

Tecniche LIDAR per il rilevamento tridimensionale e la calibrazione di rilievi storici di un edificio monumentale

Raffaella Brigante, Fabio Radicioni, Aurelio Stoppini

DICA, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93
06125 Perugia, Tel. 075 5853765, Fax 075 5853756, e-mail topas@unipg.it

Riassunto

Il rilievo di un edificio monumentale di notevole interesse storico e architettonico ha fornito l'occasione per effettuare test sperimentali su strumenti LIDAR terrestri aventi diverse caratteristiche. Oggetto della sperimentazione è il Tempio della Consolazione a Todi (PG), maestoso edificio di culto a pianta centrale costruito a partire dal 1508 su progetto attribuito a Donato Bramante. Gli strumenti utilizzati sono un laser scanner a misura di fase (Leica HDS6000) e un secondo apparato a tempo di volo (Leica C10). Le nuvole di punti acquisite con i due strumenti sono state orientate su target determinati preliminarmente con un rilievo topografico tridimensionale e riunite a formare un modello unico comprendente l'interno e l'esterno del grande edificio. Con lo scanner C10 è stata testata una procedura di orientamento relativo delle scansioni basata sui soli dati delle scansioni stesse. Contestualmente alle scansioni sono state acquisite immagini fotografiche digitali ad alta risoluzione dell'esterno e dell'interno dell'edificio in prospettiva sferica, con punto nodale dell'ottica coincidente con il centro di presa delle scansioni. Le elaborazioni sono state eseguite con il software Cyclone. Le nuvole di punti ottenute con i due diversi strumenti sono state poste a confronto e riunite in un unico modello dal quale sono stati ricavati elaborati con un notevole livello di dettaglio, che forniscono un'accurata documentazione dello stato di fatto del monumento. Il modello di elevata accuratezza derivante dalle scansioni laser è stato utilizzato per la calibrazione di rilievi storici del monumento, alcuni dei quali dimensionati con unità di misura antiche.

Abstract

The survey of a monumental building of a great historical and architectural interest has provided an opportunity to perform experimental tests of terrestrial LIDAR instruments with different characteristics. The object of the experimentation is the Temple of Consolation in Todi (central Italy), a majestic cross shaped church with a central dome, built starting from 1508 on a design attributed to Donato Bramante. The instruments used are a phase measure laser scanner (Leica HDS6000) and a time of flight one (Leica M10). The point clouds acquired with the two scanners have been oriented by means of optical targets determined by a three-dimensional topographic survey. Then the clouds have been combined to form a single model including the interior and exterior of the large building. With the C10 scanner has been tested a procedure based on the relative orientation of the scans using only the scan data. In parallel with the scans were acquired high-resolution digital photographs of the exterior and interior of the building in spherical perspective, with the focal point of the camera lens coinciding with the center of each scan. The processing has been made using the Cyclone software. The clouds of points obtained by the two different instruments have been compared and combined into a single model from which have been obtained drawings with a high level of detail, providing a thorough documentation of the actual state of the monument. The high accuracy model derived from laser scanning has been used for the verification and calibration of historical surveys of the monument, some of which referring to old measure units.

1. Descrizione, cenni storici e documentazione

Il Tempio di Santa Maria della Consolazione sorge nel luogo dove si venerava un'immagine della Vergine col Bambino e Santa Caterina, ritenuta miracolosa dalla popolazione di Todi.

L'immagine, trecentesca, fu riscoperta durante dei lavori eseguiti su un muro. La leggenda narra che il dipinto era dimenticato e coperto da rovi finché un muratore cieco ad un occhio, mentre cercava tra le spine alcune pietre per i lavori, ritrovò l'edicola e la pulì con un fazzoletto che poi si passò sulla fronte per asciugare il sudore, recuperando miracolosamente la vista. La notizia si diffuse e venne eretta una piccola cappella a protezione dell'immagine. Nel 1508 iniziarono i lavori per la costruzione del Tempio.

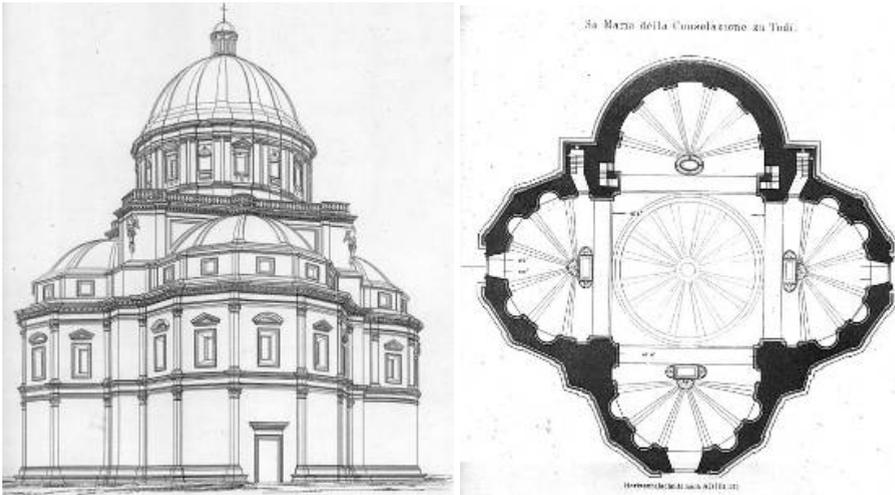


Figura 1 – Paul Laspeyres, *Vista prospettica e pianta di Santa Maria della Consolazione*, 1869.

