

IL LASER A SCANSIONE PER LA DOCUMENTAZIONE DELL'EDIFICATO

di Luigi Colombo e Barbara Marana

L'analisi geometrica e tematica dell'edificato riguarda la conoscenza dell'oggetto edilizio nei suoi aspetti morfologici, costruttivi, materici e di relazione spaziale con il territorio.

L'operazione ha un ruolo propedeutico alla documentazione di fasi costruttive di un'opera, al monitoraggio di eventuali condizioni di dissesto strutturale e degrado materico, alla conservazione.

Il soddisfacimento di queste problematiche comporta l'impiego di procedure di rilevamento 2D-3D, a largo supporto informatico e «senza necessità di contatto», che siano utilizzabili anche su elementi costruttivi complessi, di grandi dimensioni o difficilmente accessibili. Le esigenze indicate conducono alla fotogrammetria digitale e alla tecnica innovativa detta 3D close-range laser scanning. I due procedimenti sono in grado di produrre, con costi, risultati e automazione diversi, descrizioni di tipo numerico; integrati fra loro, forniscono uno strumento più efficace per l'analisi geometrica e la visualizzazione, anche fotorealistica. La fotogrammetria appartiene alle procedure di telerilevamento passivo in quanto si fonda sull'immagine fotografica che registra la riflessione di energia luminosa da parte degli oggetti. Vengono utilizzate due o più immagini (2D) contenenti zone comuni, per costruire informazioni spaziali (3D). La ricerca dei punti corrispondenti sulle diverse immagini si può effettuare con tecniche di matching, uno strumento comunque difficile da automatizzare pienamente. Il telerilevamento attivo si muove ancor più nel settore dell'automation technology e cerca di superare i limiti della fotogrammetria; in questo caso, viene emessa energia luminosa verso l'oggetto e si registra con un sensore la porzione riflessa. Questo vale sia per l'energia di tipo attivo, che si documenta con un'immagine monocromatica, per esempio nell'infrarosso vicino, sia per quella di tipo passivo che produce un'immagine a colori RGB. Nel telerilevamento attivo l'hardware è più costoso perché durante la sessione di misura lo strumento deve essere in grado di ricevere ma anche di emettere energia.

Attraverso la misura del tempo di percorrenza dell'impulso e altri supporti tecnologici si determinano le coordinate polari di ciascun punto acquisito in scansione. Alla fine dell'operazione di misura ed elaborazione viene prodotto un modello virtuale (3D) con texture tematiche che può essere visualizzato e navigato in Internet. L'impiego di queste risorse permetterà in tempi brevi la realizzazione di archivi di informazioni geometriche e tematiche (Sistema Informativo dell'Edificio), adatti alla documentazione dinamica e alla salvaguardia dell'opera.

FIGURA 1

Il sistema di scansione LPM





FIGURA 2 Alcune superfici oggetto del test

I SISTEMI LASER A SCANSIONE

Questi sistemi, rappresentano la naturale evoluzione, automatica, delle stazioni totali motorizzate; sono comparsi sul mercato per la prima volta circa tre anni fa e oggi si presentano più compatti e trasportabili, con sensori del peso di 15 - 20 kg. In analogia con i sistemi attivi del telerilevamento, i laser-scanner utilizzano l'emissione di un fascio di impulsi di luce (nel visibile o nell'infrarosso vicino) per ricostruire puntualmente elementi della realtà. Il dispositivo hardware è posto in stazione sopra un punto opportuno e viene orientato mediante servomotori sull'oggetto, opportunamente inquadrato. Migliaia di impulsi al secondo investono l'area di scansione selezionata: si misura il tempo di percorrenza (distanza) di ciascuno, l'intensità dell'energia riflessa dall'oggetto e i parametri di assetto (rotazione azimutale e angolo zenitale). In tempo reale vengono così determinate le tre coordinate polari (poi convertite in cartesiane) di ciascun punto oggetto, insieme con una quarta dimensione che indica l'energia luminosa riflessa, con riferimento sia a quella emessa, detta attiva (per esempio, immagine a livelli di grigio nell'infrarosso), sia a quella naturale, detta passiva (immagine a colori RGB). E' possibile acquisire nuvole di punti, operando sia di giorno sia di notte. La georeferenziazione della nuvola, in un sistema cartesiano associato all'opera da rilevare, si esegue con (almeno) quattro punti di controllo, segnalizzati sull'oggetto e predeterminati nella rete di inquadramento.

