

CONFRONTO TRA DIFFERENTI TECNICHE PER LA GEOREFERENZIAZIONE DI SCANSIONI TLS

M. Alba(*), A. Giussani(*), F. Roncoroni(*), M. Scaioni(*)

(*) Politecnico di Milano – D.I.I.A.R., p.za L. da Vinci 32, 20133 Milano, Italia
e-mail: {mario.alba, alberto.giussani, fabio.roncoroni, marco.scaioni}@polimi.it

Riassunto

Con il seguente articolo si vuole fornire una presentazione delle differenti tecniche di georeferenziazione esistenti ed effettuare dei confronti sulle precisioni ottenibili e sulle loro differenti caratteristiche. I raffronti si sono basati sui risultati ottenuti da due differenti test: il primo è stato effettuato sperimentalmente in uno spazio interno al Politecnico di Milano mentre il secondo durante il rilievo del complesso romanico di San Pietro al Monte (Civate, LC). Correntemente la georeferenziazione delle scansioni per il rilievo laser scanning viene attuata principalmente in due modi: attraverso l'uso di punti topografici di appoggio e con il metodo della georeferenziazione diretta, basata sul posizionamento dello strumento su un punto noto e sulla capacità dello stesso di acquisire informazioni esterne (compensatori, orientamento dell'azimut, uso di sistemi INS/GPS). Inoltre, alcuni strumenti possono essere utilizzati similmente ad una stazione totale in modo da determinare direttamente le coordinate dei punti di stazione della poligonale di inquadramento. Una soluzione alternativa è fornita dall'utilizzo di algoritmi di surface matching che permettono la georeferenziazione delle scansioni con l'utilizzo di un numero minimo di punti di controllo.

Abstract

In the paper a presentation of existing georeferencing technique and a comparison between them is given. This is based on general considerations as well as on results two test applications carried out in the university laboratory, and at the ancient church of San Pietro al Monte in Civate (Lombardia, Italy). Two main ground constraints are currently used for the cultural heritage laser scanning survey: the use of targets as Ground Control Points, and the Direct Georeferencing approach, based on fixing the instrument position and attitude derived by external information (stationing over known points, levelling, azimuth orientation, use of INS/GPS in case of open and wide settlements). Moreover, nowadays several instruments can be used themselves as a total station to directly determine the stand-points coordinates as well. Both techniques can be adopted in a separate way, but they can be also integrated. The selection of a specific solution will depend upon the required accuracy for georeferencing, but can be driven also by special operational needs (available time, number of people involved, difficulty to get the site). On the other hand, an alternative solution to compute scan registration with a minimum ground control is given by the surface matching algorithms.

1. Introduzione

In questo articolo si vogliono presentare i diversi metodi di georeferenziazione per scansioni rilevate con terrestre laser scanning (TLS). Inoltre, sulla base di alcuni test effettuati in laboratorio e durante il rilievo della basilica romanica di San Pietro al Monte in Civate (Lombardia, Lecco) si sono confrontati i risultati fornendo alcune considerazioni sul loro utilizzo.

La maggior parte delle applicazioni odierne effettuate con TLS, prevedono per la georeferenziazione delle singole scansioni l'utilizzo di target (naturali o artificiali) come punti di controllo (ground control points, GCPs). Sono comunque noti in letteratura alcuni metodi alternativi aventi differenti finalità, si riporta in seguito una fotografia generale del problema. Una primo

