

# TECNOLOGIA E TECNICA NEL LASER SCANNING TERRESTRE

## ANNOTAZIONI PER I BENI CULTURALI

di Luigi Colombo

La conoscenza di forma, dimensioni e posizione spaziale costituisce un'esigenza importante per la catalogazione e l'analisi dei Beni Monumentali. Le informazioni possono essere acquisite, come noto, mediante dispositivi ottici attivi che fanno riferimento ai sistemi terrestri a scansione laser, supportati dall'immagine fotografica. L'approccio è senza contatto e conduce dopo un'elaborazione software, più o meno automatica, a un modello spaziale foto-realistico e misurabile.

### LA TECNOLOGIA: IL SENSORE LASER

Il laser, amplificazione della luce mediante il fenomeno dell'emissione stimolata di radiazioni, è un dispositivo attivo in grado di produrre, all'interno o meno della parte visibile dello spettro elettromagnetico, radiazioni di tipo coerente (tutti i raggi sono in fase), di uguale frequenza (quindi monocromatiche), direzionali e di elevata intensità; la divergenza dell'emissione è piccola, per cui il fascio risulta sottile, concentrato e adatto all'applicazione metrologica.

Il ritorno dell'energia emessa e, quindi, l'esecuzione della misura, avvengono mediante l'impiego di prismi retroriflettenti, target adesivi catarifrangenti o per riflessione su superfici naturali (con regolazione automatica dell'intensità). L'ultima modalità rappresenta un'innovazione tecnologica, relativamente recente, utilizzabile entro diverse centinaia di metri; si osserva che la quantità di luce riflessa dalla superficie di interesse è funzione del coefficiente di riflettività  $R(\lambda)$  del materiale (*albedo*), che traduce numericamente il rapporto fra l'intensità dell'onda di ritorno e quella di emissione, per una definita lunghezza d'onda  $\lambda$ .

I materiali di aspetto liscio e di colore chiaro hanno riflettività compresa fra 70% e 100%, mentre nei materiali ruvidi e scuri si scende sotto il 20%. Nel caso di una superficie sottoposta a irraggiamento luminoso, si può scrivere:  $R(\lambda)\% + T(\lambda)\% + A(\lambda)\% = 100\%$ , essendo T e A, rispettivamente, il coefficiente di trasmissione e quello di assorbimento del materiale coinvolto.

La misura di distanza con tecnologia laser costituisce un aspetto primario nella determinazione della posizione di punti per coordinate sferiche: si opera in genere secondo il principio del tempo di volo (impulsi) oppure mediante la differenza di fase (modulazione dell'onda in ampiezza o in frequenza) o addirittura la triangolazione ottica o l'interferometria (utilizzate in ambito industriale).

La determinazione della misura viene eseguita, di norma, per via analogica e allora è affetta da due problemi sostanziali:

sono richiesti una soglia minima di energia per il segnale di ritorno e un tempo minimo di misura, legato alla velocità del convertitore strumentale. È possibile, però, operare anche mediante analisi digitale del segnale: in tale caso, l'onda emessa e quella riflessa sono digitalizzate e la determinazione è eseguita in modo numerico, senza necessità di fissare una soglia minima per l'energia in ricezione e con velocità di acquisizione più elevate.

Il nuovo sensore a scansione Riegl VZ-400 (Fig. 1) è il primo dispositivo terrestre a tempo di volo in grado di operare proprio attraverso l'analisi digitale dell'onda.

In questo caso, diviene possibile valutare la dispersione del segnale intorno al valore medio dell'onda riflessa (forma d'onda che dipende dall'impatto del fascio laser con la superficie rilevata) e discriminare tutta la serie degli impulsi di ritorno.

La tecnica di misura laser a differenza di fase utilizza invece onde modulate in ampiezza o in frequenza: nel primo caso, la misura è particolarmente sensibile a brusche discontinuità geometriche e di riflettanza dell'oggetto, mentre nel secondo caso questi aspetti sono alquanto irrilevanti ed è possibile eseguire misure affidabili anche con ridotta energia di ritorno (si utilizza, infatti, solo la frequenza di



Figura 1 - Il laser scanner Riegl VZ-400.



Figura 2 - Il laser radar di Metris (Nikon Metrology).

battimento del segnale).