L'imponente edificio è a croce greca e si imposta su quattro grandi pilastri posti ai vertici di un quadrato sui lati del quale appoggiano le absidi. Delle quattro absidi, tre sono poligonali (ciascuna composta da cinque lati di un dodecagono), mentre quella dell'altare principale, a nord, è semicircolare. Sopra il corpo quadrato si estende una terrazza, sopra la quale è costruito il tamburo e la cupola che si chiude con una lanterna. Le absidi sono coperte da quattro semicupole finestate nella parte inferiore. Il tempio è costruito con pietra calcarea proveniente da cave locali e dai resti della demolita rocca medioevale.

Il disegno fu già dal '500 attribuito al Bramante, anche se non ci sono documenti contemporanei in cui se ne parli, mentre è considerata certa la partecipazione di altri celebri architetti nelle diverse fasi del lungo periodo di costruzione. Tra questi citiamo: Cola da Caprarola (1508-12); Baldassarre Peruzzi (1518); Antonio da Sangallo il Giovane (1531-32); Jacopo Barozzi detto il Vignola (1565); Galeazzo Alessi (1567); Ippolito Scalza (1584-97).

È comunque evidente la relazione tra i disegni lasciati da Bramante per la Basilica di San Pietro a Roma e il Tempio umbro. L'ipotesi più accreditata è quella che l'artista abbia lasciato disegni o schizzi che poi furono utilizzati e in parte modificati dagli altri architetti che contribuirono alla realizzazione dell'opera.

L'opera fu condotta al termine, con la collocazione della croce sulla lanterna, il 16 aprile 1607.

Le grandi statue raffiguranti gli apostoli, collocate all'interno della chiesa nelle nicchie delle tre absidi poligonali, sono attribuite alla scuola dello Scalza. Vicino al pilastro sud-est è collocata la statua lignea di Papa Martino I, posta dopo la pestilenza del 1630 dai cittadini sfuggiti al contagio.

L'altare maggiore, con quattro colonne di marmo nero-ceruleo, fu costruito nel 1693 su disegno di Andrea Polinori di Todi: in esso è custodito l'affresco che dette origine al tempio. Negli altari barocchi delle nicchie sono inglobati quelli più antichi costituiti da mense su quattro pilastrini. Nel museo civico di Todi è esposto un modello ligneo del tempio, cinquecentesco ma di datazione e attribuzione non certa.



Figura 2 – Modello ligneo del Tempio. Todi, Museo Civico.

Nel corso della presente ricerca sono stati reperiti vari elaborati storici, tra cui particolarmente significativo è un rilievo della fine del 1700 effettuato da Seroux D'Agincourt. I disegni, eseguiti alla scala di 1:200, sono dimensionati in palmi (1 palmo = 22.34 cm).

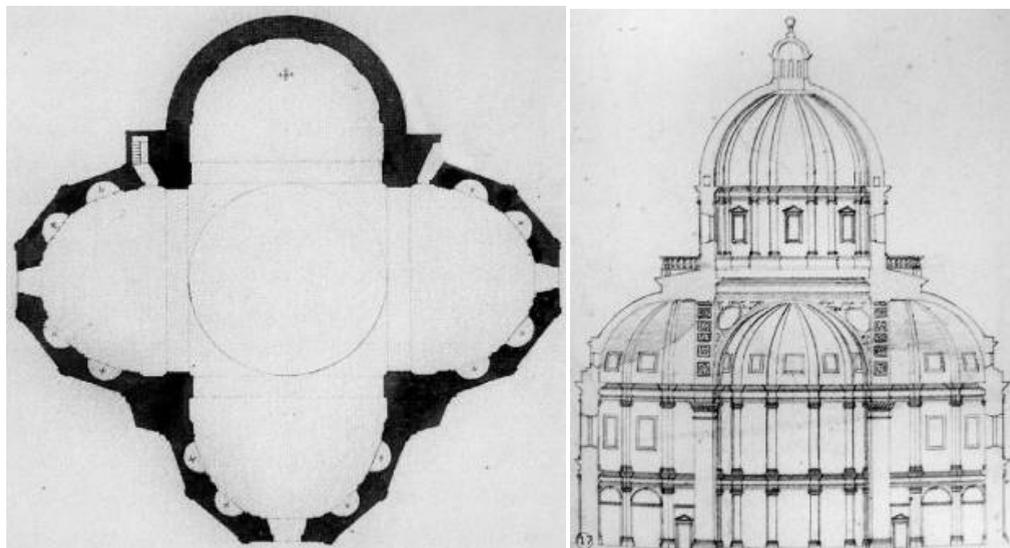


Figura 3 – Rilievi di Seroux D'Agincourt (fine XVIII sec.).

2. Rilievo con strumenti LIDAR terrestri

Per il rilievo laser scanning del Tempio della Consolazione sono stati utilizzati due diversi strumenti:

- Leica HDS 6000 per le scansioni dell'interno (Fig. 4, sin.);
- Leica C10 per le scansioni esterne, più una interna per effettuare l'allineamento della nuvola di punti complessiva (Fig. 4, ds.).

Le caratteristiche dei due scanner sono riportate nelle tabelle 1 e 2.



Figura 4 – Leica HDS 6000 (a sinistra); Leica C10 (a destra).