Il prodotto finale della scansione è un modello spaziale sul quale è possibile spostarsi in continuo con il mouse, visualizzando la posizione x, y, z del cursore e il valore dell'energia riflessa, attiva e/o passiva. Il processo sequenziale della scansione di un'area viene ripetuto in genere da diverse stazioni, così da garantirne una descrizione completa e limitare le zone prospetticamente defilate o

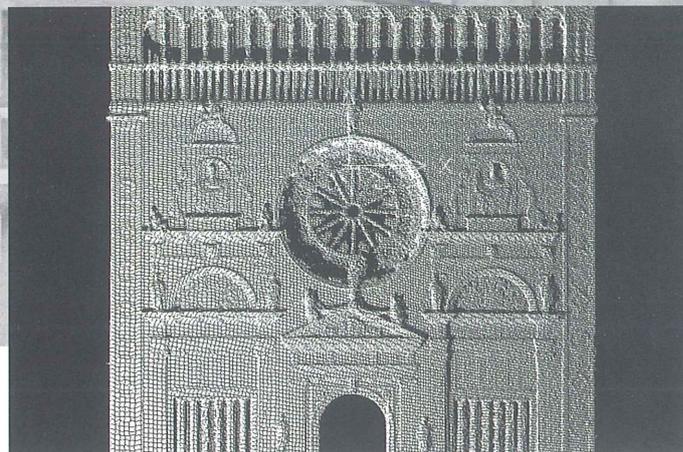


FIGURA 3 Modello di punti laser visualizzato all'interno di Cirrus. Evidenzia la nuvola di punti acquisiti sulla facciata della cappella Colleoni

nascoste da parti aggettanti. Le nuvole di scansione sono poi collegabili fra loro mediante il software di sistema (trasformazione spaziale), utilizzando almeno quattro punti di controllo (comuni), segnalizzati sulle pareti con adesivo riflettente; questi punti vengono riconosciuti dal programma di elaborazione in modo automatico attraverso procedure di autocorrelazione basate sulla lettura dell'energia riflessa. Alcuni software dispongono di algoritmi di matching in grado di riattaccare automaticamente le superfici, senza l'utilizzo dei punti di controllo. La grande memorizzazione richiesta dall'operazione consiglia, comunque, di elaborare indipendentemente ogni scansione e di effettuare solo alla fine il suo collegamento alle altre. Una volta interpretato il set di punti, anche con il supporto di immagini, lo si può trasformare via software in un modello reticolare, creando le facce (triangoli) necessarie per il successivo texture mapping fotorealistico. Questo elaborato si ottiene sia direttamente, utilizzando l'attributo colore (canale RGB) fornito dallo scanner per ciascun punto acquisito, sia, in modo più efficace, per proiezione prospettica sul DSM (Digital Surface Model) dei pixel di immagini georeferenziate (nel sistema oggetto, mediante punti di controllo).

Le riprese fotografiche monoscopiche possono essere eseguite con fotocamere calibrate, come la Rollei digitale d7 metric: la camera dispone di un sensore CCD con risoluzione 1280x1024 pixel (30 bit) e ha una lunghezza focale di 24 mm (valore equivalente a quello di una camera a pellicola nel formato 35 mm). Viene fornita con un software di resampling che consente di memorizzare i dati immagine già corretti delle deformazioni.

