

VERIFICA PLANIMETRICA DI RILIEVI LIDAR DA AEROMOBILE TRAMITE ELEMENTI LINEARI: METODO E SPERIMENTAZIONE

Alberto BEINAT, Francesco SEPIC

Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Via cotonificio 114, 33100 Udine (Italy)
Tel 0432 558708 Fax 0432 558700 E-mail: alberto.beinat@uniud.it

Riassunto

Il lavoro considera i principali problemi relativi alla verifica planimetrica dei rilievi LiDAR da aeromobile, rivisita alcune soluzioni ed esperienze note in letteratura, e descrive infine una tecnica operativa basata sulla estrazione diretta dalla nube di punti del DSM di oggetti di tipo lineare e sulla loro verifica topografica in campagna. Tra i vantaggi del metodo, oltre a sfruttare elementi frequentemente presenti sul terreno, esso permette di realizzare agevolmente segnali di controllo specifici da posizionare preventivamente all'esecuzione dei rilievi LiDAR.

L'articolo riporta infine la sintesi di alcune esperienze relative alla verifica planimetrica di rilievi LiDAR da aeromobile condotte dagli autori secondo il metodo proposto.

Abstract

In this work we analyse some basic questions related to the horizontal assessment of the airborne LiDAR surveys. We review at first some of the relevant solutions and experiences found in the literature, and we describe a technique based on the direct extraction from the point cloud, and on the subsequent topographic assessment, of linear type entities. Among the advantages of the method, besides the many objects available in the field, specific linear targets can be easily made and installed on the ground before the LiDAR surveys are carried out.

The paper finally reports some experiences of planimetric assessment of LiDAR airborne surveys performed by the authors following the proposed method.

Introduzione

I sistemi di scansione LiDAR da aeromobile di recente produzione consentono di ottenere direttamente densità di campionamento del terreno superiori a $10 \div 20$ punti a m^2 limitando al massimo il ricorso a onerosi ripetuti sorvoli.

Il miglioramento della risoluzione planimetrica¹ permette di estendere l'interesse applicativo dei rilievi Lidar, dalla diffusa e consolidata produzione di modelli digitali del terreno (DTM), a settori finora esclusivi della fotogrammetria, come la realizzazione di cartografia a grande scala e di modelli 3D dell'edificato, derivandoli interamente dalla elaborazione della sola nube di punti senza richiedere alcun supporto fotografico.

Per queste applicazioni assumono quindi notevole rilevanza le precisioni planimetriche conseguibili dal LiDAR, come pure gli strumenti e le procedure operative per verificare sul campo (collaudare) i requisiti metrici che il rilievo LiDAR e i suoi prodotti devono soddisfare.

¹ Come regola operativa, la risoluzione planimetrica di una scansione LiDAR, nell'ipotesi ideale di campionamento regolare e omogeneo, confrontabile con la dimensione reale p del pixel fotografico corrispondente, può essere quantificata come $p = 1/\sqrt{d}$, ove d è la densità della scansione stessa. Una densità di scansione di 16 punti/ m^2 fornisce quindi una risoluzione potenziale di 0.25 m.

Le principali tecniche di collaudo

Quando il LiDAR è impiegato per la produzione di DTM o per integrare le quote di una cartografia esistente, le verifiche di precisione e di accuratezza delle misure sono rivolte essenzialmente alla componente altimetrica (assoluta e relativa). A questo riguardo le metodologie di collaudo sono ampiamente sperimentate e di agevole esecuzione. Una pratica a cui si fa spesso ricorso consiste nell'individuare nell'area di interesse una serie di superfici sub-orizzontali regolari (es. terrazze, strade, piazzole etc.) la cui estensione, variabile da 1 m² ad alcune decine di m², è rapportata alla densità del campionamento, in modo da comprendere un numero statisticamente significativo di punti. La posizione e la giacitura di queste areole sono quindi rilevate localmente per via topografica mediante misure satellitari o integrate, e successivamente confrontate con la corrispondente porzione del DSM prodotto dal laser scanner. La scelta di superfici orizzontali consente di eliminare gli scostamenti altimetrici indotti da una incorretta georeferenziazione planimetrica, che si riscontrano facilmente nel caso di superfici inclinate.