Lo scanner HDS6000 è uno strumento a misura di fase, molto preciso (accuratezza nel posizionamento ± 6 mm fino a 25 m di distanza, ± 10 mm fino a 50 m di distanza), ma ha una portata limitata (non molto superiore ai 50 m). Lo scanner C10 è uno strumento a tempo di volo, con precisioni paragonabili a quelle del precedente ma con portate superiori (circa 300 m).

Per allineare le singole scansioni in una nuvola di punti totale sono stati posizionati, in vari punti della chiesa, 13 target “black and white” (Fig. 5, sin.) riconosciuti automaticamente dallo scanner C10 e individuati manualmente sulle scansioni effettuate con lo scanner HDS 6000. Tali target sono stati rilevati tridimensionalmente con una stazione totale (Fig. 5, ds.) in modo da creare un sistema di riferimento locale univoco per tutte le scansioni.

In totale sono state eseguite 4 scansioni interne, di cui 3 con l’HDS 6000 (L1, L2, L3) e una con il C10 (100), e 5 scansioni esterne (200, 300, 400, 500, 600) da stazioni interscambiabili, di cui una collegata alla stazione interna 100 (Fig. 6). La risoluzione di scansione è stata fissata in 1 punto/6 mm a 10 m di distanza.

Le scansioni esterne sono state realizzate in modo tale che da ognuna fosse visibile la precedente e la successiva in modo da formare una poligonale. In questo modo l’allineamento delle scansioni viene eseguito automaticamente dal software di elaborazione della nuvola di punti laser (Cyclone

v.7.1). L'allineamento (o registrazione) delle scansioni consiste in una rototraslazione spaziale delle singole nuvole di punti acquisite in modo tale da riportarle in un unico sistema di riferimento. Per effettuare tale operazione è necessario avere un certo numero di punti comuni tra le scansioni.

Tabella 1 – Caratteristiche dello scanner HDS 6000 (documentazione Leica).

Principali dati tecnici prestazionali del Leica HDS6000	
Tipo di strumento	Scanner laser compatto, phase-based, rilevamento a doppio asse, velocità ultralevata con precisione per il rilievo di pendenze e campo visivo completo
Interfaccia utente	Touch panel onboard, notebook esterno, tablet PC o PDA
Memorizzazione dati	Disco fisso integrato
Precisione delle misure singole	Posizione 6 mm con una portata da 1 m a 25 m; 10 mm con una portata di 50 m Distanza ≤4 mm con albedo 90% fino a 25 m; ≤5 mm con albedo 18% fino a 25 m ≤5 mm con albedo 90% fino a 50 m; ≤6 mm con albedo 18% fino a 50 m Angolo (oriz./vert.) 125 µrad/125 µrad (7,9 mgon/7,9 mgon) Sigma uno
Dimensione spot	3 mm in uscita (secondo la definizione di Gauss) + divergenza di 0,22 mrad; 8 mm a 25 m; 14 mm a 50 m;
Precisione della superficie modellata**/rumore	2 mm a 25 m; 4 mm a 50 m, con albedo 90%; Sigma uno 3 mm a 25 m; 7 mm a 50 m, con albedo 18%; Sigma uno
Acquisizione del target***	Deviazione standard di 2 mm
Sensore a doppio asse	Selezionabile on/off; risoluzione di 3,6"
Sistema di scansione laser	Portata Intervallo di ambiguità di 79 m 79 m con albedo 90%; 50 m con albedo 18% Velocità di scansione max. 500.000 punti/sec., velocità istantanea massima Densità di scansione a 10 m a 50 m "Anteprima" 50,6 x 50,6 mm 250 x 250 mm Media (4 volte) 12,6 x 12,6 mm 62 x 62 mm Alta (8 volte) 6,3 x 6,3 mm 31,4 x 31,4 mm Molto alta (16 volte) 3,1 x 3,1 mm 15,8 x 15,8 mm Altissima (32 volte) 1,6 x 1,6 mm 7,9 x 7,9 mm
Classe laser	3R (IEC 60825-1)
Luce	Funzionamento garantito da pieno sole a buio completo
Alimentazione	24 V DC; batteria Li-ion integrata (1,5 h) e/o alimentazione opzionale DC esterna (4 h) o AC
Absorbimento di potenza	50 W
Temperatura	Di esercizio: da 0 °C a +40 °C; di immagazzinaggio: da -20 °C a +50 °C

Tabella 2 – Caratteristiche dello scanner C10 (documentazione Leica).