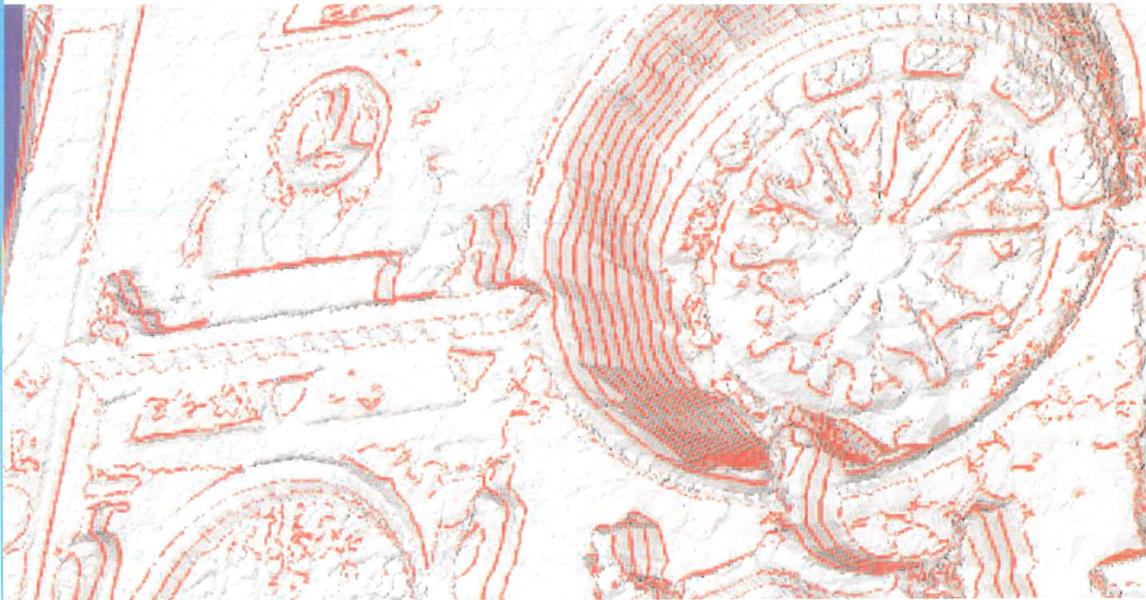


Sul modello ricostruito si possono effettuare via software operazioni geometriche come l'estrazione di linee strutturali e architettoniche, profili e sezioni, la visualizzazione di isolinee, il calcolo di volumi, l'individuazione di fuori-piombo in pareti interessate da dissesto. La visualizzazione 3D, in Internet, è realizzata attraverso lo standard VRML o la sua estensione GeoVRML che accetta anche i metadati di referenziazione. La versatilità operativa evidenziata può rendere il laser a scansione assai produttivo nell'indagine geometrica e tematica di opere costruttive (edifici, ponti, viadotti, paramenti murari, ecc.) e di elementi naturali (versanti, pareti di roccia, superfici di cave, ecc.). I costi del procedimento sono ancora da valutare in modo approfondito; incerta appare ancora la fase di processamento della nuvola di punti. Da non trascurare, comunque, anche l'incidenza economica dell'hardware di acquisizione e pre-elaborazione: per esempio, il sistema Riegl LPM (tab. 1) costa almeno 60 000. I principali sistemi laser a scansione, distribuiti in Italia, sono descritti nella tabella 1.

In particolare, il laser 3D della società austriaca Riegl è disponibile sia nel modello base, detto Laser Mirror Scanner (LMS-Z210), sia nel nuovo Laser Profile Measuring System (LPM-25HA). LMS è versatile, veloce ed ha portata fino a 350 metri: è adatto per scansioni anche estese ma di dettaglio non troppo elevato, cioè per scale inferiori a 1:100 e precisioni pari a 0,1 cm. LPM, più preciso (incertezza max 8 mm), ha un campo di applicazione limitato a 60 metri ed è finalizzato al rilievo di interni e dell'edificato in genere. I due sistemi sono pilotati da un PC e supportati dai software di acquisizione, visualizzazione e pre-processamento 3D-RiSCAN e LPM-SCAN, che possono essere integrati con altri package di post-processamento: per esempio, PoliWorks della canadese InnovMetric, molto diffuso nel mondo, e, in Italia, Cirrus AC della Menci Software, un applicativo di AutoCAD. I due package, con filosofie procedurali diverse, sono in grado di ottimizzare e aggregare le nuvole di punti acquisiti nonché di produrre le elaborazioni necessarie per la visualizzazione 2D e 3D, sia raster che vettoriale. Per contro, la

