

VERIFICA DELLA PRECISIONE NELLA DETERMINAZIONE DELLA PENDENZA TRASVERSALE DELLA CARREGGIATA

Gabriella CAROTI (*), Andrea PIEMONTE (*)

(*) Sede di Topografia e Fotogrammetria – Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa – caroti@ing.unipi.it

Riassunto

La Sede di Topografia e Fotogrammetria del Dipartimento di Ingegneria Civile di Pisa, in collaborazione con il Centro di Eccellenza per la Ricerca in Telegeomatica dell'Università di Trieste, ha messo a punto diverse metodologie per la determinazione della pendenza trasversale delle falde della carreggiata. Questa misura viene realizzata sia mediante l'utilizzo del laser a scansione monoassiale IBEO Automotive LD GmbH, sincronizzato con il sistema Applanix POS LV, integrato sul veicolo MMS GIGI One, sia dall'elaborazione dei soli dati inerziali in output dal sistema di posizionamento. L'obiettivo di questo lavoro è quello di presentare una verifica della precisione delle diverse metodologie, sia confrontandone sistematicamente i risultati sia collaudando gli stessi con misure topografiche classiche puntuali.

Abstract

The Department of Civil Engineering (DCE), seat of Topography and Photogrammetry – Pisa University, is cooperating with the Excellence Centre for Telegeomatics Research of Trieste University, is developing several methods in order to evaluate road cross slope. This measurement is performed by means of instrumentation integrated on the MMS vehicle GIGI One. In particular, two different approaches are followed. The first one involves the use of a low cost monoaxial laser scanner IBEO Automotive LD GmbH, synchronized with an Applanix POS LV system. With the second one, the cross slope is computed only from inertial system data, with a simplified algorithm that describes vehicle dynamics. This paper will present an accuracy assessment of both methods.

Introduzione

I veicoli MMS (*Mobile Mapping System*), equipaggiati con sistemi GPS differenziali accoppiati a sistemi inerziali, sono ormai utilizzati nei campi del rilevamento in molteplici applicazioni. Tra queste, il settore in cui maggiormente vengono sfruttate le potenzialità di questi sistemi di rilevamento mobile, è sicuramente quello del rilievo delle geometrie stradali.

Le grandezze tipicamente ottenute per una strada da un *MMS* sono la curvatura, la pendenza longitudinale, la pendenza trasversale, la larghezza della carreggiata. In questo articolo vengono analizzati algoritmi e precisioni relativi alla sola misura della pendenza trasversale. Il particolare *MMS* utilizzato per questi test è GIGI One, di proprietà del Centro di Eccellenza per la Ricerca in Telegeomatica dell'Università degli Studi di Trieste. Questo veicolo è equipaggiato con un sistema Applanix POS LV INS/DGPS ed il laser scanner monoassiale a basso costo IBEO Automotive LD GmbH. I dati in output registrati tramite il sistema Applanix, che possono essere forniti ad una frequenza massima di 200Hz, sono i seguenti: coordinate del punto di riferimento del veicolo in coordinate WGS84, angoli di *roll*, *pitch* e *heading*, componenti delle accelerazioni secondo gli assi del sistema di riferimento del sistema inerziale.

Esistono numerosi algoritmi che permettono di ricavare il raggio di curvatura e la pendenza longitudinale della strada a partire dalla sequenza di punti, che individuano la traiettoria percorsa dal veicolo, ma non è possibile ricavare dai soli dati traiettografici il dato relativo alla pendenza trasversale. Per poter ottenere questa grandezza è infatti necessario possedere un'ulteriore misura,

ottenuta tramite un laser scanner, che fornisca la pendenza relativa fra veicolo e superficie stradale, oppure utilizzare l’algoritmo proposto dagli autori, che determina la pendenza trasversale dai soli dati ottenuti dal sistema inerziale e quindi senza l’ausilio di una strumentazione aggiuntiva. I test descritti in seguito sono mirati a verificare la precisione e l’accuratezza delle misure ottenute tramite l’algoritmo sviluppato.

METODOLOGIE DI RILIEVO ED ALGORITMI

Utilizzando i dati del veicolo MMS GIGI One è possibile ottenere il valore della pendenza trasversale secondo due metodologie distinte. La prima utilizza un algoritmo che calcola il valore della pendenza tramite i soli dati del sistema inerziale sulla base di un modello semplificato della dinamica del veicolo in movimento. La seconda, seguendo un approccio più classico, prevede l’utilizzo di un laser scanner monoassiale sincronizzato al sistema INS/DGPS.