La tecnologia che utilizza, infine, la triangolazione ottica, determina (con soluzioni diverse) la posizione spaziale di punti di interesse per intersezione di fasci laser connessi a una base di osservazione nota: il campo è ridotto a poche decine di metri, ma la precisione è molto elevata (0.2 mm).

L'interferometria misura altresì distanze piccole e medio - piccole, utilizzando il fenomeno delle frange di interferenza: è garantita una precisione assoluta molto elevata, a fronte di buone precisioni rela-

tive (*precisione relativa = precisione assoluta/portata utile*).

L'avvento del sensore di tipo laser ha esteso l'impiego della tecnologia interferometrica fino ad alcune decine di metri, conservando incertezze dell'ordine di alcuni centesimi di millimetro. Il processo è particolarmente sensibile ai fattori ambientali ma si possono definire tecniche di compensazione in grado di limitare tali effetti e garantire una sufficiente stabilità operativa.

Un impiego importante della tecnologia laser è legato ai recenti sistemi trasportabili di scansione terrestre: si tratta di dispositivi che acquisiscono nuvole di punti con riferimento a campi di vista pressoché panoramici (praticamente sferici) e si avvalgono di sofisticati motori (piezoelettrici) e servomeccanismi (encoder lineari e angolari) per la gestione veloce e il controllo (ottico-meccanico) della movimentazione.

La precisione relativa è superiore a  $10^{-4}$ .

Le nuvole di punti sono organizzate secondo una matrice che contiene la posizione spaziale dei punti, l'informazione di colore (RGB) e la radianza dell'energia riflessa.

La risoluzione della scansione sull'oggetto è funzione della distanza stazione-oggetto, delle inclinazioni azimutali e zenitali del fascio laser, come pure della morfologia delle superfici in gioco; la precisione nella posizione dei punti è funzione ancora della distanza, della divergenza del fascio (diametro dello spot sulla parete), della morfologia, della riflettività delle superfici e delle condizioni ambientali.

La tecnica di rilevamento per scansione non fornisce elementi di controllo (nessuna ridondanza statistica) sui punti raccolti, se non ripetendo la misura da posizioni differenti, ricostruendo separatamente la superficie in gioco ed eseguendo poi gli opportuni confronti statistici.

Strumenti speciali della famiglia sono i laser-radar (Fig. 2), prodotti dalla belga Metris (ora di Nikon Metrology), a modulazione di frequenza (*Frequency-Modulated Coherent Laser Radar*).

Si tratta di dispositivi a scansione (velocità di acquisizione fino a 1.000 punti per secondo), in grado di operare in ambiente interno ed esterno (range da 1 a 24 m o da 1 a 60 m) con qualsiasi condizione di luce e anche su superfici in grado di restituire energia (riflessa) ridotta fino all'1%, come nel caso di oggetti molto scuri o molto riflettenti (statue metalliche, fusoliere di aerei, barche, ecc.).

Le precisioni vanno da 100  $\mu\text{m}$  su 10 m, a 240  $\mu\text{m}$  su 24 m; il campo di lavoro è di 360° (azimutale) per 120° (zenitale):

è possibile, pertanto, operare nell'ambito del monitoraggio di strutture e manufatti per l'analisi di fratture da fatica e di deformazioni, sia in ambito stazionario sia dinamico (per esempio, vibrazioni e sismi).

L'Imager 5006i (e 5006h) di Zoller&Froehlich (commercializzato da Leica come HDS6100 e 6200, rispettivamente) è invece un laser scanner innovativo, molto compatto e adatto per interni fino a circa 80 m, sia in ambito industriale sia strutturale (Fig. 3a, b).

Lo strumento acquisisce nelle due versioni rispettivamente 500.000 punti e 1.000.000 di punti per secondo, cosa che consente di utilizzarlo anche in contesti dinamici.

I tempi di acquisizione di una scansione panoramica (360° orizzontale x 310° verticale) sono di qualche decina di minuti, a fronte di un campionamento di altissima densità.

Il campo di scansione è dunque quasi sferico, la precisione è di pochi mm (entro 50 m) e la misura può essere eseguita su parete naturale, anche in condizioni di energia riflessa limitata (5%). La gestione delle operazioni è effettuabile da PC in modalità remota, grazie a una procedura di collegamento wireless.