Caratteristiche generali		Sistema di scansione laser	
Tipo di strumento	Laser scanner ad altissima velocità compatto, a impulsi, con compensatore biassiale, precisione per il rilievo di pendenze, lunga portata e campo visivo completo; fotocamera integrata e piombo laser	Tipo	A impulsi; microchip proprietario
Interfaccia utente	Controllo onboard, notebook o tablet PC	Colore	Verde, lunghezza d'onda = 532 nm
Memoria dati	Disco fisso integrato o PC esterno	Classe laser	3R (IEC 60825-1)
Fotocamera	Fotocamera digitale ad alta risoluzione integrata, autoregolante con zoom per riprese video	Portata	300 m con albedo del 90%; 134 m con albedo del 18% (portata minima 0,1 m)
Prestazioni		Velocità di scansione	Massima istantanea: fino a 50.000 punti/s
Precisione delle singole misure		Risoluzione di scansione	
Posizione*	6 mm	Dimensioni punto	Da 0 a 50 m; 4,5 mm (su base FWHH); 7 mm (su base gaussiana)
Distanza*	4 mm	Dimensione griglia	Completamente selezionabile in senso orizzontale e verticale; distanza minima < 1 mm, per tutta la portata; capacità di puntamento sul punto singolo
Angolo (orizzontale/verticale)	60 µrad / 60 µrad (12° / 12°)	Campo visivo	
Precisione della superficie modellata**/rumore	2 mm	Orizzontale	360° (massimo)
Acquisizione del target***	2 mm Std deviation	Verticale	270° (massimo)
Compensatore biassiale	Selezionabile on/off, risoluzione 1", range dinamico +/- 5", precisione 1,5"	Puntamento/visualizzazione:	Senza parallasse, zoom per riprese video integrato
		Ottiche di scansione	Specchio con rotazione verticale su base rotante orizzontale; Smart X-Mirror™ ruota o oscilla automaticamente riducendo al minimo i tempi di scansione
		Capacità di memoria dati	80 GB (disco rigido onboard)
		Comunicazioni	Dynamic Internet Protocol (IP) Address, Ethernet
		Fotocamera digitale a	Immagine singola 17° x 17°: 1920 x 1920 pixel



Figura 5 – Target (a sinistra e al centro); Rilievo dei target (a destra). L'immagine al centro mostra come il target venga visto nel software di elaborazione.

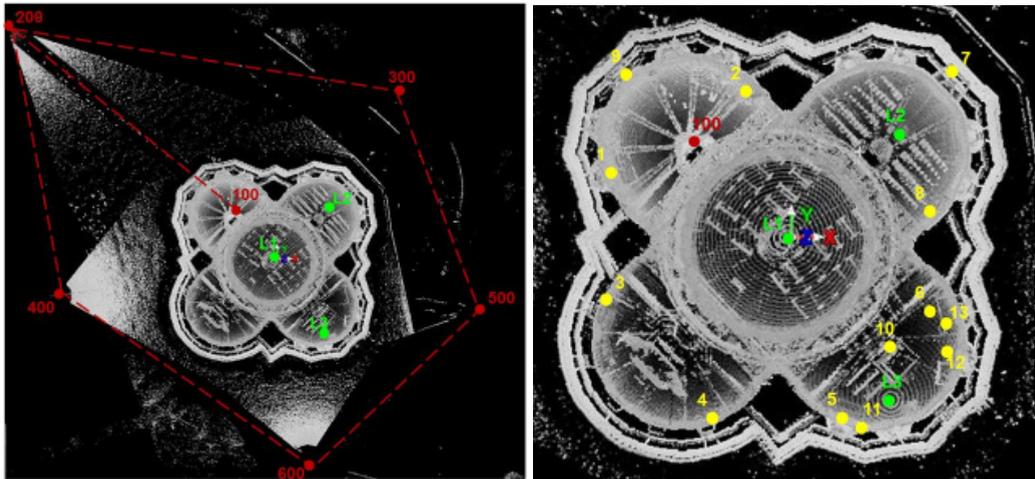


Figura 6 – Vista planimetrica della nuvola di punti complessiva con ubicazione delle stazioni di scansione(sin.) e disposizione dei target (ds.)

Le figure alla pagina seguente riportano alcune viste delle singole nuvole di punti interne (fig. 7) ed esterne (fig. 8).

Le scansioni interne L1, L2, L3 e 100 sono state allineate tramite i target, la cui posizione è riportata a destra in fig. 6. I target sono stati individuati e selezionati manualmente sulla nuvola di punti acquisita (v. fig. 5, al centro).

Le scansioni esterne sono state allineate tra loro con le misure topografiche della rete delle stazioni e collegate a quelle interne tramite i target comuni. In fig. 9 sono mostrate due viste rispettivamente interna ed esterna della nuvola di punti allineata.

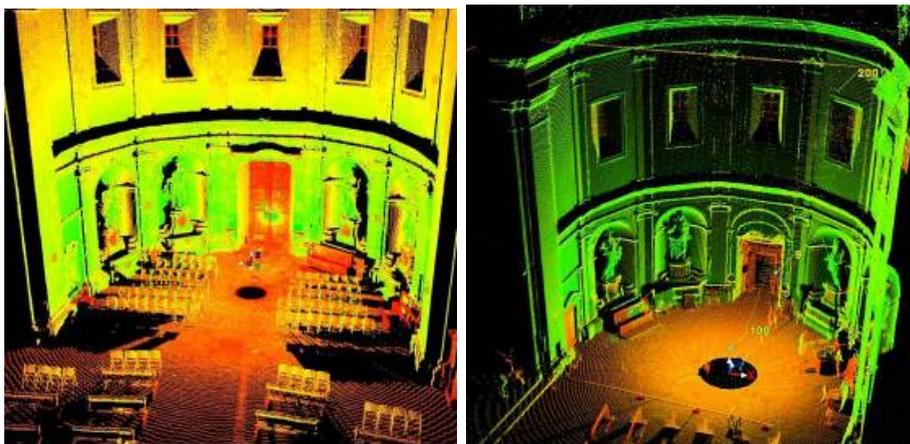


Figura 7 – Esempi di scansioni interne.