Pendenza trasversale ottenuta dai soli dati del sistema inerziale (INS)

Con un modello semplificato, il veicolo viene rappresentato come un corpo rigido non rigidamente vincolato, ma legato ad un piano vincolare dall’azione di due molle, che simulano rispettivamente la coppia di ruote-sospensioni di destra e di sinistra del veicolo. Si assume per semplicità che le sospensioni abbiano comportamento elastico lineare: si tratta di un sistema bidimensionale massa-due molle, in cui la massa è un corpo rigido passibile di rotazione.

Si pensi al modello appoggiato su un piano inclinato e soggetto all’azione della gravità, oltre che di una forza trasversale; il modello intende in questo caso simulare un veicolo che percorre un tratto di strada curvilineo e dotato di una pendenza trasversale α (figura 1). Siano:

- a il valore dell’ accelerazione trasversale
- m la massa del veicolo
- G il centro di massa del veicolo
- l l’altezza sul piano del centro di massa
- d la distanza del centro di massa dall’asse
- g l’accelerazione di gravità
- k_s la costante elastica delle molle
- h la distanza fra le due molle

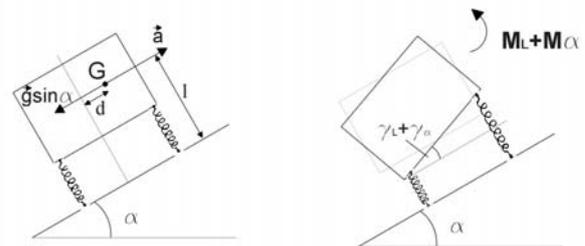


Figura 1: Configurazione indeformata e deformata su piano inclinato.

Il modello semplificato permette di ottenere la seguente relazione:

$$\alpha = \frac{Ka + roll - \gamma_a}{1 + Kg} \quad [1]$$

La pendenza trasversale della strada risulta quindi funzione dell’accelerazione trasversale e del *roll*, nonché dei due parametri K e γ_a che dipendono dallo specifico veicolo utilizzato e per uno stesso veicolo, possono variare da rilievo a rilievo. Per questo motivo, è necessaria una fase preliminare al rilievo in cui venga determinato il valore attuale dei due parametri. Le fasi di taratura del modello sono descritte nel dettaglio in un articolo degli autori pubblicato negli atti del 50° Congresso SIFET (vedi bibliografia).

Pendenza trasversale ottenuta dall’integrazione dei dati inerziali con misure laser scanner

Il sensore laser IBEO LD Automotive è stato montato a sbalzo sul lato posteriore del veicolo MMS GIGI One, in modo da realizzare il rilievo della sezione trasversale della strada. Nel caso specifico si risale alla posizione ed all’assetto del veicolo, nell’istante di scansione del laser, grazie ad un particolare circuito autonomo che genera un impulso di adeguata ampiezza ad intervalli regolari.

Questo impulso, comandato via software dall'inizio della singola scansione, giunge ad una porta di ingresso/uscita (DIO, *Digital Input Output*) presente sul sistema di posizionamento Applanix, che registra l'istante di scansione.

Tutte le misure laser sono fornite rispetto il sistema di riferimento interno del laser stesso. Tramite l'angolo di roll, misurato dall'Applanix, è però possibile ottenere le coordinate dei punti laser nel sistema degli assi orizzontale e verticale (x,y). La dispersione di punti così ottenuta viene separata nelle due dispersioni rappresentative delle due falde della carreggiata e viene calcolata la pendenza tramite il coefficiente angolare della retta di regressione lineare. Anche questa metodologia è stata descritta nel dettaglio dagli autori in un articolo pubblicato sugli atti della 10^a Conferenza Nazionale ASITA (vedi bibliografia).

Pendenza trasversale ottenuta da misure con strumentazione tradizionale

Al fine di avere dei dati rispetto ai quali confrontare i risultati ottenuti si sono effettuate delle misure a campione con la stazione totale SOKKIA SET330R. Lavorando senza prisma riflettore lo strumento fornisce un'accuratezza di 1mgon sulle misure angolari e di (3+2ppm)mm sulle misure di distanza. Eseguendo quindi una serie di misure dei punti della sezione stradale sono state ottenute le pendenze con una precisione di un ordine di grandezza superiore a quella degli altri metodi proposti. Il valore di pendenza così calcolato può quindi essere considerato, ai fini della nostra verifica, come il valore vero.