metodo, volto a ridurre al minimo il numero di GCPs necessari per la georeferenziazione, è quello che prevede l'utilizzo di algoritmi di surface matching. Altri metodi sono stati proposti al fine di migliorare le precisioni ottenibili con l'utilizzo di target, a tale proposito si rimanda a (Scaioni, Forlani 2003) che analizza una tecnica basata sulla simultanea compensazione del blocco (block adjustment) mentre in (Ullrich et al. 2003) è stato analizzato un approccio misto dove oltre alle scansioni si sono incluse nella compensazione anche delle ulteriori informazioni come l'orientamento esterno di immagini digitali catturate con una camera co-registrata con il TLS. In alcuni casi l'uso delle immagini può risultare di aiuto per la misura dei GCPs, in quanto dalla conoscenza dell'orientamento della camera nel sistema di riferimento dello strumento utilizzato è possibile ricavare i parametri di georeferenziazione del TLS. Questa opzione non è ancora stata sperimentata nei test presentati in questo articolo e per maggiori informazioni si veda (Al-Manasir et al. 2006). Una ulteriore variante è presentata da (Bohm, Beker 2007), che hanno utilizzato per fornire delle georeferenziazioni approssimate delle scansioni, da affinare successivamente attraverso algoritmi di surface matching, le immagini 2D fornite dai valori di intensità registrati da alcune tipologie di TLS. I test che vengono di seguito presentati focalizzano l'attenzione su una terza soluzione comunemente chiamata georeferenziazione diretta (DG) vedi (Lichti, Gordon, 2004). Questo approccio ha suscitato negli ultimi anni un notevole interesse, infatti la maggior parte dei nuovi TLS sono equipaggiati in configurazione standard per l'impiego di questa metodologia.

La scelta del metodo di georeferenziazione da utilizzare per il rilievo si basa sull'analisi del sito da rilevare e sulle precisioni che si vogliono raggiungere. E' opportuno individuare la finalità del rilievo laser scanning che si deve realizzare e capire insieme agli utilizzatori dei dati (geologi, geotecnici, strutturisti) quelle che sono le loro esigenze reali. Il rilievo effettuato con laser scanning è sempre più spesso utilizzato in molteplici settori differenti da quelli classici ed anche le finalità possono essere molto diverse dalla semplice restituzione cartografica. Un esempio è quello del rilievo di gallerie minerarie dove le precisioni richieste sono centimetriche e le condizioni ambientali (illuminazione, temperatura, umidità) rendono difficili anche le più semplici operazioni di rilevamento. In questo caso come analizzato in (Alba et. al 2007) la metodologia individuata più idonea è stata quella della georeferenziazione diretta. Anche in altri settori, come ad esempio quello architettonico, la scelta del metodo più adeguato di georeferenziazione permette, in alcuni casi, un notevole risparmio di tempo e di risorse durante le operazioni sul campo.



Figura 1 - Vista del complesso sacro di San Pietro al Monte in Civate (Lomardia, LC)

2. Overview sui differenti tipi di georeferenziazione

Il problema della registrazione delle scansioni è basato sulla definizione di due differenti sistemi di riferimento (Reference System - RS): quello intrinseco e quello oggetto. Tutti i dati registrati dallo strumento sono infatti riferiti al sistema di riferimento intrinseco (intrinsic reference system-IRS) di una data scansione. Differentemente, il sistema di riferimento oggetto (ground reference system-GRS) è un sistema dato dall'unione di più scansioni nel quale è inserito tutto l'oggetto del rilievo, per trasformare ciascuna scansione dal IRS al GRS bisogna effettuare per ciascuna di esse una rototraslazione 3D basata su punti di controllo o su caratteristiche comuni a più scansioni. Questa operazione è comunemente chiamata co-registrazione, dove, dato un vettore X con coordinate di un punto nel GRS e un altro vettore x con le corrispondenti coordinate nel IRS, la trasformazione tra i

due sistemi può essere espressa introducendo una matrice di rotazione R ed il vettore O di traslazione, con riferimento all'origine IRS rispetto al GRS risulta:

$$X = R x + O \quad (1)$$

La matrice di rotazione viene parametrizzata attraverso angoli cardanici (ω, ϕ, κ) come avviene in fotogrammetria. La materializzazione del GRS può avvenire attraverso l'ausilio di un set di GCPs di coordinate note o considerando una scansione come riferimento e co-registrando su di essa le altre scansioni. In seguito si vuole dare una sommaria presentazione delle principali tecniche fino ad oggi utilizzate.

