

# **RILIEVO E RESTITUZIONE 3D DELL'ARCA SCALIGERA DI CANSIGNORIO (VERONA) MEDIANTE METODOLOGIE LASER SCANNING E FOTOGRAMMETRIA DIGITALE**

Gianna GAUDINI (\*), Vladimiro ACHILLI (\*\*), Denis BRAGAGNOLO (\*\*),  
Massimo FABRIS (\*\*\*\*\*), Andrea MENIN (\*\*), Francesco ONGARATO (\*\*),  
Giuseppe SALEMI (\*\*)

(\*) Soprintendenza per i beni architettonici e per il paesaggio, Piazza S. Fermo, 3/a – 37100 Verona  
(\*\*) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – DAUR – Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento  
Università di Padova, Via Marzolo, 9 – 35131 Padova, Tel: 049-8275579, e-mail: [massimo.fabris@unipd.it](mailto:massimo.fabris@unipd.it)  
(\*\*\*) Dipartimento di Fisica – Settore Geofisica  
Università di Bologna, Viale Berti Pichat, 8 – 40127 Bologna

## **Riassunto**

Nel presente lavoro vengono descritte ed analizzate la generazione di un modello 3D e di ortofoto ad alta risoluzione dell'Arca Scaligera di Cansignorio (Verona) mediante l'utilizzo delle metodologie *laser scanning* e fotogrammetria digitale terrestri. Dopo l'acquisizione, l'orientamento e la restituzione, alcune porzioni dei modelli ottenuti sono state confrontate per valutare il grado di corrispondenza e i limiti delle due metodologie.

## **Abstract**

In this work the operations which provided a 3D model and high resolution orthophotos of the Cansignorio tomb (Verona) by means of the terrestrial laser scanning and digital photogrammetry methodologies are described and analyzed. After the acquisition, orientation and restitution, some portion of the obtained models are been compared to estimate the correspondence level and the limits of the methodologies.

## **Introduzione**

Negli ultimi anni i sistemi laser a scansione terrestre hanno trovato applicazioni sempre maggiori nei settori ingegneristico, architettonico e dei beni culturali come strumento di conoscenza per la catalogazione, progettazione ed esecuzione di opere di restauro (Bitelli, 2002; Monti et al., 2003; Bornaz, Rinaudo, 2004). Accanto ad essi le metodologie fotogrammetriche digitali terrestri, tradizionalmente utilizzate nel rilievo architettonico e dei beni culturali, costituiscono uno strumento di verifica, integrazione e completezza dei rilievi effettuati mediante laser a scansione.

Lo scopo del lavoro consiste nel rilievo e restituzione 3D dell'Arca Scaligera di Cansignorio che, all'interno del Sepolcreto Scaligero contenente nove tombe del XII secolo, costituisce, nel cuore della città di Verona, uno dei complessi storico-artistici di maggiore importanza; allo scopo sono state utilizzate le metodologie topografiche classiche per la definizione della rete topografica di inquadramento, *laser scanning* terrestre per la generazione del modello 3D e fotogrammetria digitale terrestre per la produzione di ortofoto dei prospetti dell'Arca.

## **L'Arca Scaligera di Cansignorio**

L'Arca oggetto del rilievo si trova all'interno del Sepolcreto Scaligero in prossimità della Chiesa di Santa Maria Antica. Il cimitero Scaligero contiene nove tombe: di quelle maggiori si conosce con certezza a chi fossero destinate, mentre per quanto riguarda le altre, più precisamente per quelle a