Con l'Imager sono disponibili diverse soluzioni per l'acquisizione delle immagini da mappare sul modello di punti: un adattatore meccanico ad hoc per la bassetta del laser scanner, in alternativa allo strumento, a supporto di una qualsiasi fotocamera reflex (Fig. 3c) di ridotta lunghezza focale (in questo modo, si opera dalla medesima posizione della scansione e quindi senza introdurre parallassi fra i punti campionati e i pixel immagine), una soluzione con fotocamera collegata allo strumento e calibrata dal costruttore (Fig.3a), oppure una camera panoramica esterna con obiettivo *fish-eye*.

In analogia con l'Imager, è disponibile la serie di laser scanner compatti (con compensatore) GLS1000 e 1500 di Topcon, con acquisizione sub-panoramica (360°x70°), rispettivamente di 3.000 e 30.000 punti per secondo e fotocamera digitale interna.



Figura 3a, b, c - L'Imager di Zoller&Froehlich (a), l'HDS 6100 di Leica (b) con il supporto alla fotocamera (c).

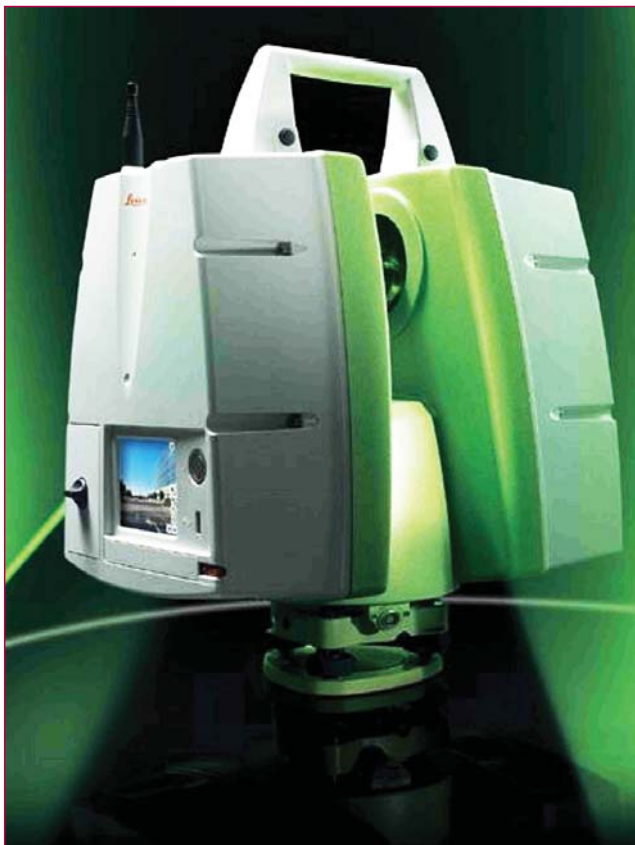


Figura 4 - La ScanStation C10 di Leica, con fotocamera.

Una soluzione particolare è rappresentata poi dalle recenti ScanStation di Leica (Fig. 4), che aggiungono alla possibilità di scansione panoramica le operatività di una moderna stazione totale robotizzata, con stazionamento fine, centrimento forzato, puntamento e osservazione di punti singoli. Abbastanza veloce (50.000 punti/s) e con registrazione interna, il sistema è dotato di foto-camera integrata per la texturizzazione fotografica diretta della nuvola di punti (cioè immagini già orientate nel sistema di riferimento strumentale e nuvole di punti colorate).

#### LA TECNICA: PROGETTO DELLA SCANSIONE

La fase di acquisizione dei punti (campionamento) è strettamente condizionata dalla morfologia e dimensioni dell'oggetto, dal livello di dettaglio richiesto (Fig. 5) e ovviamente dalle precisioni attese ( $\sigma$ ).

È possibile supporre (Barber et al., 2003) che la dimensione  $dr$  del più piccolo dettaglio riconoscibile sul modello rilevato sia pari a circa tre volte il passo lineare (medio) di campionamento ( $s$ ), con un livello di confidenza statistica pari al 60% ( $dr \approx 3s$ ).

Si rammenta che  $s = d\delta$ , dove  $d$  è la distanza media fra scanner e oggetto e  $\delta$  lo step angolare della scansione; il valore  $s$  dipende ovviamente anche dalle condizioni geometriche d'impatto del fascio con le pareti dell'oggetto.

La normativa inglese (citata) suggerisce, inoltre, che il campionamento sia realizzato secondo una griglia con passo lineare  $s$  praticamente costante nelle due direzioni coordinate, orizzontale e verti-

cale, e non superiore alla precisione attesa ( $s \leq \sigma$ ).