2.1 Metodo indiretto

La tecnica indiretta è la più utilizzata per la georeferenziazione di ciascuna scansione nel GRS, ed avviene attraverso l'ausilio di GCPs solitamente materializzati con appositi target. Per utilizzare tale metodo è necessario un numero minimo di 3 GCPs che devono essere misurati da ciascuna scansione in modo da ricavare i 6 parametri di rototraslazione. E' buona norma utilizzare un numero superiore di GCPs in modo da ottenere una maggiore ridondanza delle osservazioni. Inizialmente il problema non è lineare e per tale motivo viene utilizzato in prima istanza un algoritmo che non richiede nessun valore approssimato; in letteratura esistono molti di questi metodi vedi (Beinat, Crosilla, 2001) tra questi l'algoritmo RANSAC è ampiamente utilizzato (Fischer, Bolles, 1981). Infine, stabilito un data set valido di GCPs si utilizza il metodo dei minimi quadrati per la stima dei parametri finali e delle loro incertezze.

2.2 Metodo diretto

Le operazioni sono molto simili a quelle che si effettuano per misurazioni con un normale teodolite. Lo scanner è messo in stazione sopra ad un punto noto in un dato GRS, mentre l'asse Z del suo IRS è posto verticale. Conoscendo il vettore H avente origine sul punto di stazione e fine nell'origine di O_1 del IRS (attraverso calibrazione o geometria di costruzione) possono essere facilmente calcolate le coordinate di O_1 nel GRS. L'angolo azimutale viene orientato tramite l'allineamento della testa dello scanner lungo una direzione nota tramite un cannocchiale o attraverso la scansione di un target. La collimazione o la scansione di un punto di coordinate note nel GRS fa sì che la direzione dell'asse x nel IRS possa essere fissata vincolando l'angolo orizzontale κ . La formula della trasformazione da IRS a GRS è data da:

$$X = R_{\kappa} x_{\kappa} + O_I \quad (2)$$

Dove la matrice di rotazione R_{κ} definisce la rotazione attorno all'asse z ed x_{κ} è il vettore riferito ad un generico punto dato nel IRS. Una dettagliata descrizione della tecnica ed una valutazione delle sue precisioni è riportata in (Lichti, Gordon 2004). Caratteristica principale di tale metodo è che non richiede punti comuni e nessuna sovrapposizione tra scansioni adiacenti.

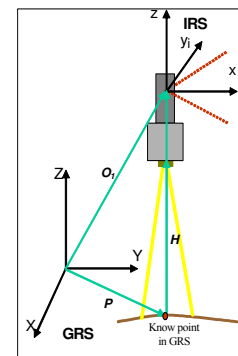


Figura 1:
Schema dei RS

2.3 Surface matching

Questo metodo è molto simile alle tecniche utilizzate in fotogrammetria digitale dove il matching tra immagini avviene attraverso una trasformazione geometrica 2D mantenendo un'immagine come riferimento e sovrapponendo le altre. L'algoritmo di *surface matching* applica invece una trasformazione 3D, solitamente una rototraslazione, tra corrispondenti porzioni di due nuvole di punti. Esistono due diversi tipi di algoritmo: un primo che lavora direttamente sui punti per esempio ICP - *Iterative Closest Point* - metodo di (Besl, McKay, 1992) con successive modifiche e adattamenti; il secondo tipo lavora su superfici triangolate come esempio gli algoritmi di (Acka, 2006). L'attuale ricerca sta lavorando per integrare tali metodi che sfruttano unicamente le caratteristiche geometriche dell'oggetto con i valori di intensità o RGB. Nei software commerciali l'algoritmo di surface matching più utilizzato ed efficiente è l'ICP il quale si basa sulla ricerca di punti omologhi tra porzioni comuni delle nuvole di punti da registrare e successivamente applica una

trasformazione rigida tra scansioni, mantenendone una come riferimento; questa procedura viene iterata finché non si arriva a convergenza. L'algoritmo ICP assume che una parte della nuvola di punti da registrare sia un sottoinsieme dell'altra, quando questo non avviene è possibile che si riscontrino dei falsi omologhi che portano l'algoritmo a convergere verso una soluzione errata (Fusiello et al., 2002).