TABELLA 1 I principali sistemi laser 3D

Produttore	Callidus Precision Systems (Germania)	Cyra Technologies (USA) Leica Geosystems	Riegl Laser Measurement Systems (Austria)
Sistema	Callidus 1.1	Cyrax 2500	LPM - 25HA LMS - Z210
Lunghezza d'onda	Infrarosso vicino	Luce verde	Infrarosso vicino
Camera di supporto	videocamera	videocamera	canale passivo RGB
Range utile (Dmax)	(32 - 80) m	(50 - 100) m	60 m 350 m
Precisione sui punti	5 mm, fino a 32 m	6 mm, fino a 50 m	8 mm 25+(2(D(m)/100m) mm
Registrazione intensità dell'energia riflessa	No	Si	Si
Peso sensore - peso totale	13 - 28 kg	20.5 - 28.2 kg	9.5 -13 kg 35 kg
Software di elaborazione	3D - Extractor	Cyclone	3D-RiSCAN LPM-SCAN

**FIGURA 4 E 5**

Modello di superfici della cappella e restituzione vettoriale 3D.

Le figure mostrano il modello di superfici sviluppato all'interno di Cirrus, partendo da procedure di riduzione della nuvola di punti, e la successiva fase di estrazione dei contorni vettoriali delle entità (file DWG di AutoCAD)

fotogrammetria fornisce precisioni (σ) nella determinazione di punti oggetto pari a circa 0.01% della distanza media di ripresa, cioè, per la portata limite dei sistemi Riegl, ($\sigma = 6$ mm per $D = 60$ m e $\sigma = 35$ mm per $D = 350$ m: i valori sono in discreto accordo con quelli del laser a scansione.

Una buona ricostruzione delle superfici e delle loro linee architettoniche richiede la conoscenza di una griglia di punti oggetto con passo p ben correlato alla scala di restituzione; il passo acquisibile cresce con la distanza stazione-oggetto, con l'inclinazione azimutale e zenitale e risente delle morfologie locali. Questo fatto comporta, a parità di risoluzione angolare della scansione, distanze limitate e visuali poco inclinate e poco oblique; eventualmente, si può aumentare il numero delle stazioni per consentire il rilevamento di superfici irregolari da diversi punti di vista. L'elevata densità dei punti oggetto acquisiti rende corretti i processi interpolativi all'interno della singola maglia senza richiedere praticamente l'introduzione di breaklines, come avviene invece nei DSM tradizionali (tab. 2). Il DSM denso comporta però memorizzazioni troppo pesanti e va pertanto regolarizzato, semplificato e ripulito dalle inutili sovrapposizioni e da valori grossolani.

Procedure software di adaptive meshing possono garantire maglie triangolari con dimensione correlata alla curvatura locale delle superfici e alle discontinuità identificate; viene così drasticamente ridotto il loro numero. E' poi possibile esportare il dato di elaborazione, nuvole di punti o facce triangolarizzate, nei formati DXF (AutoCAD), VRML (Internet), ASCII. Aspetti mutuabili dalla fotogrammetria ma comunque non standardizzati, sono rappresentati dall'entità della sovrapposizione fra nuvole, dal numero delle scansioni sulla stessa zona, dalle modalità di collegamento, dalla georeferenziazione (punti di controllo)

APPLICAZIONI DEL LASER AL COSTRUITO

Esperienze significative con questa nuova tecnica si stanno eseguendo nel mondo sia su edifici di interesse monumentale, sia su strutture (v. riferimenti bibliografici).