Il diametro  $b$  dello spot del fascio laser deve altresì rispettare, alla distanza massima di acquisizione, la condizione  $b = d \cdot \alpha \leq 2s$ , essendo  $\alpha$  la divergenza angolare del fascio (mrad).

Nel progetto vanno considerati, inoltre, gli aspetti connessi alla texturizzazione fotografica del modello di punti; come sottolineato, solo con fotocamere incorporate nello strumento, è garantita a priori la conoscenza dei parametri dell'orientamento interno ed esterno e pertanto la sovrapposizione proiettiva automatica dei pixel immagine sui punti modello (nuvola colorata).

Negli altri casi, invece, si dovrà operare manualmente, proiettando un'immagine alla volta sulla nuvola attraverso parecchi punti omologhi, preventivamente selezionati.

In alternativa al processo manuale, se la foto-camera è collegata rigidamente allo scanner, si può utilizzare un software di gestione che controlla direttamente l'integrazione fra pixel immagine e punto nuvola.

È possibile procedere anche utilizzando una camera qualsiasi ma alloggiata sulla basetta dello scanner in modo da riprodurre la posizione di scansione. Le immagini così acquisite sono collegate fra loro, via software, a creare nuove immagini panoramiche (per esempio, con il package *PTGui* di New House Internet Services) da proiettare sui punti della scansione. Anche la texturizzazione richiede riprese, opportunamente sovrapposte fra loro e con diversificati punti di vista; è comunque difficile, a operazione conclusa, gestire la visualizzazione della mappatura fotografica sull'intero modello.

#### UN'IPOTESI IN ACQUISIZIONE

L'iter della fase di scansione si può ipotizzare secondo la seguente sequenza:

- si fissa la precisione attesa  $\sigma$ , legandola eventualmente alla scala della rappresentazione (si veda la figura 5) o alla minima dimensione del dettaglio riconoscibile. In questo secondo caso, posto  $dr = 3s$  (livello di confidenza del 60%, con  $s = \text{step lineare}$ ), si può assumere  $dr \approx 3\sigma$  da cui  $\sigma = dr/3$ ;
- si definisce l'ampiezza dell'intorno  $d$  riguardante l'operazione di rilievo;
- si sceglie il sistema di scansione laser più adatto;
- si calcola il diametro massimo dello spot laser, sulla base dei valori di divergenza angolare del fascio, nell'area di interesse:  $b = d\alpha$ ;
- si deduce il valore  $s$  dello step lineare:  $\sigma \geq s \geq b/2$ ;
- si ricava lo step angolare  $\delta$  da imporre nel processo di scansione, che deve rientrare nelle capacità di movimentazione dello strumento:  $\delta = \{[s/d] 180^\circ / \pi\}^\circ$ ;
- si deduce la dimensione minima  $dr = 3s$ , riconoscibile sull'oggetto.

SCALA	STEP LINEARE dei PUNTI	PRECISIONE	UTILIZZO
1:10	2.0 mm	± 2.0 mm	piccoli dettagli/oggetti (fino a 5 m x 5 m)
1:20	4.0 mm	± 4.0 mm	dettagli più grandi/oggetti (fino a 10 m x 10 m)
1:50	15.0 mm	± 15.0 mm	piccole strutture (fino a 20 m x 30 m)
1:100	25.0 mm	± 25.0 mm	strutture più grandi (fino a 40 m x 60 m)

Figura 5 - Relazioni fra scala della rappresentazione, precisioni e step lineare.