RISULTATI SPERIMENTALI

I dati sperimentali riportati nei paragrafi successivi si riferiscono a due rilievi. Il primo è stato realizzato nel mese di luglio del 2006 sulla strada statale n.1 Aurelia tra gli abitati di Rosignano e Campolecciano, vicino a Livorno, per una lunghezza totale di 12km. Il secondo è stato realizzato, invece, nel mese di febbraio 2007 sulla strada statale n.58 Strada Nuova per Opicina, vicino a Trieste, per una lunghezza totale di 7km. Nel caso della ss.1 si dispone di un rilievo singolo tramite MMS in andata e ritorno e di un set di 17 sezioni di controllo, realizzate con stazione totale. Nel caso della ss.58 sono stati realizzati tre rilievi in andata e tre in ritorno. I rilievi dispongono sia dei dati INS sia di quelli laser e sono state realizzate 21 sezioni di controllo tramite stazione totale.

Correlazione fra valore della pendenza trasversale e scarti

Inizialmente si è voluto verificare che la precisione delle misure, ottenute tramite l'algoritmo sviluppato, non dipendesse dal valore dell'angolo misurato.

A questo scopo sono stati calcolati gli scarti delle misure INS rispetto il valore vero di riferimento, ottenuto dalle sezioni rilevate manualmente. Nel grafico di figura 2 è riportata la dispersione di questi dati per i 145 scarti disponibili.

La correlazione fra scarti e valore della pendenza trasversale è praticamente nulla su un campione che permette un'ottima significatività. Si può dunque supporre che l'algoritmo permette una determinazione della pendenza trasversale con una precisione, che non dipende dal valore della pendenza stessa e quindi dal fatto che si stia percorrendo un tratto rettilineo, una curva a destra o una a sinistra.

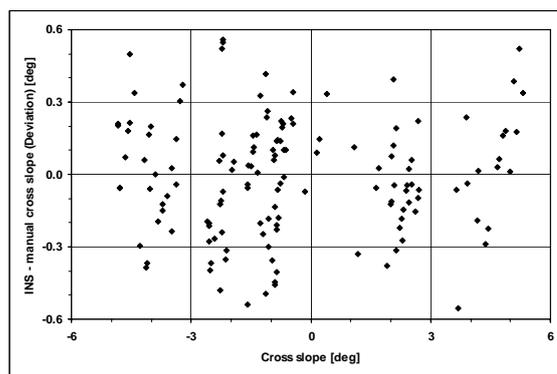


Figura 2: Dispersione delle coppie di valori di pendenza trasversale e scarti (INS-misure tradizionali).

Confronto fra le misure ottenute tramite soli dati inerziali e da strumentazione tradizionale

Non essendoci correlazione fra scarti e valori della pendenza trasversale è stata studiata la distribuzione degli scarti di tutte le misure INS rispetto le sezioni di controllo. In figura 3a sono

riportati i grafici dei valori delle pendenze trasversali ottenuti tramite INS e di quelli ricavati da misure manuali per tutti i 145 valori di confronto. L'analisi statistica è quindi condotta su un campione eterogeneo per quanto riguarda il valore delle pendenze considerate.

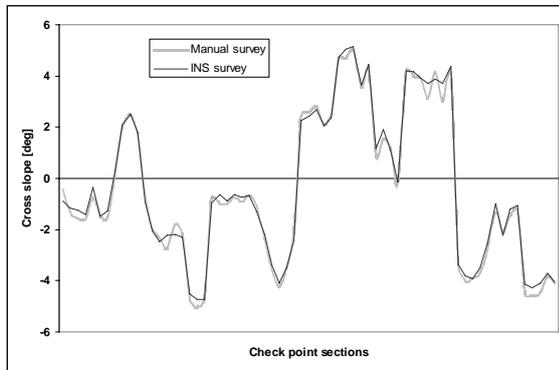
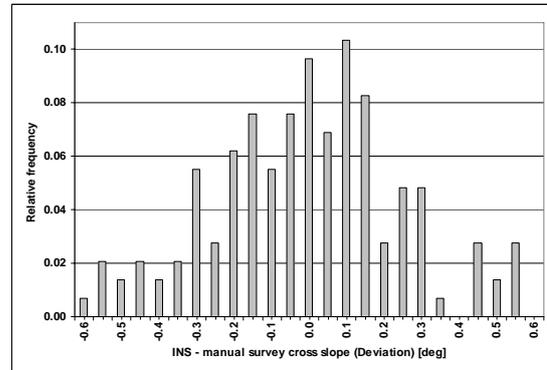


Figura 3: a) Confronto misure INS-tradizionali



b) Distribuzione degli scarti

La distribuzione degli scarti (figura 3b) delle misure è caratterizzata da una *standard deviation* di 0.26° ed una media di $+0.03^\circ$. Se ne deduce, quindi, che l'algoritmo sviluppato non è affetto da errori sistematici e permette una buona precisione nella determinazione della pendenza trasversale.