Le tecnologie laser di Riegl (distribuite in Italia da Nikon-Firenze) sono state utilizzate per una sperimentazione in corso, finalizzata alla documentazione geometrica e tematica di particolari della basilica di Santa Maria Maggiore, sita nella parte alta di Bergamo e da sempre un simbolo per la città. Il complesso monumentale fu costruito nel 1137 per un voto che la città fece alla Madonna durante un'epidemia; parte integrante dell'opera è la cappella Colleoni che il famoso condottiero fece costruire nel 1472 come sua sepoltura, al posto di un'abside della basilica. L'attività di rilevamento dell'opera permetterà poi la realizzazione di un sistema informativo del monumento, in grado di consentire sia la sua conservazione programmata sia la visita virtuale in Internet. In tal senso, elemento prioritario è la realizzazione di un modello fotorealistico alla scala 1:200 della basilica e dell'attigua cappella, partendo dalla ricostruzione numerica delle superfici relative all'involucro esterno e non trascurando in seguito gli interni, con le loro importanti decorazioni barocche.

TABELLA 2 Caratteristiche di un DSM con breaklines

Scala rappresentazione	Passo della griglia (cm)	Intervallo fra i punti sulle breaklines (cm)
1:200	70 - 100	20 - 50
1:100	50	20 - 50
1:50	20	10

FIGURA 6

Porzione del modello di realtà virtuale, inerente al rosone della cappella Colleoni, ottenuto per proiezione di immagini orientate sul DSM, generato dalla scansione

**LINK**

www.callidus.de
www.cyra.com
www.riegl.com
www.menci.com

BIBLIOGRAFIA

- Angelini S. (1959)
S.Maria Maggiore in Bergamo
 Istituto Italiano di Arti Grafiche,
 Bergamo.
- Lemmens M., Van den Heuvel F. (2001)
3D close-range Laser Mapping Systems
 GIM International, n. 1.
- Goldberg H. E. (2001)
Scan your world with 3D lasers
 Kadalyst Magazine, n. 2.
- Colombo L., Marana B. (2001)
La visualizzazione tridimensionale del costruito: tecnologie a confronto
 Rivista dell'Agenzia del Territorio, n.3.
- Luhmann T. (2001)
Close-range photogrammetric systems
 GIM International, n. 7.
- Boccardo P., Comoglio G. (2001)
Nuove metodologie per il rilievo fotogrammetrico architettonico
 Bollettino Sifet, suppl. speciale, n. 2.

L'incertezza nella determinazione del modello tridimensionale (funzione della scala di rappresentazione) è assunta non superiore a 3 cm; i punti di controllo per il riattacco delle singole scansioni, pre-segnalizzati sulle pareti con adesivi riflettenti, devono garantire una precisione non inferiore a 1.5 cm, praticamente omogenea con quella della rete di inquadramento (1 cm). Le prime scansioni con lo scanner Riegl LPM, hanno interessato il paramento murario (in pietra arenaria) dei fronti settentrionale e meridionale, i due protiri e la cappella Colleoni.

L'elaborazione geometrica della nuvola di punti è stata effettuata con il package Cirrus AC, della Menci Software (Arezzo); il programma è in grado di effettuare l'ottimizzazione della triangolarizzazione dei punti, il collegamento fra le scansioni, il calcolo di superfici matematiche con estrazione di curve di livello e sezioni, la visualizzazione foto-realistica, attraverso il raddrizzamento differenziale (sopra una superficie di riferimento) di immagini referenziate (ortofoto) o la loro proiezione prospettica sul DSM (foto-texturing).

La procedura, sviluppata all'interno di AutoCAD, consente inoltre l'input/output di elaborati nei formati più diffusi, fra cui DXF, VRML, ASCII XYZ. ■

Luigi Colombo e Barbara Marana
 Università di Bergamo / DI
colombo@unibg.it

Ringraziamenti

- > Simone Orlandini e Norberto Berzero (Nikon Italia)
- > Michele Zamponi (Menci Software)
- > Francesco De Vincentis