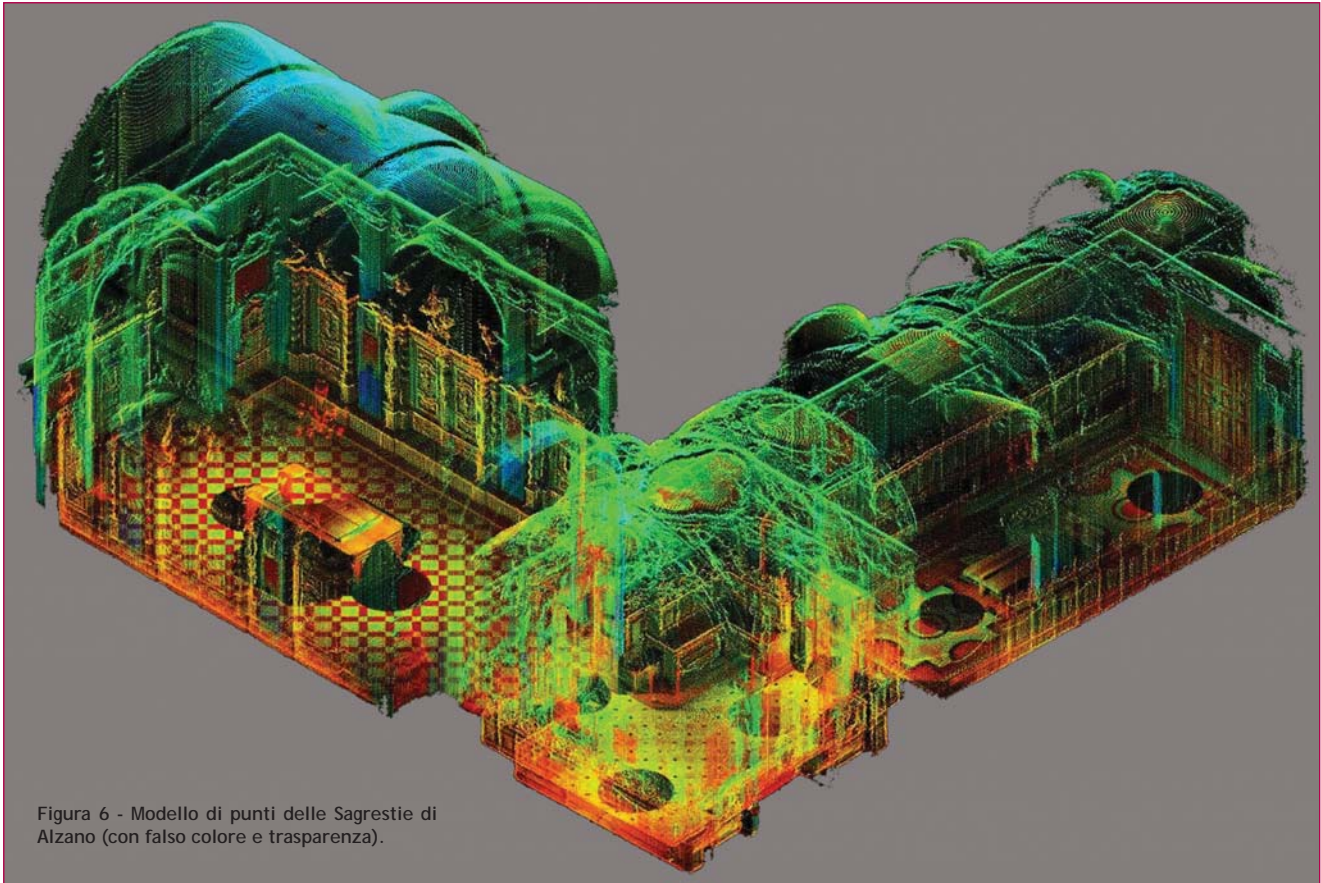


Figura 6 - Modello di punti delle Sagrestie di Alzano (con falso colore e trasparenza).

Per esempio, nel caso di un edificio:

- scala di rappresentazione scelta = 1:50 □ precisione attesa  $\sigma = \pm 15$  mm;
- intorno di lavoro 50 m;
- laser scanner Leica HDS 6100;
- valore massimo dello spot lineare (dati del costruttore)  $b = 14$  mm;
- step lineare:  $15 \text{ mm} \geq s \text{ (mm)} \geq 14/2 \text{ mm}$ ; □  $s = 10$  mm;
- $\delta = \{[10 \text{ mm}/50 \text{ m}] 180^\circ / \Pi\}^\circ = \{1.2 \cdot 10^{-2}\}^\circ$  □ compatibile con la minima movimentazione angolare del sistema;
- $p$  (60%) = 30 mm.

#### LA TECNICA: COSTRUZIONE DEL MODELLO SPAZIALE

Il modello 3D di punti è realizzato mediante opportuna aggregazione delle varie nuvole: per ottimizzare il procedimento, sotto l'aspetto della propagazione dell'errore, si può operare collegando le scansioni a una nuvola centrale, scelta come riferimento geometrico.