Confronto fra le misure ottenute tramite soli dati inerziali e misure integrate laser-INS

Per l'onerosità dell'esecuzione delle misure manuali il numero di sezioni di controllo tramite stazione totale, pur essendo consistente, non è paragonabile al numero delle determinazioni INS.

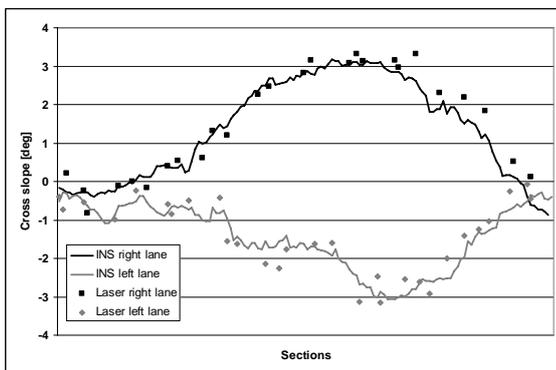


Figura 4: Misure laser e INS a confronto in una curva

Queste ultime infatti possono essere prodotte ad una frequenza pari a quella del sistema INS/DGPS e quindi fino a 200Hz. Nel rilievo della ss.58 si dispone di una determinazione di pendenza trasversale ogni metro, per un totale di 41088 misure. Per questo rilievo, però, si dispone anche delle misure ottenute tramite il laser scanner IBEO. Nelle tre ripetizioni dei percorsi di 7km di andata e ritorno sono state ottenute complessivamente 5300 determinazioni della pendenza trasversale da laser. Si è pensato quindi di realizzare un confronto sistematico fra i valori ottenuti tramite le due metodologie.

Nel confronto sistematico fra misure INS e laser sono state escluse le determinazioni laser riguardanti la

corsia opposta rispetto a quella di marcia perchè soggette ad un elevato rumore provocato dalle vetture in transito. Il confronto è quindi realizzato fra 2650 misure laser e tre set di 2650 misure INS corrispondenti alla medesima progressiva dell'asse, per un totale di 7950 campioni. In figura 4 è riportato a titolo di esempio il confronto fra le due determinazioni nel tratto della ss.58 fra il km 0+460 ed il km 0+600. Preso il valore ottenuto dal sistema laser come riferimento, è stata fatta anche in questo caso una verifica preliminare per evidenziare la non correlazione fra il valore della pendenza trasversale misurata e lo scarto fra la misura INS e quella laser. Come risulta evidente dalla dispersione dei punti in figura 5a, non si riscontra una tale correlazione e si può nuovamente ipotizzare che la precisione della misura sia indipendente dal valore misurato.

Si è quindi costruita la distribuzione degli scarti per i 7950 campioni. Dall'analisi di questa distribuzione, riportata in figura 5b, risulta una deviazione standard di 0.38° ed una media degli scarti pari a $+0.07^\circ$. Nel confronto fra misure INS e manuali si era trovata una media degli scarti di 0.03° . Dato il valore molto piccolo si era concluso che non c'erano sistematismi nel sistema di

misura. Nel confronto fra dati *INS* e laser si trova nuovamente una media degli scarti positiva e maggiore della precedente.