3. Confronto tra i metodi di georeferenziazione

Sempre più spesso i software commerciali rendono i processi di georeferenziazione delle scansioni automatici ed in alcuni casi risulta difficile riuscire a valutarne la precisione o la presenza di eventuali errori grossolani nelle misure. Infatti molte volte l'unica procedura di controllo, che viene applicata è la valutazione visiva dell'allineamento delle scansioni. Ovviamente una più accurata analisi può essere effettuata utilizzando un set di punti di controllo (*Independent Check Points-IchP*). Di seguito si riporta da prima un test effettuato in laboratorio dove vengono confrontate le precisioni ottenibili con le diverse tipologie di georeferenziazione valutate attraverso un set IChPs. Successivamente viene descritto il rilievo del complesso sacro di San Pietro al Monte in Civate dove sono stati utilizzati e comparati i metodi di georeferenziazione descritti.

3.1 Strumenti utilizzati

Lo strumento laser scanning utilizzato per i test è un Riegl LMS-Z420i equipaggiato con una camera digitale Nikon D100 (6.1 Mpixel). Le acquisizioni sono state effettuate utilizzando il SW Riscan Pro e l'alimentazione elettrica è stata fornita grazie ad un generatore portatile Honda EU 10i, con capacità di 0,9 kW e dal peso di 13 Kg. Durante i rilievi è stata utilizzata per la determinazione dei GCPs una stazione totale Leica TCRA 1203. Come punti di appoggio (GCP) si sono utilizzati 2 differenti tipi di *target*, tutti ricoperti da una pellicola in materiale retroriflettente: il primo tipo è di forma cilindrica diametro $\phi = 50$ mm e altezza $h = 50$ mm, avente il vantaggio di poter essere posizionato direttamente su punti noti tramite trepiedi o paline topografiche; il secondo di forma quadrata con lato di 50 mm.

3.2 Test in laboratorio

Il primo test si è svolto in laboratorio al fine di effettuare dei test pratici e comparare tra loro i risultati ottenuti utilizzando differenti tecniche di georeferenziazione. La rete topografica utilizzata è formata da 4 vertici dai quali sono stati misurati le coordinate di 12 target retroriflettenti con l'utilizzo di una stazione totale. L'elaborazione delle coordinate con il metodo dei minimi quadrati ha evidenziato incertezze (sqm) di ± 1.6 mm in planimetria e di ± 2 mm in quota. Successivamente lo scanner è stato posizionato sui 4 vertici della rete, georeferenziato in differenti modi e da ogni punto di stazione sono state misurate le coordinate degli stessi target. Infine applicando differenti set di parametri di georeferenziazione si sono ricavate le coordinate dei target che sono state confrontate con i relativi IChPs ed i residui sono rappresentati in tabella 2.

Il *metodo indiretto* è stato applicato utilizzando il SW Riscan Pro impiegato anche per il controllo del processo di acquisizione dei dati. Qui la procedura ai minimi quadrati è implementata assieme ad una fase di pre-analisi che può essere così schematizzata: 1) riconoscimento e misurazione automatica dei target; 2) identificazione dei target basata sulla conoscenza delle mute distanze tra loro in ciascuna scansione e sull'oggetto; 3) calcolo dei parametri a minimo vincolo sulle misure dei target. Dopo la stima ai minimi quadrati dei parametri di georeferenziazione si sono ottenuti anche i residui sui GCPs.

La *georeferenziazione diretta* è stata invece effettuata utilizzando le coordinate di ciascun punto di stazione ottenute dalla misurazione della rete topografica con una stazione totale. La verticalità dello strumento è stata garantita grazie all'utilizzo di un bolla torica (sensibilità pari a $30''/2$ mm) mentre per l'orientamento azimutale è stato collimato un target di coordinate note. Anche in questo caso tutti i GCPs che non sono stati utilizzati per la georeferenziazione sono serviti come IChPs. Durante questo test è stata utilizzata un'altra tipologia di georeferenziazione diretta, dove il TLS è