Le posizioni di scansione debbono offrire la più ampia visibilità verso le superfici di interesse dell'oggetto, riducendo al minimo le zone di occlusione e quelle in ombra.

I problemi connessi a visibilità e occlusioni rappresentano, infatti, la causa principale della mancanza di informazioni cioè della presenza di vuoti all'interno delle nuvole di punti.

Nei casi in cui sia stato eseguito un campionamento molto elevato, è opportuno applicare un processo di filtraggio sulla numerosità dei punti raccolti, in relazione alla complessità morfologica delle superfici dell'oggetto.

La fase di elaborazione delle nuvole di punti, della loro integrazione in un unico modello 3D e dell'eventuale posizionamento spaziale (si parla di registrazione e georeferenziazione) assume un ruolo significativo nella tecnica di rilievo per scansione.

L'operazione di collegamento delle nuvole è eseguita attraverso algoritmi che producono un *best-fitting* a minimi quadrati: si opera su target, applicati preventivamente sull'oggetto, e/o su forme geometriche (ben riconoscibili) comuni alle diverse nuvole. La georeferenziazione comporta poi la localizzazione dei target (coordinate  $x, y, z$ ) in un sistema di riferimento spaziale univoco, scelto ad hoc.

La figura 6 mostra un modello di punti ricostruito, visualizzato in falso colore e con effetto trasparenza: si tratta degli interni delle tre Sagrestie barocche di Alzano Lombardo in Val Seriana, rilevate ad alta risoluzione con laser scanner HDS 6100 ed elaborate con software Leica.

Ai fini della ricostruzione di un modello foto-realistico (con informazione RGB) è importante la qualità delle immagini registrate con la fotocamera associata (internamente o esternamente) allo scanner.

È dunque necessario che non vi siano sovra o sotto-esposizioni e ombre nelle foto e si verifichi un buon accordo radiometrico fra immagini contigue, controllando inoltre la giusta correlazione geometrica fra la risoluzione delle immagini e il passo lineare del campionamento in acquisizione. In figura 7 è presentata l'immagine sferica relativa all'interno della II Sagrestia di Alzano, con sovrapposizione sia della radianza (B/N) sia del colore RGB.

Il modello finale di punti oggetto può essere trasformato anche in un modello di superfici, attraverso il meshing dei punti, e utilizzato per la ricostruzione spaziale di dettagli monumentali (Fig. 8), per l'estrazione di elaborati 2D, come contorni vettoriali, profili, sezioni, e per la generazione di ortofoto.

È possibile, altresì, produrre video con percorsi virtuali all'interno del modello spaziale e organizzare tutte le informazioni acquisite in un geo-database, su piattaforma GIS, per l'analisi geometrica e tematica (forma, materiali, degrado, ecc.) dell'oggetto di interesse.



Figura 7 - Photo-texturing del modello di punti delle Sagrestie (radianza e colore).



### FRA TECNOLOGIA E TECNICA: IL SOFTWARE

Il software per il processamento delle nuvole (spesso centinaia di milioni di punti) riveste un ruolo essenziale nella tecnica di rilievo mediante scansione. In genere, sono utilizzati vari moduli, indicati come software per il controllo operativo e software dedicato all'applicazione. Il software di controllo governa l'hardware (movimentazione, scansione, parametrizzazione) durante l'acquisizione e offre le funzioni primarie di visualizzazione 2D-3D, di pulizia e registrazione dei dati on-site. Il software di applicazione garantisce invece specifiche funzioni, singole o plurime, orientate a temi e a problematiche connesse alle finalità dell'intervento. Il costruttore Zoller&Froehlich, per esempio, suggerisce per l'acquisizione e per l'elaborazione dei dati i package riportati nella figura 9. Normalmente, ai software specifici se ne affiancano altri legati all'elaborazione grafica.