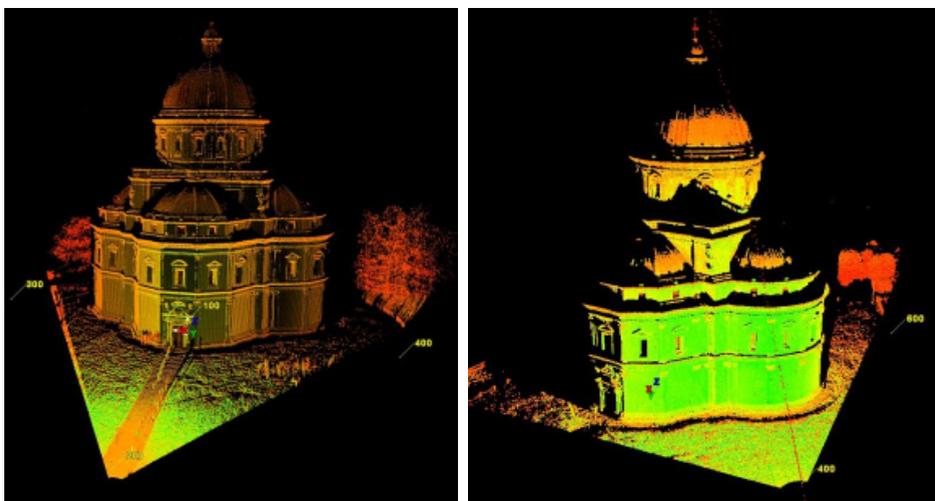


Figura 8 – Esempi di scansioni interne.

Su tutte le stazioni esterne e sulla stazione 100, per effettuare il collegamento topografico, sono stati posizionati dei target Leica HDS Twin Target Pole, automaticamente riconosciuti dallo scanner laser C10 (fig. 10).

La fase di allineamento di tutte le scansioni, interne ed esterne, al fine di ottenere un'unica nuvola di punti ha comportato residui sulle coordinate dei target con un valore massimo di 6 mm (tab. 3).

Vestizione della nuvola di punti

Per ogni stazione laser sia interna che esterna sono state riprese 7 foto della chiesa (6 scattate ogni 60° per completare un giro d'orizzonte e 1 verso l'alto), utilizzando una fotocamera Nikon D90 con obiettivo fisheye montata su testa sferica eccentrica e regolabile (Fig. 11) in modo tale da far coincidere il centro di presa della camera con il centro di acquisizione dello strumento laser. In questo modo le immagini sono già orientate nello stesso sistema di riferimento dell'acquisizione, operazione utile in quanto consente di ridurre i tempi di elaborazione durante la fase di applicazione delle immagini sulla nuvola di punti.

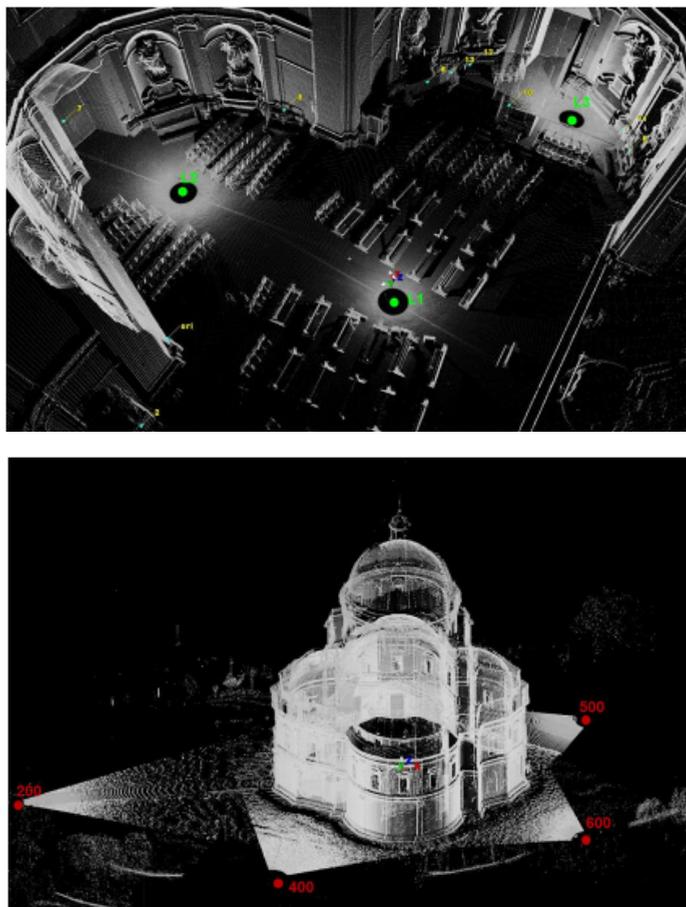


Figura 9 – Vista interna ed esterna della nuvola di punti complessiva.



Figura 10 – Target Leica HDS Twin Target Pole utilizzato per il collegamento tra stazioni del C10.

Tabella 3 – Residui dell'allineamento sulle coordinate dei target.