terra, è più difficile un'attribuzione in tal senso, per la mancanza di incisioni ed epitaffi. Le tombe sono state costruite tra il XII e il XIV secolo; in particolare l'Arca di Cansignorio (figura 1a), progettata dall'architetto lombardo Bonino da Campione, fu completata nel 1376, un anno dopo la morte del signore Scaligero. Si tratta di un'opera riccamente decorata, situata nell'angolo nord-est del sepolcreto. Presenta una pianta a base esagonale con lati di circa 3 m e altezza complessiva di circa 25 m: sei colonne sostengono un'ampia lastra di ammonitico rosso nel centro della quale il sarcofago poggia su pilastri sostituiti ai quattro angoli da coppie di putti nudi. Lungo le facce dell'urna in marmo di Candoglia sono scolpite storie evangeliche (figura 1b). Il baldacchino ad archi polilobati è retto da sei colonne a spirale e nei timpani sovrastanti, in nicchie a forma di conchiglia, si trovano figure allegoriche. Da questo punto si innesta una doppia serie di pinnacoli: il primo giro è posto all'altezza del sarcofago e accoglie i santi che hanno fatto professione d'armi. I pilastri costituiscono i capisaldi di una cancellata in ferro battuto a griglia fissa. Il secondo giro di pinnacoli interseca le guglie dei timpani e accoglie angeli con grandi ali di ferro, che reggono tra le mani uno scudo scaligero. La piramide esagonale, formante il tetto del padiglione, culmina in un plinto massiccio e pesante, sulle cui facce sono scolpite le figure degli Apostoli. Esso serve da base alla rigida e tozza statua equestre, rappresentante il Cansignorio (figura 1c).



Figura 1 – a) L'Arca di Cansignorio; b) Particolare del sarcofago contenente la salma; c) Particolare della statua equestre posta a completamento del mausoleo

### Rilievo ed elaborazione delle scansioni laser

Il rilievo dell'Arca è stato effettuato dopo aver materializzato una rete topografica di riferimento intorno al monumento allo scopo di riferire i *target* retro-riflettenti delle scansioni *laser* ed i punti fotografici d'appoggio del rilievo fotogrammetrico in uno stesso sistema di riferimento locale; la rete è stata misurata mediante la stazione integrata *Leica TC2003*.

L'Arca è stata rilevata mediante il *laser scanner Leica HDS (ex Cyrax) 2500* che, per distanze da 1.5 a 50 m dall'oggetto, fornisce un'accuratezza di 6 mm sul singolo punto. Per il rilievo completo, anche a causa del limitato spazio disponibile, sono state effettuate numerose acquisizioni utilizzando piattaforme mobili e usufruendo delle finestre, su piani diversi, dei palazzi prospicienti (figura 2): le posizioni planimetriche sono state scelte in modo da limitare il più possibile le "zone d'ombra". Per questo motivo si è scelto di effettuare scansioni non solo a terra ma anche in quota: mediante piattaforme mobili sono state acquisite scansioni alle quote di 5.70 m, 8.20 m e 10.75 m oltre che dalle finestre dei palazzi; inoltre, a causa della complessità morfologica dell'oggetto, le acquisizioni sono state effettuate non solo all'esterno del monumento, ma anche all'interno, per rilevare le porzioni di nicchie, cornici e ogni altro elemento in sottosquadro.

Le scansioni sono state effettuate con griglia di acquisizione media pari a circa 0.5 cm e in nessun caso è stata superata la distanza di 50 m dall'Arca. Per molte scansioni è stato possibile predisporre opportuni *target* retro-riflettenti in modo da poter effettuare il successivo allineamento direttamente nel sistema di riferimento locale: in questi casi il *laser scanner* effettua una scansione di dettaglio in corrispondenza ad ogni *target* per la localizzazione del rispettivo baricentro; le coordinate dei *target* sono poi state rilevate con la stazione integrata nel sistema di riferimento locale. Per alcune scansioni non è stato possibile predisporre i *target*: la strategia adottata ha previsto di operare in modo da garantire una notevole percentuale di sovrapposizione tra scansioni adiacenti (anche il 60%) dovendo effettuare il successivo allineamento per nuvola di punti; complessivamente sono state effettuate 110 acquisizioni.