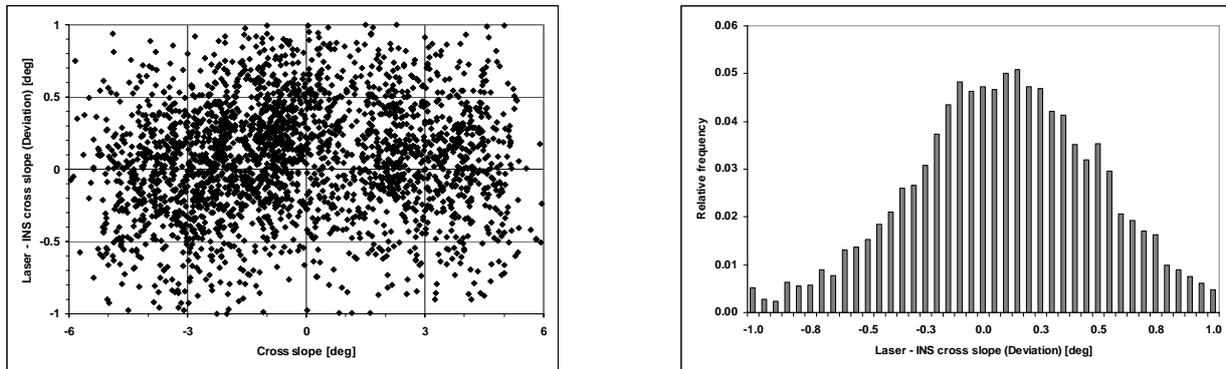


Figura 5: a) Dispersione delle coppie di valori di pendenza trasversale e scarti (*INS-laser*).
b) Distribuzione degli scarti (*INS-laser*).

Questo risultato evidenzia in effetti un problema legato alla misura della pendenza trasversale. La corsia di marcia non è normalmente una superficie piana e quindi la sua sezione non è rappresentata da un segmento di retta, ma da una curva. Sia il laser che le misure topografiche fanno riferimento a numerosi punti appartenenti alla sezione e la pendenza trasversale misurata risulta quella della retta che interpola questi punti. Facendo invece il rilievo con il veicolo MMS si ottiene la pendenza riferita ai punti di contatto delle ruote del veicolo stesso con la strada. Ipotizzando che il veicolo viaggi nel mezzo della corsia, i valori ottenuti tramite le diverse metodologie non variano di molto, ma possono presentare, come nelle distribuzioni considerate, una media degli scarti scostata, seppur di poco, dallo zero. Anche dai dati del rilievo della ss.58 è evidente che lo scostamento è maggiore nei tratti di strada con una pavimentazione vecchia e minore nei tratti con nuova pavimentazione.

Filtraggio dei dati

Le considerazioni fatte nel paragrafo precedente evidenziano una certa rumorosità delle misure, ottenute tramite MMS, dovuta alle irregolarità della pavimentazione stradale. La rumorosità aumenta nelle strade con una pavimentazione vecchia, che rappresentano spesso la maggior parte della rete stradale. In questi casi il dato puntuale di misura *INS* può perdere di significato se non interessa il segnale ad alta frequenza delle irregolarità della pavimentazione. In questo caso può essere più opportuno filtrare il dato puntuale tramite una media mobile ed ottenere un andamento medio locale dei valori della pendenza trasversale.

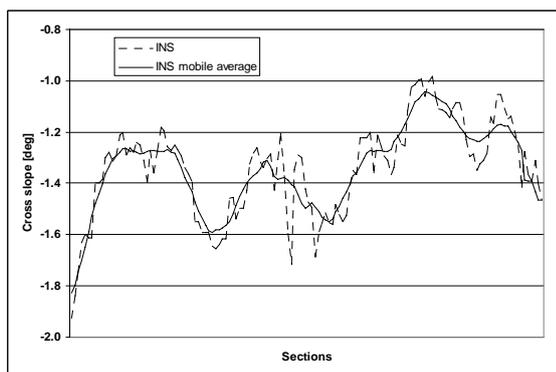


Figura 6: Media mobile sui dati di pendenza lungo un rettifilo

Nelle elaborazioni d'esempio è stata scelta una finestra per la media mobile di dieci valori. In figura 6 è riportato l'esempio di un rettifilo di una strada con pavimentazione vecchia in cui è evidente una pendenza trasversale media del 2% circa. La funzione della pendenza trasversale in rettifilo per il ruscellamento può essere verificata anche eliminando il segnale in alta frequenza.