ConstraintID	ScanWorld	Status	Type	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 2	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	(-0.001; -0.001; -0.003) m
TargetID: 3	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	(-0.002; -0.001; -0.001) m
TargetID: 4	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.006 m	(-0.005; -0.003; -0.001) m
TargetID: 5	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001m	{0.000; -0.001; 0.001} m
TargetID: 5	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.000 m	{0.000; 0.000; 0.000} m
TargetID: 5	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.000 m	{0.000; 0.000; 0.000} m
TargetID: 5	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001 m	{0.000; 0.001; -0.001} m
TargetID: 5	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001 m	{0.000; 0.001; -0.001} m
TargetID: 5	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.000 m	{0.000; 0.000; 0.000} m
TargetID: 6	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	{0.002; -0.002; 0.001} m
TargetID: 7	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	{0.002; 0.000; 0.001} m
TargetID: 8	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	{0.003; 0.001; 0.001} m
TargetID: 8	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	{0.002; 0.002; 0.000} m
TargetID: 8	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.001 m	{-0.001; 0.001; -0.001} m
TargetID: 9	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.004 m	{-0.002; 0.003; 0.002} m
TargetID: 10	aa4475.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	{0.002; 0.001; 0.000} m
TargetID: 10	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	{0.000; 0.001; -0.002} m
TargetID: 10	aa4476.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	{0.002; -0.001; 0.000} m
TargetID: 11	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	{0.000; 0.000; -0.002} m
TargetID: 12	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.002 m	{0.000; -0.001; 0.002} m
TargetID: 13	aa4478.zfs	on	Coincident: Vertex-Vertex	10.000	0.003 m	{0.001; 0.001; -0.002} m

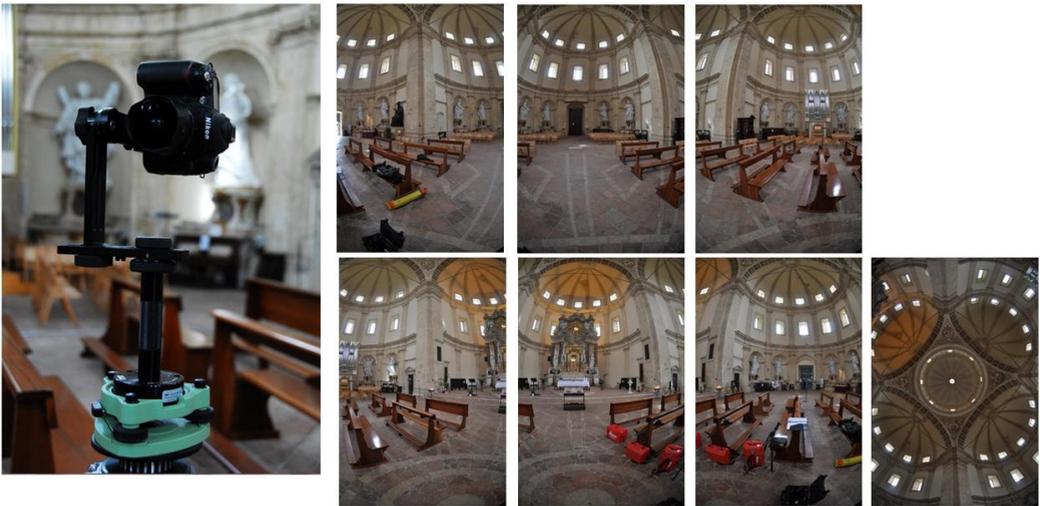


Figura 11 – Fotocamera montata su testa sferica eccentrica e immagini riprese dalla stazione 100.

Le foto prese da ciascuna stazione sono state utilizzate per creare una immagine panoramica sferica tramite il software PTGui (Fig. 12). Dalla panoramica, tramite il software Pano 2QTVR è stata ottenuta un'immagine cubica ovvero 6 immagini che si sviluppano sulle sei facce di un cubo virtuale (Fig. 13) applicabili alla nuvola di punti mediante l'individuazione di alcuni punti omologhi.

L'associazione della radiometria, contenuta nelle immagini fotografiche, ai punti laser ha consentito di "colorare" la nuvola di punti ottenendo una visualizzazione foto realistica (Fig. 14).

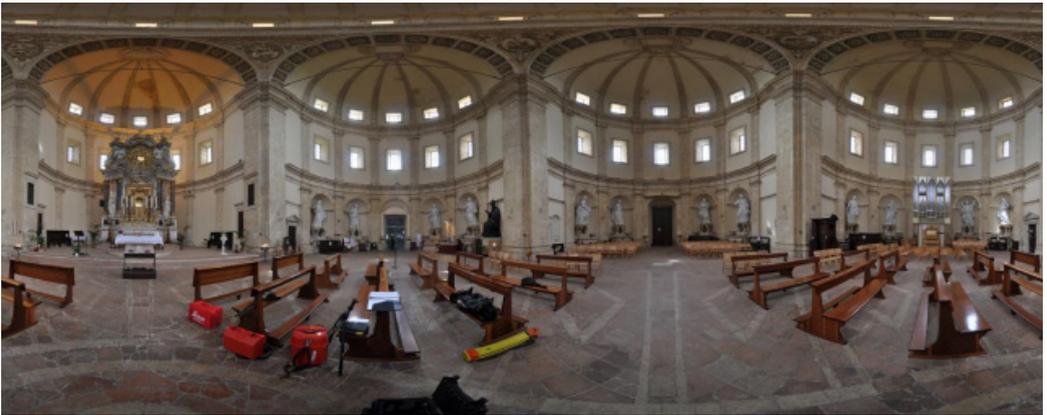


Figura 12 – Immagine panoramica sferica ottenuta dalle immagini di fig. 11.