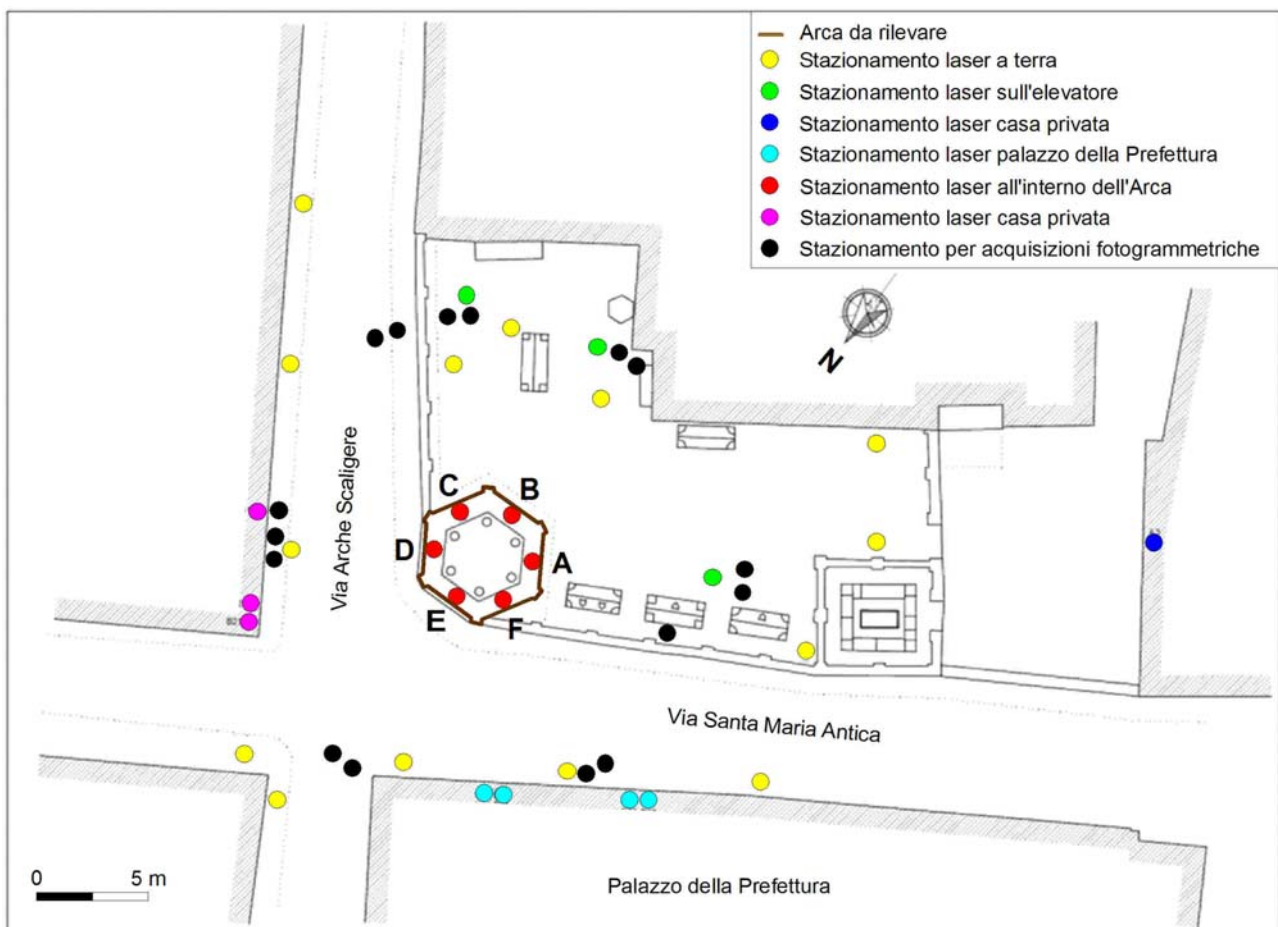


Figura 2 – Planimetria degli spazi disponibili attorno all'Arca e localizzazione delle acquisizioni laser scanning e fotogrammetriche