stato utilizzato senza l'appoggio topografico fornito dalla stazione totale ma simultaneamente è stato rilevato l'oggetto e misurati sia i punti di stazione che i target delle rete topografica. In pratica il TLS è stato utilizzato per la misura di una poligonale chiusa con le stesse modalità di impiego di una stazione totale: centramento forzato sulla stazione, rettifica dell'asse primario e orientamento azimutale. I vertici della poligonale sono stati determinati attraverso la misura su target retroriflettenti cilindrici. Le misure effettuate sono state poi elaborate con il metodo dei minimi quadrati ed i residui calcolati sui IChPs sono risultati lievemente superiori rispetto alla DG classica (vedi tabella 2) ma per applicazioni che non richiedono elevate precisioni può considerarsi una valida alternativa.

Per il metodo del *surface matching* le scansioni sono state processate utilizzando il software Imalign-Poliworks seguendo il seguente schema di lavoro: le scansioni sono state allineate manualmente utilizzando punti omologhi acquisiti sulle due scansioni e successivamente è stato applicato all'intero data set un algoritmo ICP. Anche in questo caso le coordinate dei target misurati in ogni scansione sono state comparate con i IChPs determinati con la stazione totale (vedi tab 2).

Scarti (cm)	INDIRETTO		DIRETTO CON ST		DIRETTO SENZA ST		SURFACE MATCHING	
	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z
<i>sqm</i>	0,5	0,3	0,9	1,6	1,1	1,5	0,9	1,1
<i>max</i>	1,2	0,5	3,2	-4,0	3,7	3,6	2,6	3,9
<i>media</i>	0,0	0,0	-0,3	-0,1	1,0	0,5	0,1	1,4
<i>RMS</i>	0,5	0,3	0,9	1,6	1,5	1,6	0,9	1,8

Tabella 2: Residui calcolati su 23 IChPs

3.3 Test sul campo

L'obiettivo del rilievo è stato quello di creare un modello di realtà virtuale dell'intero complesso di San Pietro al Monte in Civate (LC), costruzione romanica risalente all'XIII secolo. Sono stati richiesti due differenti rilievi con le seguenti specifiche: all'esterno una precisione media di circa ± 5 cm data la semplicità della forma e dei materiali di costruzione mentre all'interno la presenza di molti affreschi e bassorilievi hanno suggerito l'utilizzo di tecniche di georeferenziazione che fornissero migliori precisioni dell'ordine di ± 2 cm. Per tali ragioni per l'interno si è utilizzato il metodo classico della georeferenziazione indiretta tramite l'utilizzo di GCPs misurati con una stazione totale mentre per l'esterno dell'edificio, il cui rilievo è stato svolto in un solo giorno di lavoro, è stata impiegata sia la georeferenziazione diretta che il surface matching, come meglio specificato in seguito.

3.3.1 Georeferenziazione diretta senza stazione totale.

In questa tecnica, come già accennato in precedenza, il TLS simultaneamente scansiona l'oggetto e misura le coordinate dei punti della rete topografica. Operativamente tutte le scansioni sono state riferite al sistema di riferimento della stazione 100, facendo coincidere il proprio IRS con il GRS. Successivamente a partire dalle coordinate dei vertici adiacenti misurati dalla scansione precedente e riportando le corrette altezze strumentali del centro del IRS è stato possibile georeferenziare con questa tecnica tutte le altre scansioni. Gli orientamenti sono stati determinati attraverso backsight orientation utilizzando le misure effettuate su target cilindrici disposti nei punti di stazione visibili. In prima approssimazione il software utilizzato per tale procedura è stato RiscanPro della Riegl che però non permette nessun tipo di controllo sulla qualità della georeferenziazione. Per tale motivo, le sole misure della rete sono state esportate dal SW ed elaborate con il metodo dei minimi quadrati. Infine le coordinate corrette importate nuovamente in RiscanPro hanno permesso di georeferenziare tutte le scansioni con precisioni (RMS) di $\pm 1,7$ cm in X-Y and $\pm 2,9$ cm in Z.