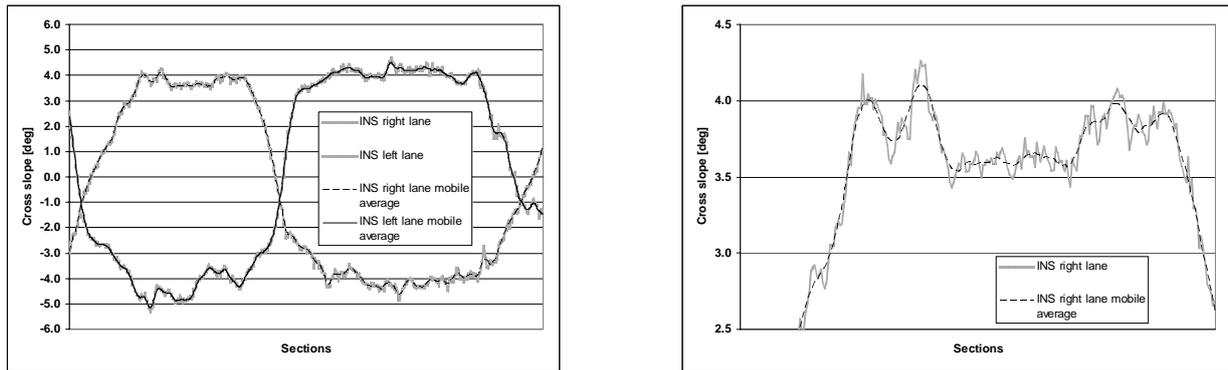


Figura 7: a) Media mobile sui dati di pendenza lungo una curva b) Dettaglio sulla stessa curva

Nella figura 7a è riportata la sequenza di due curve, una a destra ed una a sinistra. Considerando il dato filtrato risulta chiara la transizione fra le curve con un tratto in rettilineo in cui le due falde della carreggiata hanno entrambe una pendenza di circa -1° (2%). In figura 7b è riportato un sottoinsieme di dati dell'esempio precedente riguardante la corsia di sinistra.

Conclusioni

Dall'analisi dei dati raccolti risulta che l'algoritmo sviluppato per calcolare la pendenza trasversale grazie ai soli dati *INS* fornisce un'ottima accuratezza ed una buona precisione. Dalle serie temporali dei dati puntuali è stata messa in evidenza la presenza di un segnale ad alta frequenza, costituito dalle irregolarità della pavimentazione, che nel modello teorico si presenta invece come una superficie piana ideale, inclinata dell'angolo di pendenza trasversale. Inoltre, il confronto realizzato puntualmente di fatto non assicura che la sezione considerata sia esattamente la stessa nelle tre metodologie, manuale, laser e *INS*. Ci potrebbero essere degli scostamenti fra sezioni dell'ordine di qualche decina di centimetri, dovuti alla precisione della georeferenziazione delle sezioni stesse.

Si può inoltre osservare che è fondamentale diverso realizzare un rilievo di una strada con nuova o vecchia pavimentazione. Nel caso di strade nuove la pavimentazione è più uniforme, le misure sono meno rumorose ed i valori ricavati da *INS* sono più facilmente confrontabili con quelli delle misure manuali. Nel caso di strade vecchie, la presenza del rumore dovuto alle irregolarità, non solo rende il confronto più difficile, ma può dare in generale dei problemi nel definire, anche teoricamente, quale sia la pendenza trasversale da considerare. Per una migliore analisi della precisione della metodologia sono in progetto nuovi test, diversificando innanzitutto l'analisi per le due tipologie di pavimentazione. Si otterranno così due dati di precisione: per il caso "ideale" di strada con nuova pavimentazione e per il caso "reale" di strada con presenza di irregolarità diffuse.

Verranno considerati tratti di strada più corti da percorrere un numero elevato di volte, in modo da avere più valori da confrontare per la stessa sezione. Sugli stessi tratti verranno eseguite, inoltre, un numero maggiore di sezioni con misure manuali, utilizzando eventualmente un laser terrestre 3D.

Riferimenti bibliografici

- Caroti G., Piemonte A. (2006) "Ricostruzione 3D della sede stradale da scansioni laser realizzate in movimento" *Proceedings 10^a Conferenza Nazionale ASITA*.
- Bolzon G., Piemonte A. (2005) "Stima delle pendenze trasversali della strada tramite misure IMU a fini catastali" *Proceedings 50^o Convegno SIFET*.
- Pagurut R. (2005) "Gestione dei sensori di un MMS terrestre" *PHD Thesis*, XVII ciclo del dottorato in Geomatica e Sistemi Informativi Territoriali, Università degli Studi di Trieste.
- Manzoni G., Martinolli S., Pagurut R., Palermo C., Purga A., Sluga T. (2003) "Road survey by GIGI: status and results" *Proceedings of the Bilateral Geodetic Meeting Italy-Poland*.

Ringraziamenti

Si ringraziano i tecnici geom. Jessica Micheloni, dott. Andrea Bedini e dott.ssa Shaula Martinolli per il supporto durante le fasi di rilievo.