RICOSTRUZIONE 3D DELLA SEDE STRADALE DA SCANSIONI LASER REALIZZATE IN MOVIMENTO

G. Caroti(*), A. Piemonte(*)

(*) Sede di Topografia e Fotogrammetria – Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa

Riassunto

I *Mobile Mapping System* dedicati al rilievo per catasto strade sono generalmente dotati di ricevitori GPS, integrati da opportuni sistemi inerziali, sincronizzati con una o due camere fotografiche dalle quali è possibile ricavare le diverse caratteristiche geometriche e descrittive della sede stradale.
La misura di pendenza trasversale e quindi la definizione delle sezioni trasversali della carreggiata sono state affrontate secondo diverse metodologie ma restano ancora oggetto di studio e ricerca.
In questo lavoro si sfrutta la sincronizzazione di un laser scanner, posto posteriormente sull'asse longitudinale di un MMS, con la strumentazione di posizionamento e quindi con i dati di assetto del veicolo.
Le scansioni grezze, realizzate in movimento, risultano riferite al sistema di riferimento polare relativo al laser. Grazie ai dati di posizione ed ai dati di rollio, beccheggio ed azimut, ricavabili dal sistema GPS-INS, è possibile rototraslare il sistema di riferimento arbitrario del laser, facendolo coincidere con il sitema di riferimento cartografico locale.
In tal modo la successione delle singole scansioni va a generare una nuvola georiferita di punti, che rappresenta tridimensionalmente la sede stradale percorsa. Da questa nuvola di punti, è possibile ricostruire le sezioni della carreggiata e quindi ottenere le pendenze trasversali desiderate.
Vengono presentati in questo lavoro i risultati ottenuti tramite l'integrazione del laser scanner monoassiale IBEO Automotive LD GmbH sul veicolo *MMS* GIGI One del Centro di Eccellenza per la Ricerca in Telegeomatica dell'Università degli Studi di Trieste. In particolare si illustra il caso studio, relativo al rilievo della s.s.1 Aurelia nel tratto tra Rosignano e Campolecciano.

Abstract

Mobile Mapping Systems (MMS) used in surveys for road cadastre are usually equipped with GPS receivers, integrated with inertial systems as needed and synchronised with one or two cameras, from which is possible to obtain the different geometric and descriptive features of the roadbed.
Transversal slope measurements, and subsequently the definition of transversal sections, have been dealt with different methods, but remain nonetheless object of study and research work.
The present work exploits the synchronisation of a laser scanner, set along the longitudinal axis on the back side of a MMS, with the positioning instrumentation, and therefore with the trim data, of the vehicle. Raw scans, performed while moving, are referred to the laser's own polar reference system. Positioning, as well as roll, pitch and azimuth data, collected by the GPS-INS system, allow for rototranslation of the laser's arbitrary reference system onto the local cartographic one.
In this way, the series of the single scans generate a georeferred cloud point, three-dimensionally representing the covered roadbed, starting from which it is possible to achieve the needed transversal sections. This paper shows the results obtained by the integration of the monoaxial IBEO Automotive LD GmbH laser scanner on the MMS GIGIOne vehicle of the Excellence Center for Telegeomatics Research of the Trieste University.

Strumentazione e dati grezzi

La pendenza trasversale della carreggiata costituisce uno degli elementi più importanti da determinare per la sicurezza stradale ed è, allo stesso tempo, una delle misure più difficili da