3.3.2 Surface matching

Questo metodo operativamente è ancora più veloce della georeferenziazione diretta, in quanto non richiede la rettifica dell'asse verticale ed inoltre non prevede di prassi l'utilizzo di punti di controllo. D'altro canto, per il suo utilizzo è necessaria una elevata variabilità morfologica dell'oggetto del rilievo ed una sovrapposizione delle scansioni almeno pari al 30%. Nel caso in esame le scansioni sono state processate con il SW Imalign-Polyworks con la stessa procedura descritta nel paragrafo 3.2. L'incertezza finale dell'allineamento delle scansioni, risultante dall'algoritmo ICP, è stata mediamente di ± 1 cm anche se tale precisione risulta spesso troppo ottimistica come è stato riscontrato nel test effettuato in laboratorio. Per ridurre l'errore di allineamento si consiglia, come fatto per il caso in esame, di pianificare le scansioni secondo una poligonale chiusa attorno all'oggetto da rilevare.

4. Conclusioni

Nel presente articolo si sono presentati i diversi metodi esistenti per la georeferenziazione di scansioni laser scanning, prendendo in considerazione sia le tecniche classiche come quelle che utilizzano GCPs o algoritmi di surface matching che quelle meno utilizzate (georeferenziazione diretta) o in fase di sperimentazione come i metodi che utilizzano l'orientamento delle immagini. In particolare è stato studiato ed analizzato il metodo della georeferenziazione diretta che si basa sull'utilizzo del TLS similmente ad una stazione totale. Tale approccio è stato sperimentato in due diverse modalità: la prima utilizza le coordinate dei punti di stazione ricavate precedentemente con metodi topografici mentre nella seconda simultaneamente si scansiona l'oggetto e si misurano le coordinate dei punti di stazione. Questo metodo è stato testato sia in laboratorio che durante un'applicazione in campo, constatando che risulta meno preciso di altri metodi ma quando le precisioni richieste sono dell'ordine di 2-3 cm la georeferenziazione diretta, anche senza l'appoggio topografico risulta essere una tecnica efficiente.

Bibliografia

- Fischler, M.A., and R.C. Bolles, 1981. "Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". *Comm. ACM*, n. 24
- Alba, Scaioni, 2007. "Comparison of techniques for terrestrial laser scanning data georeferencing applied to 3-d modelling of cultural heritage". In *Proc. Of 3D- Arch 2007*. on CDROM.
- Al-Manasir, Khalil Fraser, Clive S. "Registration of terrestrial laser scanner data using imagery". *The Photogrammetric Record*, Volume 21, Number 115, September 2006, pp. 255-268
- Besl P. J., and N.D. McKay, 1992. "A method for registration of 3-D shapes". *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, pp. 239-256.
- Böhm J., Becker S., 2007. "Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance features". In *Proc. of Optical 3D Measurement Techniques VIII*, Zurich, Switzerland.
- Beinat A., F. Crosilla, 2001. "Generalised Procrustes Analysis for Size and Shape 3-D Object Reconstructions". In *Proc. of Optical 3D Measurement Techniques V*, Vienna, Austria, Vol. 2
- Fusiello, A., Castellani, U., Ronchetti, L., and Murino, V., 2002. "Model acquisition by registration of multiple acoustic range views". *Computer Vision – ECCV 2002*, LNCS vol. 2351, Springer
- Grün, A., and D. Akca, 2006. "Least Squares 3D Surface Matching". *IAPRSSIS*, Vol. 34(5/WG16), Dresden, Germany, on CDROM.
- Lichti, D.D., and S.J. Gordon, 2004. "Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording". In *Proc. of FIG Working Week*, Athens, Greece, May 22-27, pp. 16.
- Scaioni, M., and G. Forlani, 2003. "Independent Model Triangulation of Terrestrial Laser Scanner Data". *IAPRSSIS*, Vol. 34 (5/W12), Ancona Portonovo, Italy, pp. 308-313.
- Ullrich, A., Schwarz, R., and H. Kager, 2003. "Using Hybrid Multi-Station Adjustment for an Integrated Camera Laser- Scanner System". In *Proc. of Optical 3D Meas. Tech. VI*, Zurich, Switzerland, pp. 298-304.