Come accennato, l'allineamento, mediante l'utilizzo del software *Cyclone* v. 5.4, è stato effettuato seguendo due differenti strategie: le scansioni sprovviste di *target* sono state allineate secondo lo schema *Cloud Registration* scegliendo 3 coppie di punti omologhi sulle due scansioni per avvicinarle e applicando il processo iterativo finalizzato alla determinazione più raffinata dei parametri della roto-traslazione; nel caso invece delle scansioni con *target*, l'allineamento è stato effettuato secondo la modalità *Survey Registration* che consiste nella roto-traslazione diretta di ogni singola scansione nel sistema di riferimento locale attraverso l'imposizione delle coordinate rispettive dei *target* della scansione (calcolate dalle misure effettuate con la stazione integrata). Allineando tutte le scansioni è stato possibile ottenere il modello 3D dell'Arca con errore di mosaicatura massimo di 4 mm. Il modello così ottenuto è stato gestito con il software *Reconstructor* per la generazione delle *mesh*, la gestione delle sezioni, l'estrazione dei profili principali e la

chiusura delle eventuali lacune. In particolare, in figura 3, vengono riportate le ortoproiezioni dei modelli a nuvola di punti sui piani dei prospetti A (figura 3a) e D (figura 3b) considerando anche il contributo dato dai prospetti F, B e C, E rispettivamente.