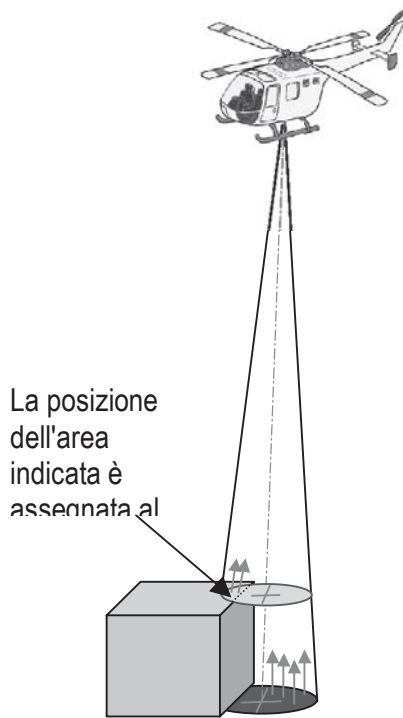
Nel caso si debba esaminare la precisione planimetrica di un rilievo LiDAR si incontrano difficoltà superiori: il campionamento delle superfici è discreto e la posizione del punto misurato non è prevedibile né ripetibile se non grossolanamente e comunque lontano dalle precisioni topografiche necessarie. Le scansioni inoltre avvengono secondo direzioni quasi ortogonali al terreno: nel caso di edifici, pertanto, sono pochissimi i punti che campionano le pareti verticali, per di più secondo angoli di incidenza geometricamente sfavorevoli. Questo fa sì che non siano definibili nel rilievo LiDAR quelle discontinuità morfologiche (es spigoli, facciate di muri, pareti, pali etc.) comunemente adottate nella pratica topografica di collaudo, se non con una incertezza dell'ordine del passo di scansione (per altro non isotropo) aumentata del diametro dell'impronta a terra del raggio laser (*spot size*). Proprio l'effetto legato alla dimensione dello *spot*, in particolare, è un fattore ancora poco indagato in letteratura, e può costituire un limite alla massima precisione planimetrica ottenibile da un rilievo Lidar anche nel caso in cui tutti gli errori del sistema siano stati rimossi.

La maggior parte di coloro che hanno affrontato il problema planimetrico hanno sviluppato procedure per determinare la posizione precisa delle discontinuità morfologiche presenti nella nube LiDAR per via indiretta, basandosi essenzialmente sulla individuazione e modellazione di piani inclinati e sulla determinazione delle loro linee di intersezione (es. Schenk et al., 2001). Tralasciando per via della loro approssimazione e per il rischio di introdurre errori sistematici le tecniche basate sul *gridding* dei dati LiDAR (es. Behan, 2000), uno dei primi metodi proposti, suffragato da una indagine sperimentale, impiega come elementi di controllo le rampe inclinate presenti principalmente sulle strade e sugli argini dei fiumi (Casella e Spalla, 2000; Casella, 2002). Altri metodi sono stati sviluppati con il fine di individuare punti di corrispondenza tra coppie di strisciate, attraverso i quali condurre la compensazione plano-altimetrica delle strisciate stesse. Al riguardo, una possibile generalizzazione del metodo di *strip adjustment* proposto da Maas (2000; 2002) permette di allineare mediante algoritmi di tipo *ICP* (*Iterative Closest Point*) piccole porzioni rappresentative di un DSM LiDAR al corrispondente modello TIN ricavato topograficamente, consentendo di stimare per ogni superficie di controllo i relativi parametri di scostamento altimetrico e planimetrico. Sempre in quest'ambito, si è proposto recentemente di operare mediante le linee di colmo dei tetti, desumendo indirettamente la loro posizione dall'intersezione dei due piani di falda che formano la copertura, le caratteristiche geometriche dei quali sono ricavate dai dati LiDAR (Vosselmann, 2008).

Una verifica sperimentale diretta della precisione conseguibile da un rilievo LiDAR ha previsto invece la posa in opera di un certo numero di segnali orizzontali, appositamente realizzati, costituiti da due cerchi concentrici del diametro rispettivamente di 0.5 e 1 metro (Csanyi e Toth, 2007b).

Per quanto riguarda le esperienze citate, a prescindere da ogni altro aspetto, il problema generale ai fini dei collaudi è che gli elementi che vengono proposti come *target* naturali o sono irregolari e di non agevole determinazione topografica (tetti e altri elementi del terreno) oppure risultano di saltuario reperimento (rampe variamente orientate).

Lo spot come ulteriore elemento di incertezza.