realizzare ad alta produttività, restando negli standard di precisione richiesti dalla normativa sul catasto strade italiano. La soluzione proposta in questo studio affianca, ad un sistema evoluto di posizionamento di un veicolo, l'utilizzo di un laser scanner monoassiale a basso costo.
Il *Mobile Mapping System* (MMS) GIGI One del Centro di Eccellenza per la Ricerca in Telegeomatica dell'Università degli Studi di Trieste è un veicolo sul quale, già da tempo, è integrato il sistema di posizionamento Applanix POS LV ed il sensore laser monoassiale IBEO LD Automotive.
Il sistema Applanix POS LV è un sistema integrato GPS/INS per la determinazione della posizione e dell'assetto di un veicolo. E' composto essenzialmente da un elaboratore centrale (PCS: *POS Computer System*), contenente anche due ricevitori GPS Trimble, al quale giungono i dati di quattro sensori esterni: la testa inerziale (IMU: *Inertial Measurment Unit*), l'odometro (DMI: *Distance Measuring Indicator*) e due antenne GPS.
L'IMU LITTON LN-200 è il cuore del sistema. Esso è costituito da tre accelerometri e tre giroscopi a fibre ottiche ed è in grado di fornire gli angoli di rollio e beccheggio con una precisione di 0.01° e l'azimut con una precisione di 0.04° in tempo reale (in *post processing* le precisioni salgono a 0.005° e 0.02° rispettivamente).
Il GPS primario a doppia frequenza è necessario per fissare le coordinate iniziali e per limitare la deriva temporale dell'IMU (5°/ora). La precisione nel posizionaqmento dell'intero sistema dipende principalmente dalla modalità GPS di misura: metrica se si utilizza una buona fonte DGPS, decimetrica in RTK.
Il sitema utilizza entrambi i GPS, primario e secondario, per le elaborazioni GAMS (*GPS Azimuth Measurement Subsystem*), che permettono di migliorare il dato di azimut proveniente dall'IMU.
Il sensore laser IBEO LD Automotive è un distanziometro laser rotante (in classe1), alimentabile a 12VDC, provvisto di interfacce ARCnet e CAN per la trasmissione delle letture, ed interfaccia RS232 per l'aggiornamento del firmware.
La portata dello strumento è attorno ai 40m per superfici con riflettività almeno 5% (250m con riflettori), con precisione dichiarata di 5cm e campo di lettura fino a 360°. Lo strumento nasce per applicazioni automobilistiche, in particolare per la determinazione di ostacoli fissi o in movimento, ed infatti viene fornito con un software (denominato ASD), che determina in tempo reale posizione, velocità ed accelerazione relative tra gli ostacoli ed il veicolo; inoltre viene fornita una libreria DLL in C++ per la programmazione.

Figura 1 – Laser scanner monoassiale IBEO Automotive LD GmbH su GIGI One.

L'utilizzo che viene fatto di questo strumento è decisamente diverso da quello per cui è stato costruito: l'idea consiste nel montare il laser scanner a sbalzo sulla parte posteriore del veicolo ed utilizzarlo per effettuare delle scansioni a 360°, ottenendo una semina di punti rappresentanti la sezione del tratto di strada rilevato (figura 1).

Considerando che il tempo di una scansione completa è di 50ms, dovrebbe essere possibile ottenere una sezione ogni 70cm circa a 50km/h. Nelle prove effettuate è stato scelto di effettuare una scansione ogni 1000ms, quindi ogni 14m circa.
Il veicolo è in movimento durante le scansioni, quindi, a rigore, non si ottengono delle sezioni piane ma queste si sviluppano lungo un percorso elicoidale con passo dipendente dalla velocità di percorrenza. Considerando che, per effetto del moto, la scansione finisce, nella peggiore delle ipotesi, 70cm oltre il piano in cui era iniziata, si effettua un'approssimazione supponendo che ogni scansione avviene in un piano ortogonale al senso del moto.
Durante i primi esperimenti il laser ha mostrato di essere affetto da un errore sistematico che comportava una rotazione di circa 4° delle sezioni rilevate, e nella stesura del programma di estrazione dati si è compensato tale errore.
Un problema di fondamentale importanza per questa classe di veicoli è la sincronizzazione degli eventi. 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 sull'Applanix, che registra l'istante di scansione.

Elaborazione dati
Il laser registra i dati grezzi in formato esadecimale ed un primo software converte questi dati in un file ASCII in cui sono riportati il tempo laser di scansione e le coordinate cartesiane ortogonali X e Z in metri rispetto il sistema di riferimento locale del laser (figura 2).