Queste annotazioni si possono chiudere sottolineando come le applicazioni e le sperimentazioni della tecnica laser evidenzino tuttora l'esigenza di una componente manuale rilevante, soprattutto per l'estrazione di elaborati geometrici vettoriali, come sezioni, profili, prospetti (Fig. 10), e per la

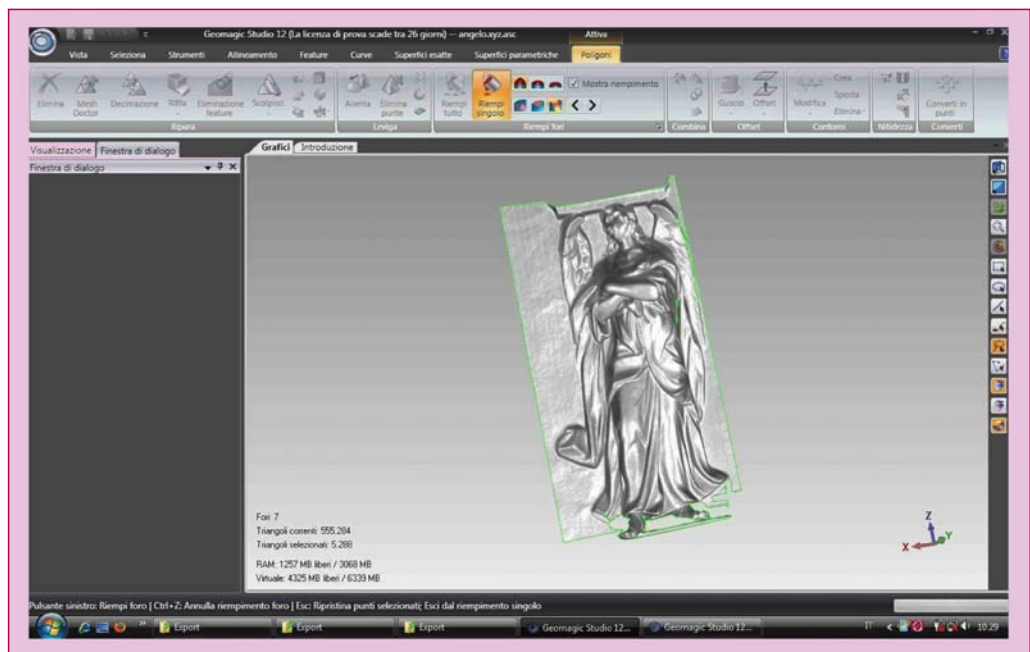


Figura 8 - Ricostruzione in Geomagic Studio di un dettaglio della II Sagrestia.

texturizzazione fotografica delle nuvole: quest'ultimo aspetto, oggi sempre più importante, non risulta ancora soddisfatto dall'automazione del processo, seppure il mercato già offra la possibilità della creazione diretta di modelli colorati di qualità.

Z+F LaserControl	LFM SOFTWARE	VSF (Visual Sensor Fusion)	Geomagic	3D Reconstructor
Z+F software for visualization, registration and post-processing  Operation software for the laser scanners of the Z+F IMAGER family	Z+F software for modelling point clouds, link to CAD systems, clash checks  <a href="#">LFM Server</a> <a href="#">LFM Viewer/ViewerLite</a> <a href="#">LFM Register</a> <a href="#">LFM Modeller</a> <a href="#">LFM NetView</a>	Software tool for 3D suspect measurements and for the measurement of objects	Software to transform 3D Scan Data into Accurate Digital Models  Allows fast and simple 3D digital inspection	Evaluation software for the meshing of point clouds, overlapping with digital photos and tolerance analysis

Figura 9 - Software di supporto, suggerito da Z+F.