A complicare il problema planimetrico, si pone la circostanza che la dimensione dell'impronta a terra del raggio laser non ha dimensioni puntuali ma finite. La causa è dovuta alla divergenza che il laser subisce a partire dal punto di emissione. Questo fenomeno può essere controllato - e in proposito la maggior parte degli strumenti consente di operare con diversi valori di divergenza - ma non è eliminabile. La divergenza fa sì che il diametro nominale dello spot, definito dall'area al cui interno l'intensità del segnale si mantiene maggiore a I_{max}/e^2 , ove I_{max} è l'intensità massima del segnale ed $e = 2.7183$ (cfr. Jacobs, 2006, per una definizione esaustiva), tenda ad aumentare linearmente con la distanza, giungendo ad esempio a 25 cm a 1000 m, a 50 cm a 2000 m e a 75 cm a 3000 m dalla sorgente (altri esempi in: Lemmens, 2007). Entro quest'area una superficie sufficientemente estesa o altamente riflettente, anche se disposta ai margini dello spot, può produrre una eco del segnale. Il sistema non è in grado di determinare la posizione effettiva dell'oggetto all'interno dello *spot*, e gli assegna pertanto quella corrispondente al centro dello *spot* stesso, come nel caso schematizzato a fianco. Questo fenomeno è particolarmente evidente, e può portare a stime distorte, come nel caso in cui

si voglia sfruttare la forte riflettività della segnaletica orizzontale stradale per individuarvi dei possibili *target* di controllo (Vosselmann, 2002). Dato che è molto difficile separare l'effetto di tale fenomeno da quelli che sono gli errori casuali agenti sul sistema, la raccomandazione in tal senso è di mantenere quote di volo basse e impostare il raggio laser sul valore minimo di divergenza.

Metodologia e sperimentazione

Le esperienze qui descritte nascono dall'esigenza di adottare nella pratica un metodo topografico per la verifica plano altimetrica dei rilievi LiDAR che sia meno oneroso di quelli proposti in letteratura. In topografia e fotogrammetria è prassi consolidata identificare gli elementi geometrici di controllo in corrispondenza delle discontinuità geometriche delle superfici degli oggetti: spigoli di muri e di coperture, etc. Nel caso del LiDAR, a causa della densità di scansione relativamente bassa in relazione alla risoluzione con cui sono campionati gli oggetti è praticamente impossibile definire con precisione i limiti delle discontinuità. Se consideriamo il tetto di un edificio, ad esempio, l'analisi del DSM relativo consente di stabilire solamente se i vari punti cadono sulla copertura oppure al di fuori di essa. Le misure che cadono sul bordo non sono riconoscibili e quest'ultimo quindi non è definibile; è intuibile solamente che si trovi all'interno di una fascia di transizione che separa i punti falda dai punti terreno, sempre che non intervengano errori di misura a rendere meno netti i limiti dei due insiemi e a complicare conseguentemente l'interpretazione dei risultati.

Nei casi analizzati ci si è trovati di fronte alla necessità di verificare planimetricamente rilievi laser effettuati a bassa densità, anche di soli 2-3 punti/m². Tra i *target* individuati per la prova, si è posta attenzione agli oggetti di tipo monodimensionale, quali linee aeree elettriche e telefoniche, o parapetti metallici di strade e ponti. Date le loro dimensioni questi elementi sono facilmente campionati dal Lidar, sono molto frequenti sul territorio e la loro determinazione topografica avviene abbastanza agevolmente. Essendo monodimensionali questi elementi consentono di confinare con certezza, almeno in una componente, la posizione del LiDAR.

Il principale esperimento ha riguardato l'esame di 29 campioni di dati LiDAR relativi ad altrettanti tratti di condutture elettriche, sia di linee ad alta tensione, sia di linee di distribuzione. L'ipotesi di lavoro è che i tratti di conduttura compresi tra due supporti, in assenza di forze laterali quali il vento, proiettati su un piano orizzontale, definiscano una retta la cui equazione è desunta dai dati LiDAR con procedura ai minimi quadrati, minimizzando il quadrato degli scostamenti perpendicolari alla retta interpolatrice. La funzione da minimizzare è pertanto la:

$$R^2 = \sum_{i=1}^p \frac{N_i! (mE_i + q)^2}{1 + m^2} \quad (1)$$

ove N_i e E_i ($i = 1 \dots N$) sono le componenti planimetriche dei singoli p punti di ogni elemento lineare, m e q definiscono la retta interpolante $N = mE + q$. Tale funzione ammette soluzione diretta:

$$m = M \pm \sqrt{M^2 + 1} \quad (2)$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^p N_i! m \sum_{i=1}^p E_i}{p} \quad (3)$$

Ove:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^p \frac{N_i!}{p+i-1} \sum_{i=1}^p \frac{E_i!}{p+i-1}}{\sum_{i=1}^p \frac{E_i! N_i!}{p+i-1}} \quad (4)$$



Figura 1 – Le linee aeree rilevate dal LiDAR sono facilmente identificabili e selezionabili durante l'analisi del DSM prodotto dalla scansione.