Size: 762 Timestamp: 1733150 Duration: 1		173315 , 0.165 , 2.357
83 01 39 FF 01 02 00 00 5D 49 00 00 00 00 00 10 00 00 F7 A9		173315 , 0.210 , 2.397
0B 40 F7 A9 0B 40 00 01 00 10 01 67 F7 A9 0B 50 02 5D 02 68	→	173315 , 0.247 , 2.343
02 5C 02 5B 02 66 02 63 02 6D 02 6D 02 6C 02 69 02 68 02 78		173315 , 0.287 , 2.337

Figura 2 – Formato esedecimale dati grezzi ed *output* delle coordinate cartesiane.

Essendo la risoluzione del laser pari a 1°, per ogni sezione otteniamo 358 coppie di coordinate. Di tutti questi punti però molti costituiscono un rumore ai nostri scopi. Ne sono un esempio i punti che rappresentano le zone vegetative o gli elementi di arredo urbano circostanti la sede stradale. Inoltre, nel caso di mancato ritorno di un segnale, il laser pone convenzionalmente nell'origine il punto corrispondente (figura 3).

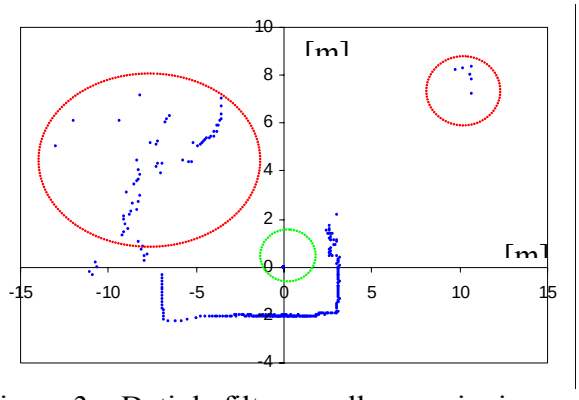

Figura 3 – Dati da filtrare nelle scansioni grezze.

L'obiettivo di questa ricerca è stato quello di scrivere delle procedure di elaborazione automatica dei dati per ricavare le pendenze delle due falde della carreggiata. Gli algoritmi sono stati implementati tramite i linguaggi di programmazione Visual Basic e Matlab. L'analisi dei dati grezzi mostra come sia necessario procedere preliminarmente ad un filtraggio di questi al fine di estrarre i

punti estranei alla sede stradale. Abbiamo preso in considerazione a tal fine due modalità a seconda che si conosca o meno la larghezza precisa della carreggiata. Se questa non è nota si è valutato di procedere ad un filtraggio grossolano, basato unicamente sul dato sperimentale probabilistico di fissare a tratti una larghezza media della carreggiata ed eliminando i dati che ricadono al di fuori di un settore circolare definito (figura 4a). Inoltre, dato che all'interno dei dati rimasti possono esserci alcuni falsi segnali, dovuti a riflessioni non dirette del segnale, che appaiono come errori grossolani, si è verificato che è possibile eliminare la quasi totalità di questi punti introducendo una maschera sulle coordinate Z ($-3 < Z < -1.5$). Se, invece, è nota la larghezza della carreggiata ogni metro, come ad esempio viene fornita, grazie all'elaborazione dei fotogrammi raccolti, dallo stesso MMS GIGI One, è possibile procedere ad un filtraggio più rigoroso.
In questo caso, supponendo di disporre della larghezza D della carreggiata per ogni punto dell'asse strada, abbiamo calcolato la distanza d tra laser scanner e asse strada (figura 4b). Il calcolo è stato possibile in quanto dal file eventi della traiettoria abbiamo ricavato le coordinate della ruota posteriore sinistra del veicolo all'istante di scansione e, noto il braccio di leva dell'origine del sistema di riferimento del laser, sono state calcolate le coordinate E e N dell'origine della nuvola di punti.
Si ipotizza che sia lecito considerare che i punti della sezione ottenuta con il laser si dispongano secondo l'ortogonale all'asse stradale, visto che l'asse X del riferimento locale coincide approssimativamente con questa direzione. Sotto queste condizioni la maschera da imporre alle coordinate X della nuvola di punti è la seguente:

$$-\frac{D}{2} - d < X < \frac{D}{2}$$

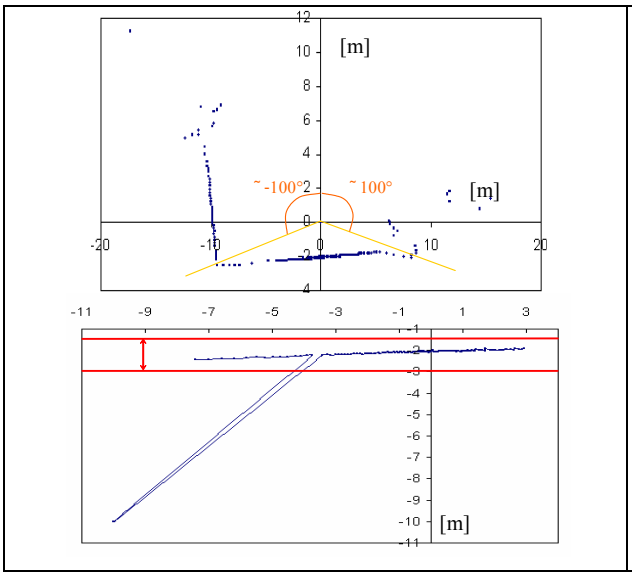

Figura 4a – Filtraggio dati grossolano

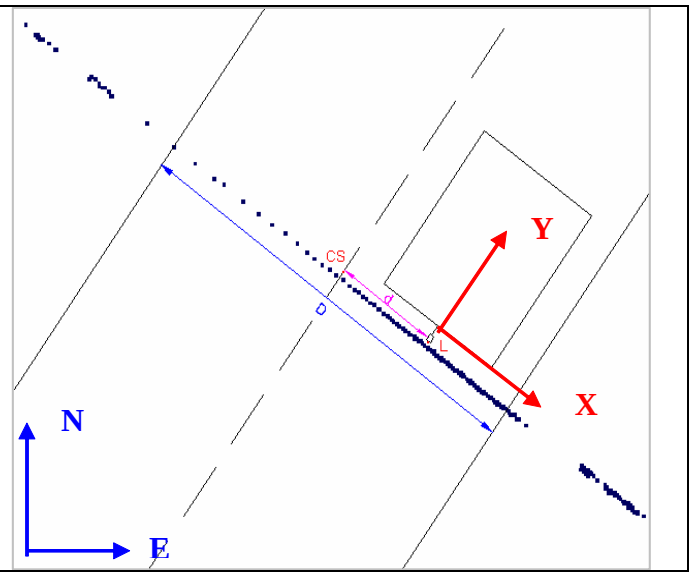

Figura 4b – Filtraggio dati rigoroso.

Dalle nuvole di punti delle singole scansioni filtrate, è quindi possibile estrarre automaticamente le pendenze trasversali delle due falde della carreggiata. Assumendo l'approssimazione che l'asse Z del sistema di riferimento del laser sia prossimo all'ortogonale al piano medio stradale ed essendo la pendenza trasversale indipendente dall'azimut, per utilizzare i punti della scansione ai fini del calcolo si è ruotato il loro sistema di riferimento attorno all'asse Y di un angolo pari a quello di rollio. Quest'angolo infatti è la somma della pendenza trasversale e dell'angolo di cui il veicolo è inclinato lateralmente a causa della dinamica del veicolo stesso. Per individuare quale dei punti della scansione costituisce il centro strada si è nuovamente utilizzata la distanza d, distanza del laser dall'asse strada, calcolata in precedenza. Il risultato di queste operazioni ha portato a distinguere la

nuvola di punti della falda di sinistra da quella di destra: calcolando il coefficiente angolare della retta di regressione lineare, che approssima la distribuzione delle due nuvole di punti, si ottiene la pendenza trasversale cercata.
Per trasformare le coordinate locali dei punti delle sezioni rilevate nel sistema di riferimento cartografico Gauss Boaga si osserva che il generico punto della sezione rilevata appartiene al piano XZ del riferimento locale, e quindi la coordinata Y è nulla per ogni punto.