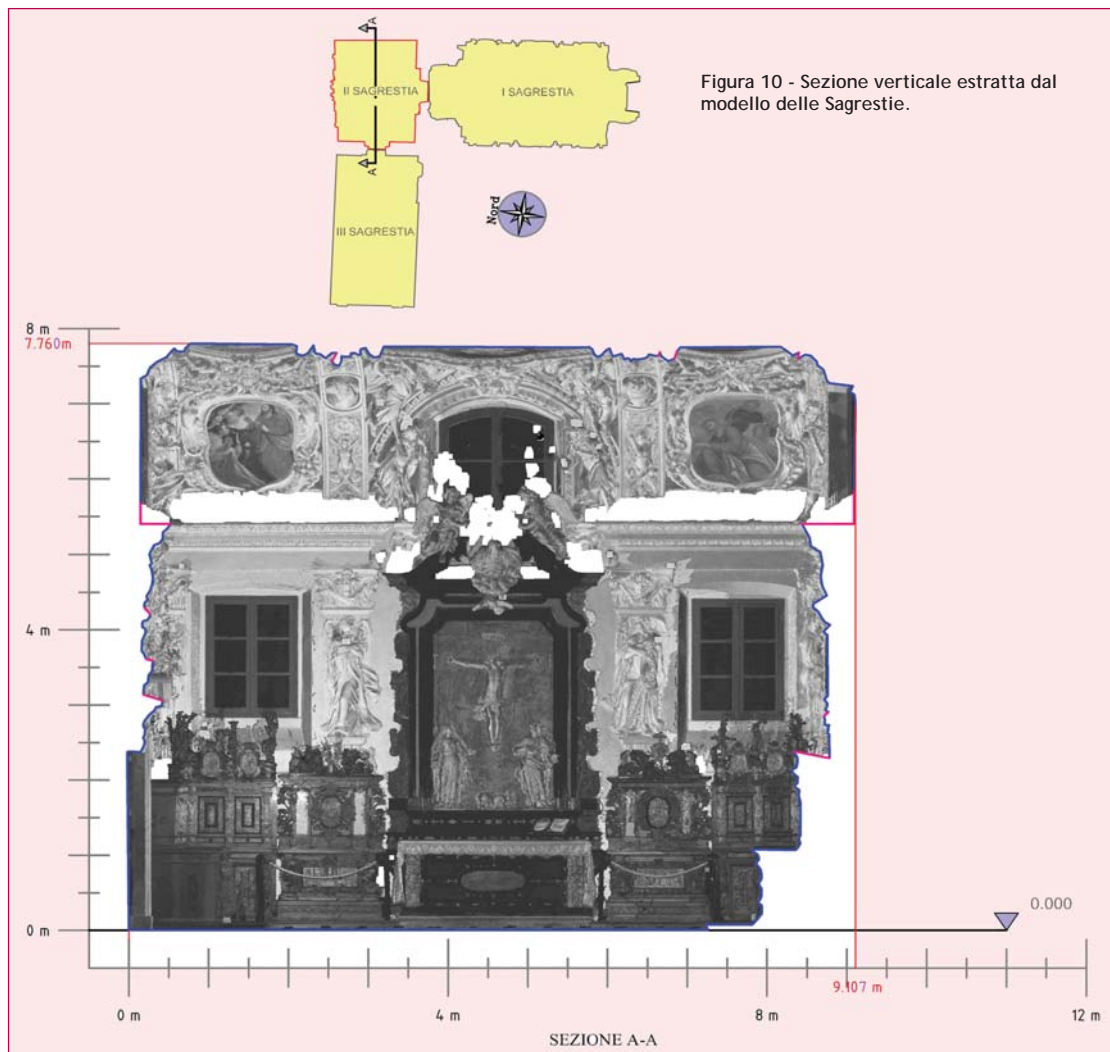


Figura 10 - Sezione verticale estratta dal modello delle Sagrestie.

#### BIBLIOGRAFIA

- Barber D.M., Mills J.P., Bryan P.G. (2003), *Towards a standard specification for terrestrial laser scanning* - SPRS International Archives, 34 (5-C15).
- Boehler W., Marbs A. (2002), *3D scanning instruments* - Proceedings of ISPRS - Commission V Symposium, Corfu (Greece) - vol. XXXIV - part. 5.
- Colombo L., Marana B. (2010), *Building reconstruction and texturing* - Geoinformatics - vol.2.
- Colombo L. (2009), *La costruzione di modelli foto-realistici dell'edificato* - Archeomatica - vol. 0.
- Colombo L., Marana B. (2009), *Photo-textured building models* - GEOconnexion - vol. 2.
- Doneus M., Pfennigbauer M., Studnicka N., Ullrich A. (2009), *Terrestrial waveform laser scanning for documentation of cultural heritage* - Proceedings of CIPA - Kyoto (Japan).  
Siti web dei costruttori.

#### ABSTRACT

*Terrestrial laser scanning technology for Cultural Heritage documentation - The knowledge of shape, dimensions and georeferencing can represent an important requirement in Cultural Heritage documentation. The acquisition of this information is nowadays more and more connected with active optical sensors, such as terrestrial laser scanners. These devices emit light energy towards objects of interest and record the return rate: this way, a non-contact approach to modeling and imaging is allowed. The paper, starting with an overview on terrestrial scanning technology, shortly analyzes the technical enhancement regarding automation for virtual reconstruction and photo-texturing.*

#### PAROLE CHIAVE

LASER, TECNOLOGIA INTERFEROMETRICA.

#### AUTORE

LUIGI COLOMBO  
LUIGI.COLOMBO@UNIBG.IT