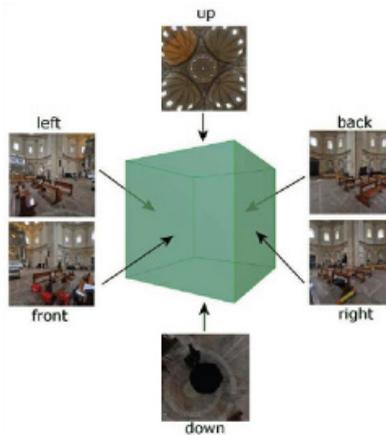


Figura 13 – Immagine cubica riferita alle prese precedenti.

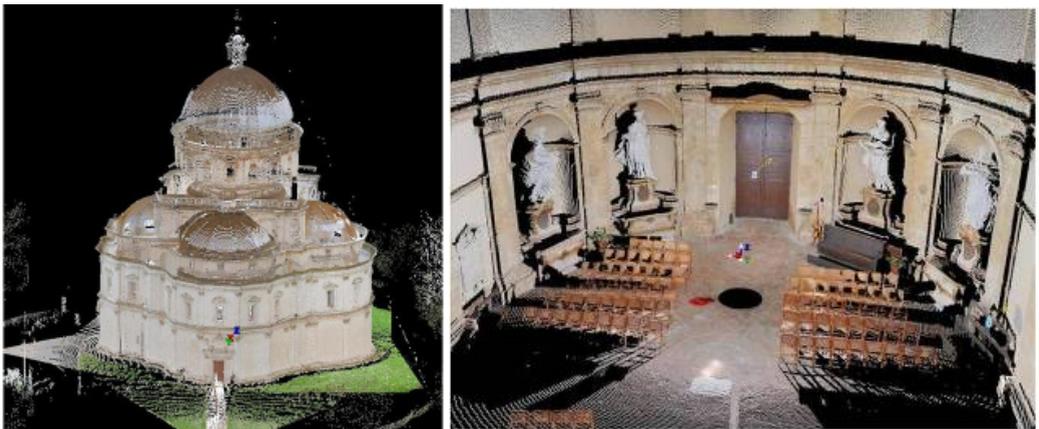


Figura 14 – Nuvola di punti “colorata” con le immagini calibrate su di essa.

3. Restituzione grafica e confronto con rilievi storici

L'ultima fase del lavoro è consistita nella restituzione grafica a partire dalle scansioni laser, ovvero nel disegno di elaborati grafici quali piante, prospetti e sezioni mediante una vettorializzazione della nuvola di punti in ambiente CAD. Questa operazione è avvenuta sempre all'interno del software Cyclone, che, oltre a gestire la nuvola di punti 3D fornendo diverse informazioni (planimetriche, altimetriche, distanze), consente di creare delle "ortoimmagini" orientate secondo un determinato piano (XY per le piante, XZ o YZ per le sezioni) che taglia la nuvola. Tali ortoimmagini sono fornite con i parametri di rototraslazione (file txt) per essere importate in ambiente CAD in scala 1:1, ovvero su di esse è possibile effettuare misure direttamente in metri reali. Vengono inoltre posizionate nel sistema di riferimento esterno della nuvola di punti totale.

Gli elaborati grafici ottenuti sono stati sovrapposti per confronto ai rilievi settecenteschi di Seroux D'Agincourt, dopo averli riportati alla medesima scala tenendo conto dell'unità di misura antica in essi adottata (fig. 15 e 16). Le sovrapposizioni mostrano una buona coincidenza nelle dimensioni generali dell'edificio, ma per alcuni particolari (soprattutto le semicupole laterali) sono emerse alcune discrepanze che si prevede di analizzare meglio con un affinamento delle scansioni da eseguire in futuro mediante ulteriori stazioni sulla terrazza del monumento.