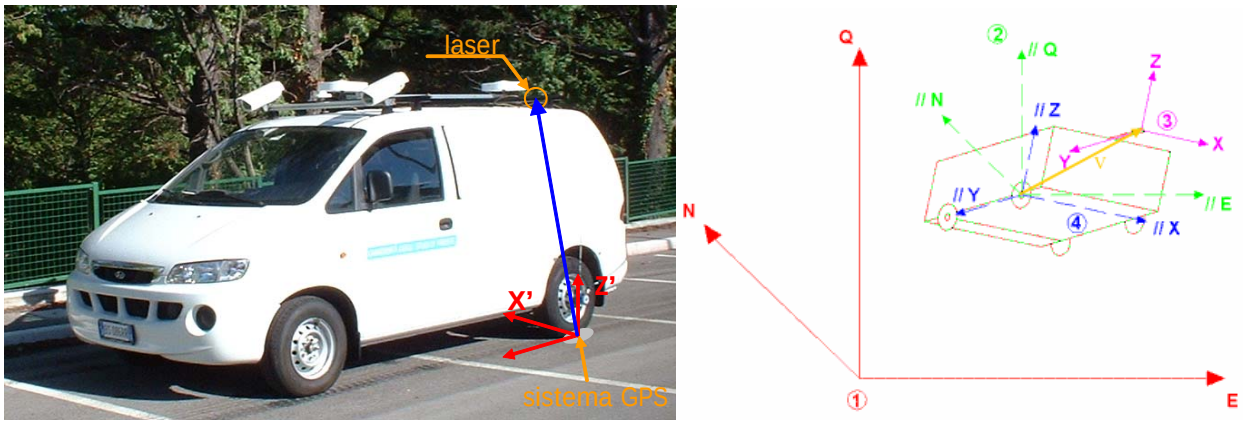

Figura 5 – Sistemi di riferimento.

Inoltre, abbiamo introdotto due sistemi di riferimento ausiliari: il primo "//X//Y//Z" derivante dal sistema XYZ traslato parallelamente a sè stesso nell'origine del sistema MMS e cioè al centro della traccia della ruota posteriore sinistra, e il secondo "//E//N//Q" derivante da una traslazione simile degli assi cartografici ENQ (figura 5). Preso il generico punto P di una scansione, trasliamo innanzi tutto il sistema XYZ in //X//Y//Z. Il vettore di traslazione, derivante da un rilievo delle diverse componenti del veicolo è [0.793, -0.335, 2.095] e quindi $P_{//X\,//Y\,//Z} = (P_X+0.793, P_Y-0.335, P_Z+2.095)$. Servendosi, quindi, degli angoli di assetto (*roll*, *pitch* e *heading* – figura 6), registrati dall'IMU per ogni singola scansione, si ruota il sistema //X//Y//Z in modo che il piano //X//Y sia complanare a //E//N e che l'asse //Y sia ruotato di un angolo pari all'azimut rispetto //N. Quindi:

$$P_{//E\,//N\,//Q} = R(roll, pitch, heading) \cdot \begin{pmatrix} P_{//X} \\ P_{//Y} \\ P_{//Z} \end{pmatrix}$$

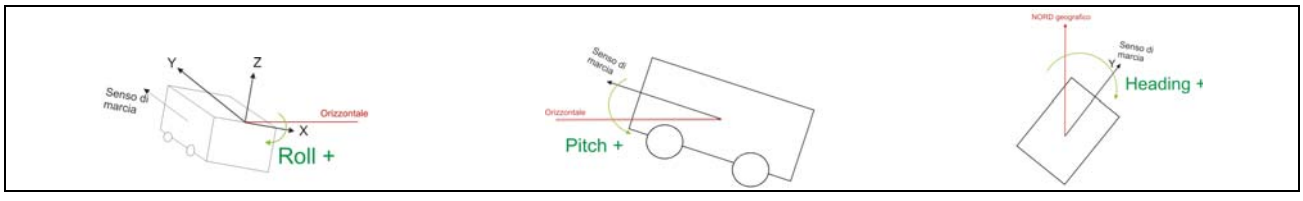

Figura 6 – Angoli di assetto del veicolo.

