6 minuti, poi sono stati compiuti 15 giri del parcheggio in un tempo di circa 14 minuti, dopo circa un minuto dall'arresto (398200 secondi, Figura 6 schema in alto a sinistra) sono state scoperte nuovamente le antenne della IMU e lo statico è proseguito per altri 7 minuti (il tracciato ottenuto si sovrappone, Figura 6, alle vetture in sosta, ciò è dovuto alla diversa organizzazione della viabilità del parcheggio tra il periodo di acquisizione delle immagini utilizzate nell'ortofoto e di esecuzione del rilievo cinematico). Tramite l'elaborazione delle osservazioni GNSS acquisite dalle quattro antenne Legant e l'applicazione dei filtri citati in precedenza è stato ricostruito il tracciato seguito dal veicolo ed è stato paragonato con quello ottenuto dalla IMU, che operava senza l'ausilio delle misure satellitari, quindi in progressiva deriva. In Figura 6, per ragioni di sintesi, è riportato solo il valore della distanza relativa, in funzione dell'epoca GPS, tra la

soluzione GNSS e la posizione fornita dalla IMU: si può notare chiaramente la deriva della soluzione, ma i valori ottenuti (48 cm dopo 17 minuti) sono migliori di quelli dichiarati nelle specifiche tecniche (27 cm dopo 2 minuti); sicuramente lo statico finale di circa 7 minuti con le antenne, associate alla IMU, nuovamente scoperte, ha permesso di migliorare le soluzioni finali attraverso l'operazione di smoothing all'indietro eseguita dal software di gestione della IMU.

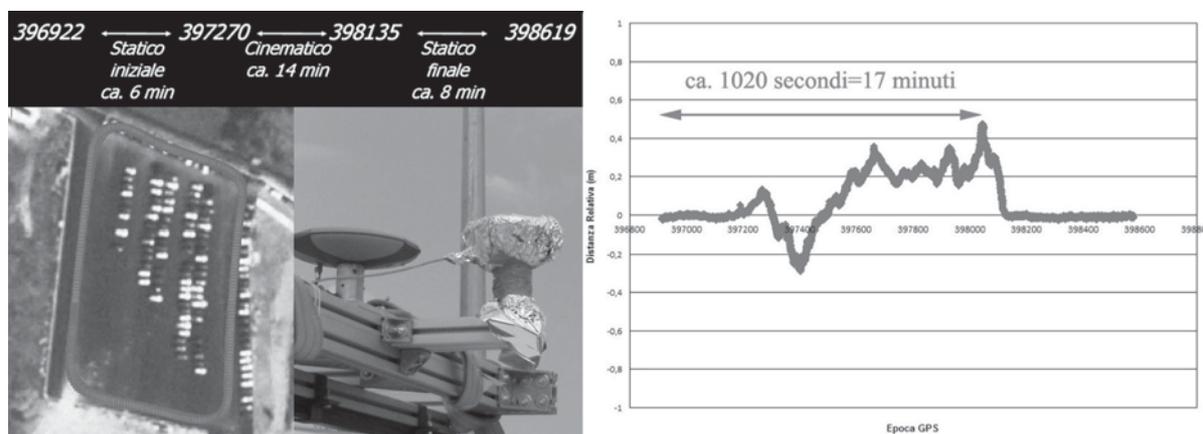


Figura 6 - Tracciato 4

4. Conclusioni

Da qualche anno il Laboratorio di Topografia esegue test relativi al posizionamento cinematico, cercando a ogni fase successiva della ricerca di introdurre nuovi sistemi e/o migliorare le procedure per lo sviluppo di un Mobile Mapping Vehicle. Nelle prime esperienze si è impiegata esclusivamente la tecnica satellitare, successivamente è stato utilizzato anche un sistema integrato GPS/IMU, sviluppato però per applicazioni marine e aeree. Questa esperienza ha permesso di approfondire innanzitutto lo studio di tecniche legate al rilievo cinematico solo di tipo satellitare, tale analisi risulta interessante in quanto esistono ancora molti sistemi impiegati nell'ambito del Mobile Mapping e del Catasto Strade che utilizzano solo ricevitori GNSS senza l'ausilio di altri sensori. In particolare si è cercato di fornire ridondanza al rilievo cinematico attraverso l'installazione di quattro antenne sul veicolo, che hanno permesso di ottenere, con le due basi installate lungo il percorso, otto soluzioni che sono state poi opportunamente filtrate. L'applicazione di un Filtro di Kalman semplificato si è dimostrata capace di migliorare notevolmente l'accuratezza delle soluzioni. La fase successiva della ricerca si è basata sull'impiego di un sistema di posizionamento molto diffuso nell'ambito del Mobile Mapping, il PosLV420, con caratteristiche prestazionali molto buone che sono state confermate nell'analisi eseguita nell'ultimo tracciato, in cui si è valutata la deriva dell'INS, risultata migliore rispetto alle specifiche tecniche dichiarate dalla casa costruttrice. L'importanza dell'ausilio di un sistema inerziale al posizionamento satellitare è stata dimostrata in tutti i tracciati, specialmente nel percorso lungo, in cui è stato possibile rilevare una serie ravvicinata di quattro gallerie a velocità relativamente elevate grazie al denso campionamento della IMU (100 Hz).

Riferimenti bibliografici

- El-Sheimy N. (1996). *The development of VISAT - A mobile survey system for GIS applications*. Ph.D. Thesis, University of Calgary, Dept. of Geomatics Engineering.
- El-Sheimy N. (2005). "An overview of mobile mapping systems". In: *Acts from From Pharaohs to Geoinformatics*.
- Salychev O. (2006). *Applied Inertial Navigation: Problems and Solution*. BMSTU, Moscow.
- Radicioni F., Fastellini G, Schiavoni A, Stoppini A. (2007). "Comparison of kinematic parameters of a moving vehicle by GNSS measurements and Inertial/GPS navigation system", *Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology*. 28-31 Maggio 2007 Padua Italy.