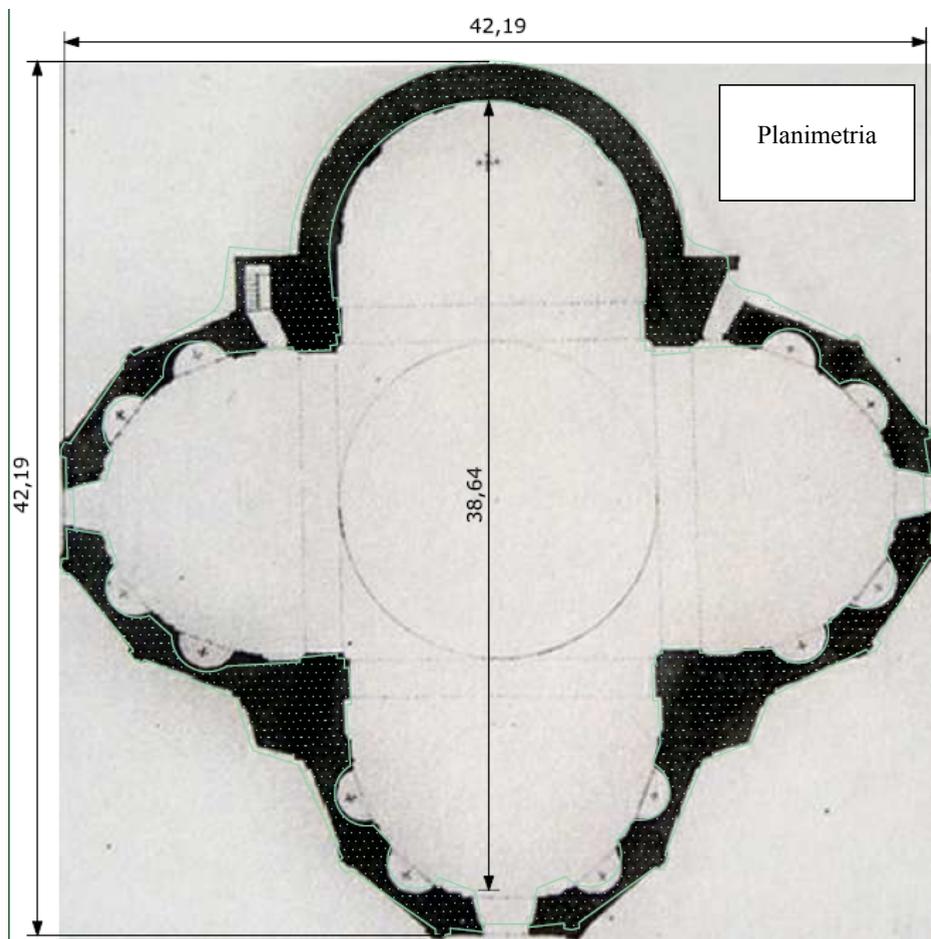


Figura 15 – Sovrapposizione tra il rilievo ottenuto da LIDAR (in verde) e quello settecentesco.

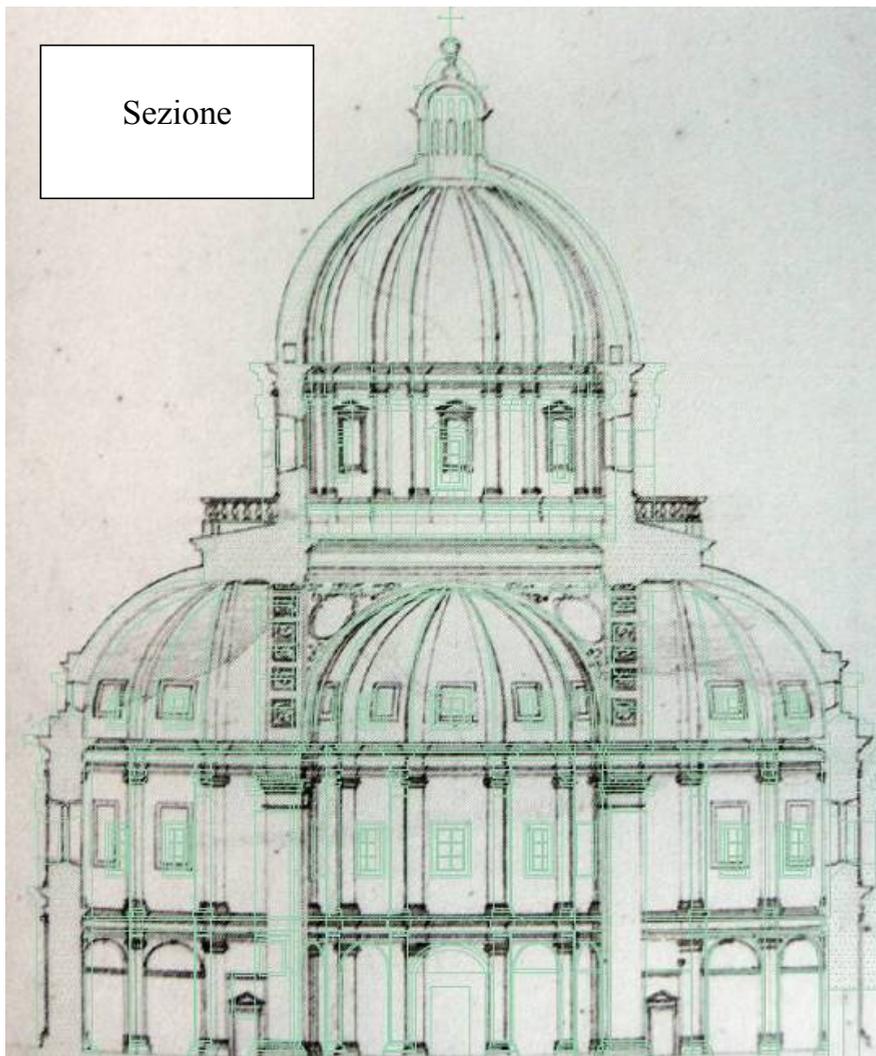


Figura 16 – Sovrapposizione tra il rilievo ottenuto da LIDAR (in verde) e quello settecentesco.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Leica Geosystem Italia e in particolare il suo ufficio di Firenze e l'Ing. Matteo Lapini, che hanno gentilmente fornito la strumentazione per i test.

Si ringrazia inoltre L'Ente Tuderte di Assistenza e Beneficenza "La Consolazione", nella persona del Dr. Bruno Severi, che ha cortesemente consentito l'accesso e le riprese del monumento.

Bibliografia

C. e M. Grondona, *Todi storica e artistica*, Ediart, Todi (PG), 2009

(a cura di) C. Grasseti, *Todi Bella*, Grasseti Editore, Todi (PG), 1993

F. Mancini, *Todi e i suoi castelli*, Grafoedit Editrice, Todi (PG), 1992

M. Pallotta, *Todi tra leggenda, storia e cronaca (dagli Etruschi ad oggi)*, Sograte, Città di Castello(PG), 1983

M. Pericoli, *Precisazioni sulla Consolazioni di Todi*, *Res Tudertinae*(18), Todi 1976.