Infine, per operare la traslazione che riporta il sistema //E//N//Q in ENQ, si utilizza il vettore di traslazione RS_{ENQ}, costituito dalle coordinate Gauss Boaga dell'impronta della ruota sinistra, presente nel file di sincronizzazione eventi.

$$\begin{cases} P_E = P_{//E} + RS_E \\ P_N = P_{//N} + RS_N \\ P_Q = P_{//Q} + RS_Q \end{cases}$$

Questa procedura fa sì che le sezioni rilevate risultino georiferite e possano essere tracciate su di un supporto cartografico, così come riportato in figura 7 per il caso studio della ss.1 Aurelia. Una visualizzazione di questo tipo risulta di notevole ausilio sia in fase di analisi che di collaudo.

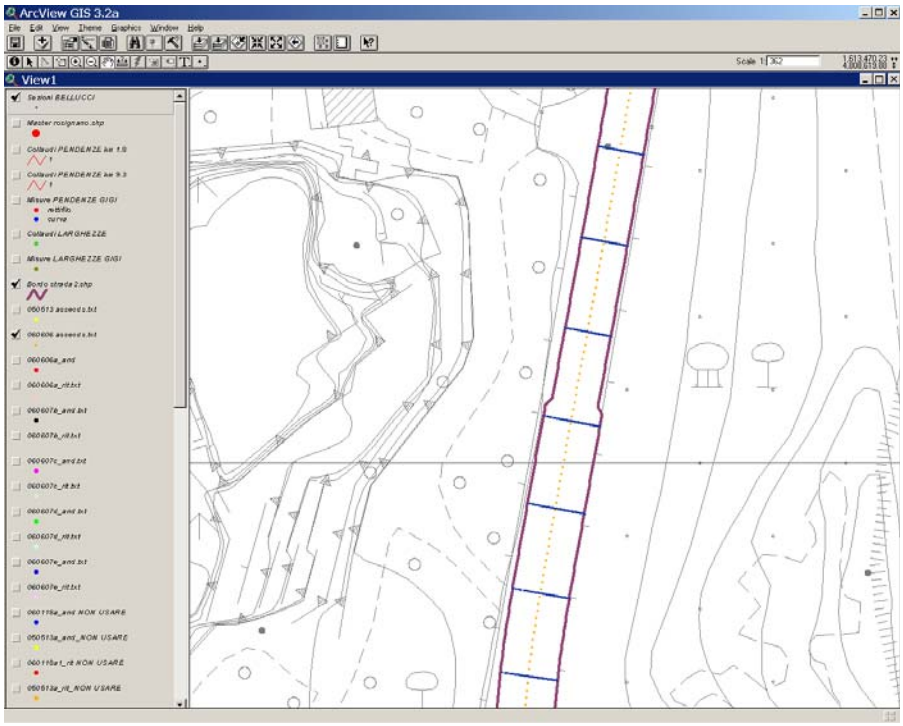

Figura 7 – Caso studio della ss.1 Aurelia km300.

Conclusioni

Gli algoritmi così sviluppati si sono rivelati efficienti ed hanno dato la possibilità di determinare le pendenze trasversali delle falde della carreggiata in modo del tutto automatico. Da verifiche di collaudo puntuali i risultati ottenuti hanno evidenziato una buona precisione. Nell'immediato futuro verrà eseguita un'analisi sistematica di tutti i dati, basandosi sui due rilievi test della ss.1 Aurelia, in provincia di Livorno, e della ss. 58 Strada Nuova per Opicina, in provincia di Trieste.

Ringraziamenti

Si ringraziano la dott.ssa Martinolli, il geom. Barrancotto ed i tecnici geom. Micheloni, dott. Bedini per il supporto durante la fase di rilievo.

Bibliografia

Bolzon G., Piemonte A., "Stima delle pendenze trasversali della strada tramite misure IMU a fini catastali", Convegno SIFET, Palermo 2005.

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, Bressanone (South Tyrol, Italy), 22-23 May 2003, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy.

Manzoni, G., Palermo, C., 2003. Il Catasto delle Strade nel progetto pilota della Provincia di Teramo, Ondaverde, 83, pp. XI-XII.