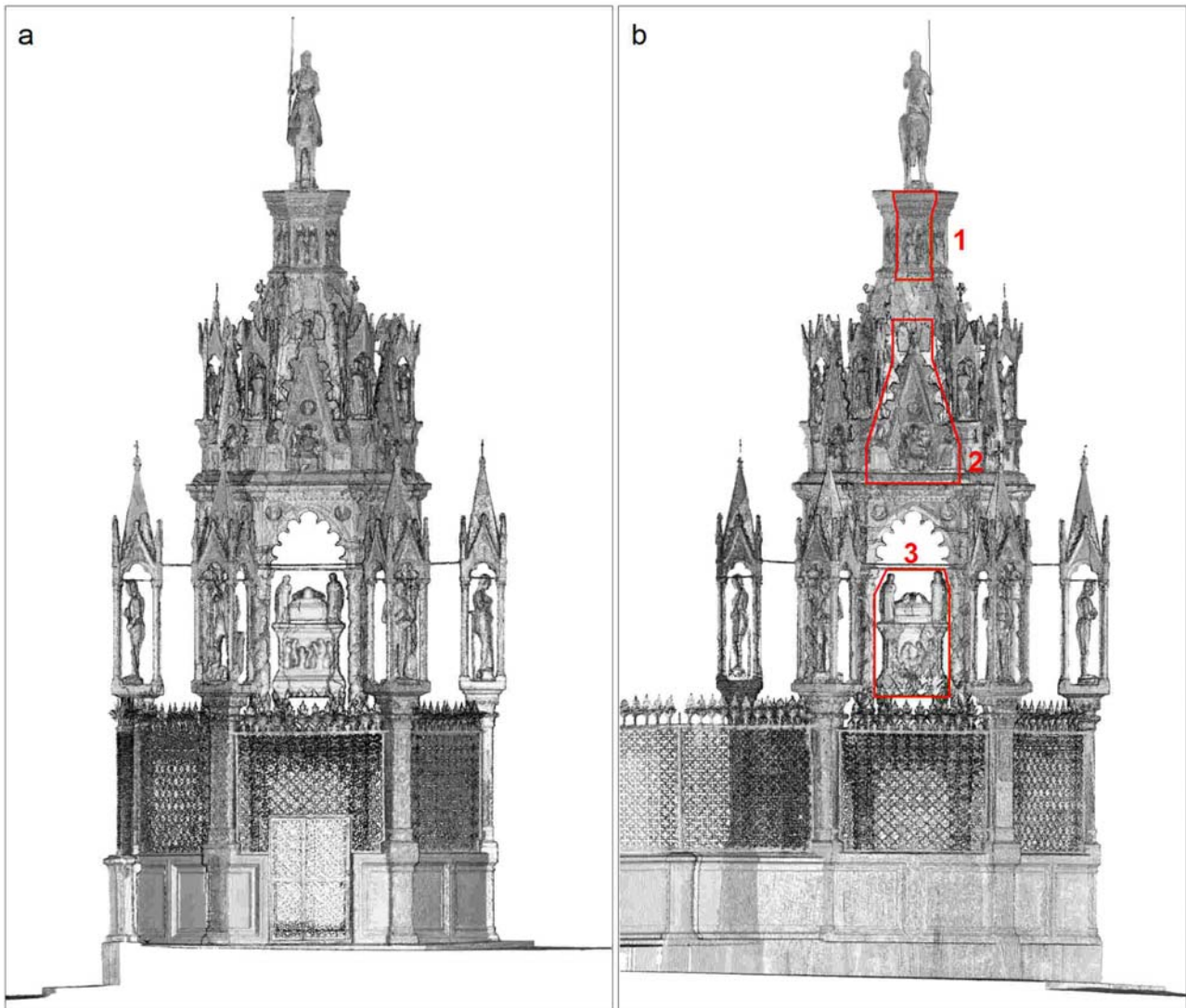


*Figura 3 – Ortoproiezioni del modello globale a nuvola di punti dell'Arca di Cansignorio relative ai prospetti A (a) e D (b)*

### **Rilievo e restituzione fotogrammetrica**

Il rilievo fotogrammetrico è stato effettuato per produrre ortofoto ad alta risoluzione dei sei prospetti dell'Arca. Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata la camera digitale metrica *EOS 1 – Ds Mark II* con risoluzione di 16.7 *Megapixel*. Il rilievo è stato progettato prevedendo di acquisire una coppia di immagini per ogni strisciata orizzontale con sovrapposizione di circa il 70% e spostandosi verticalmente con una piattaforma mobile per l'esecuzione delle differenti strisciate a quote diverse, garantendo una sovrapposizione di circa il 30% tra strisciate successive. Per rispettare le ipotesi di progetto è stato necessario acquisire le immagini ad una distanza dall'Arca pari a circa 9 m; solo nel caso del prospetto D, a causa del limitato spazio disponibile, la distanza camera-oggetto è stata ridotta a circa 7 m, superando il problema con l'esecuzione di strisciate costituite da tre immagini (figura 2).

Le acquisizioni sono state effettuate in condizioni di presa normale e, allo scopo, è stata utilizzata la barra calibrata *Cyclop*, estremamente utile per garantire la perpendicolarità tra gli assi e la base di

presa. Il rilievo dei prospetti C ed F è stato effettuato esternamente al Sepolcreto, generando la copertura delle porzioni interne per la presenza della cancellata in ferro battuto: in questo caso sono state effettuate ulteriori acquisizioni dall'interno delle parti non visibili dall'esterno (C\_I con strisciata orizzontale e F\_I con strisciata verticale).

Dopo le acquisizioni, sono stati scelti come punti fotografici d'appoggio punti naturali ben visibili sulle immagini e uniformemente distribuiti sui prospetti da restituire; questi punti sono stati misurati con la stazione integrata nel sistema di riferimento locale definito dalla rete di inquadramento.

In tabella 1 vengono riportate le caratteristiche principali del rilievo fotogrammetrico.

| Prospetto                    | A     | B     | C     | C_I   | D     | E     | F     | F_I   |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N. strisciate                | 5     | 7     | 4     | 2     | 8     | 7     | 7     | 1     |
| N. immagini                  | 10    | 14    | 8     | 4     | 24    | 14    | 14    | 2     |
| Focale (mm)                  | 53.23 | 53.23 | 53.23 | 53.23 | 53.23 | 53.23 | 53.23 | 53.23 |
| Dimensione <i>pixel</i> (mm) | 1.22  | 1.15  | 1.23  | 1.19  | 0.95  | 1.26  | 1.25  | 1.02  |
| N. punti appoggio            | 20    | 19    | 14    | 8     | 24    | 19    | 19    | 9     |
| N. <i>tie points</i>         | 275   | 372   | 224   | 123   | 448   | 387   | 383   | 59    |

*Tabella 1 – Caratteristiche principali del rilievo fotogrammetrico*

L'orientamento e la restituzione delle immagini fotogrammetriche sono stati effettuati con il software *Socet Set* v. 5.3. Dopo gli orientamenti interno ed esterno, l'estrazione automatica di DSM (*Digital Surface Model*) è stata realizzata in modalità *adaptive ATE* (*Automatic Terrain Extraction*) con griglia di passo 0.5 cm sull'area relativa a ciascun prospetto.