Nella Tabella 1 sono riportati alcuni risultati relativi a un sottocampione di 12 segmenti di controllo, e si riferiscono, in questa fase, alle sole analisi di precisione. I dati sono stati acquisiti con un sensore Optech ALTM 3100 montato su elicottero, da una altezza di volo di poco superiore a 1100 metri rispetto al terreno. La densità media della singola scansione, nelle zone da cui sono stati estratti i dati, è di circa 4 punti a m^2 . Le tratte 23, 25 e 26, e le tratte 30, 33 e 36 fanno parte, rispettivamente, di due distinte terne: risultano pertanto orientate allo stesso modo e spazialmente vicine (Figura 2). I parametri che le caratterizzano confermano questa affinità.

L'analisi dei dati consente di individuare una correlazione tra precisione e giacitura delle linee di controllo rispetto alla direzione di scansione. Le tratte di linea disposte ortogonalmente alla linea di volo dell'aeromobile (Linee 20, 21, 23, 25, 26, 30, 33, 36) sono quelle che presentano le precisioni maggiori, evidenziate da dispersioni contenute tra 4 e 9 cm (SQM) e con scarti massimi minori di

16 cm. Gli elementi disposti parallelamente alla traiettoria (Linee 9, 22, 38, 39) rivelano una determinazione peggiore: lo scarto quadratico medio si colloca tra 11 e 22 cm, e così pure lo scarto massimo raggiunge i 38 cm. Ciò avviene malgrado queste linee siano le più brevi e più densamente campionate.

Tratta	Punti	Lunghezza tratta (m)	Direzione (gon)	Densità (punti/m)	Scarto max (m)	SQM (m)
Linea 9	7	9.45	5.5	0.74	0.31	0.19
Linea 20	14	30.72	78.1	0.46	0.07	0.05
Linea 21	16	22.56	72.3	0.71	0.16	0.09
Linea 22	18	10.95	4.7	1.64	0.38	0.22
Linea 23	57	161.21	112.4	0.35	0.10	0.05
Linea 25	47	161.63	112.3	0.29	0.14	0.05
Linea 26	50	161.60	112.3	0.31	0.09	0.04
Linea 30	149	292.33	83.3	0.51	0.15	0.06
Linea 33	177	265.50	83.3	0.67	0.15	0.06
Linea 36	176	263.65	83.3	0.67	0.14	0.06
Linea 38	17	30.34	197.1	0.56	0.17	0.11
Linea 39	24	29.59	193.5	0.81	0.15	0.11

Tabella 1 – Riassunto dei principali parametri geometrici e di precisione delle tratte lineari considerate. Lo scarto max identifica la massima distanza orizzontale del punto dalla linea media.

In un secondo caso si è condotto un esperimento di presegnalizzazione a terra di un rilievo LiDAR, per valutarne la fattibilità e l'efficacia. Diversamente dall'esperienza di Csanyi e Toth (2007b) che hanno impiegato segnali circolari, il *target* realizzato consisteva in una più maneggevole struttura a croce di 6 x 5 metri, realizzata unendo 4 listelli dello spessore di 30 mm, collocati ortogonalmente tra di loro a circa un metro di altezza dal terreno. La posizione del centro e dei vertici della croce è stata determinata con GPS. Il LiDAR TopoSys impiegato, anche a una densità di 3.5 punti a m² ha rilevato adeguatamente la struttura del segnale (Figura 3). Interpolando linearmente i punti campionati si sono determinate le posizioni del centro e le direzioni dei bracci del segnale. Confrontando questi valori con quelli misurati sul terreno è stato possibile ricavare lo scostamento planimetrico complessivo e le componenti Nord ed Est. I dati relativi sono riportati in Tabella 2.

Oggetto	Punti	Lunghezza tratta (m)	Densità (punti/m)	Scarto max (m)	SQM (m)
Elem. corto	6	5	1.20	0.08	0.05
Elem. lungo	7	6	1.17	0.10	0.06

Tabella 2 – Dati di campionamento del target sperimentale.

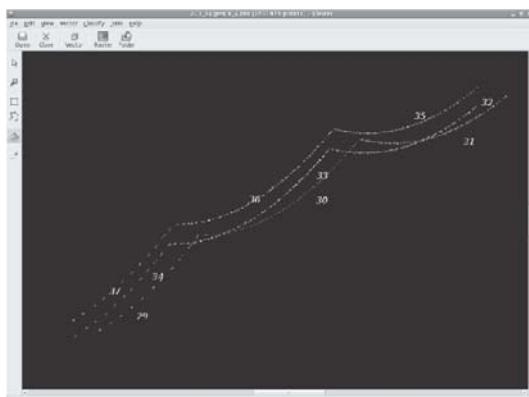


Figura 2 – Esempio di linee elettriche impiegate per i controlli

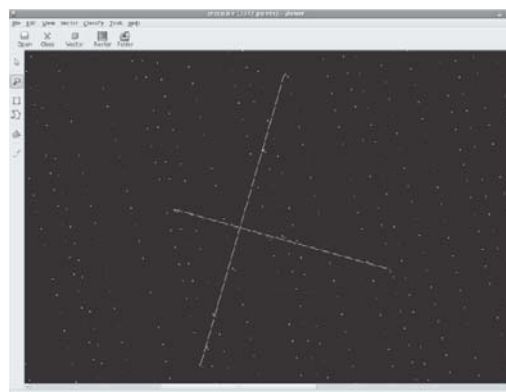


Figura 3 – Il target sperimentale campionato dal LiDAR

Per quanto riguarda le verifiche di accuratezza, esse sono in corso di completamento. A tal fine, i rilievi topografici di controllo delle varie linee prevedono l'installazione di una singola coppia di vertici GPS intersvisibili, per le tratte corte, e di una doppia coppia di vertici per quelle più estese. Da questi punti, impiegati come fuori centro, viene determinata per intersezione in avanti la posizione assoluta dei cavi, che viene poi confrontata con quella desunta dal LiDAR.

Conclusioni

Abbiamo presentato i risultati di alcune verifiche di precisione planimetrica di rilievi LiDAR da aeromobile effettuate mediante un metodo originale basato su elementi di controllo diretti di tipo lineare costituiti principalmente da segmenti di linee aeree elettriche o telefoniche. Tali elementi sono diffusamente presenti nel territorio antropizzato e di agevole determinazione topografica; nondimeno segnali di controllo aggiuntivi sono di facile realizzazione e installazione.

I risultati sperimentali mostrano che questi *target* possono essere individuati agevolmente con precisioni comprese tra una e due volte quelle tipiche della componente verticale, in funzione della loro giacitura rispetto alla direzione di scansione e della dimensione dell'impronta del laser.

Ringraziamenti

Si ringrazia la società Geotechnos di Trieste per la collaborazione e la concessione dei dati relativi all'esperimento di presegnalizzazione.

Bibliografia

- Behan A., (2000), "On the Matching Accuracy of Rasterized Scanning Laser Altimeter Data". *IAPRS*, Vol. 33, Part B2, 75-82
- Casella V., Spalla A. (2000), "Estimation of Planimetric Accuracy of Laser Scanning Data. Proposal of a Method Exploiting Ramps", *IAPRS*, Vol. XXXIII, Part B3/1, Amsterdam, 157-163.
- Casella V. (2002), "Studio sperimentale della precisione plano altimetrica del laser scanning", *Atti della IV Conferenza ASITA*, Vol. I, Genova, 3-6 Ottobre 2000, 543-552.
- Csanyi May N., Toth C. K. (2007a), "Point Positioning Accuracy of Airborne Lidar Systems: A Rigorous Analysis", in: Stilla U et al (Eds) PIA07. *IAPRS*, 36 (3/W49B), 107-111.
- Csanyi May N., Toth C. K. (2007b), "Improvement of LIDAR Data Accuracy Using Lidar-Specific Ground Targets", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, April 2007, 73 (4), 385-396.
- Huising E.J., Gomes Pereira L.M., (1998), "Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 5, 245-261
- Jacobs G., (2006), "Understanding Spot Size for Laserscanning", *Professional Surveyor Magazine*, October 2006.
- Lemmens M., (2007), "Airborne Lidar Sensors", *GIM International*, February 2007.
- Maas H.-G., (2000), "Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure". *IAPRS*, Vol. 33, Part 3A, 548-555
- Maas H.-G., (2002), "Method for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(9), 933-940.
- Schenk T., Seo S., Csatho B. (2001), "Accuracy Study of Airborne Laser Scanning Data With Photogrammetry", *IAPRS*, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD, 22-24 Oct. 2001, 113-118
- Vosselman G., (2002). "On the Estimation of Planimetric Offsets in Laser Altimetry Data". *IAPRS*, Vol. XXXIV, Part A3, Graz, Austria, 375-380.
- Vosselman G., (2008). "Analysis of Planimetric Accuracy of Airborne Laser Scanning Surveys", *IAPRS*, Vol. 37, Part 3A, Beijing, China, July 3-11