Allo scopo di verificare la possibilità di ridurre l'*editing* manuale, in corrispondenza ad alcune zone l'estrazione automatica di DSM è stata realizzata applicando un "leggero" *smoothing* sul grigliato interpolato (figura 4: aree relative ai riquadri 1 e 2 di figura 3).

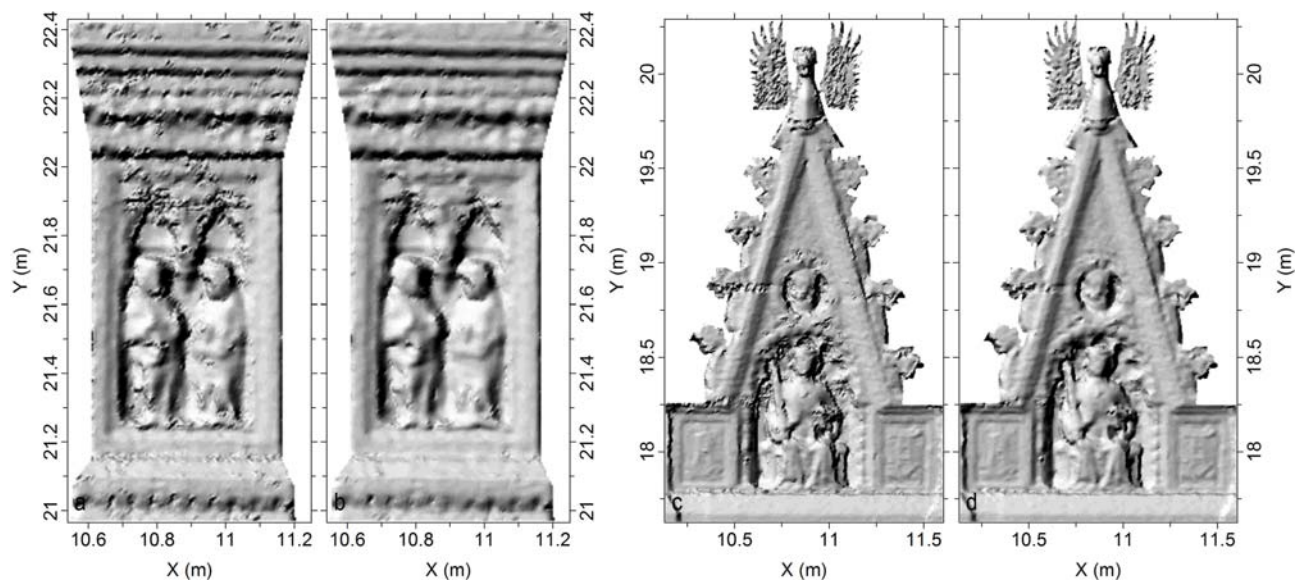


*Figura 4 – DSM estratti automaticamente (a, c) e applicando un "leggero" smoothing (b, d) per le porzioni relative ai riquadri 1 e 2 di figura 3*

Dall'analisi della figura 4, si nota come in alcune zone le problematiche dell'estrazione automatica siano state ridotte, senza tuttavia ottenere l'adattamento del DSM alla morfologia dell'oggetto; inoltre in corrispondenza alla merlatura nella parte inferiore delle figure 4a e 4b, l'applicazione dello *smoothing* ha peggiorato il risultato iniziale. Tutti i DSM estratti automaticamente sono stati quindi editati manualmente nelle aree dove la correlazione automatica non è stata soddisfacente e nelle zone di non corretto adattamento dei punti alla reale morfologia del monumento funebre. Con i modelli così ottenuti sono state prodotte le corrispondenti ortofoto: in figura 5 vengono riportate, come esempio, quelle relative ai prospetti E (a) ed F (b).

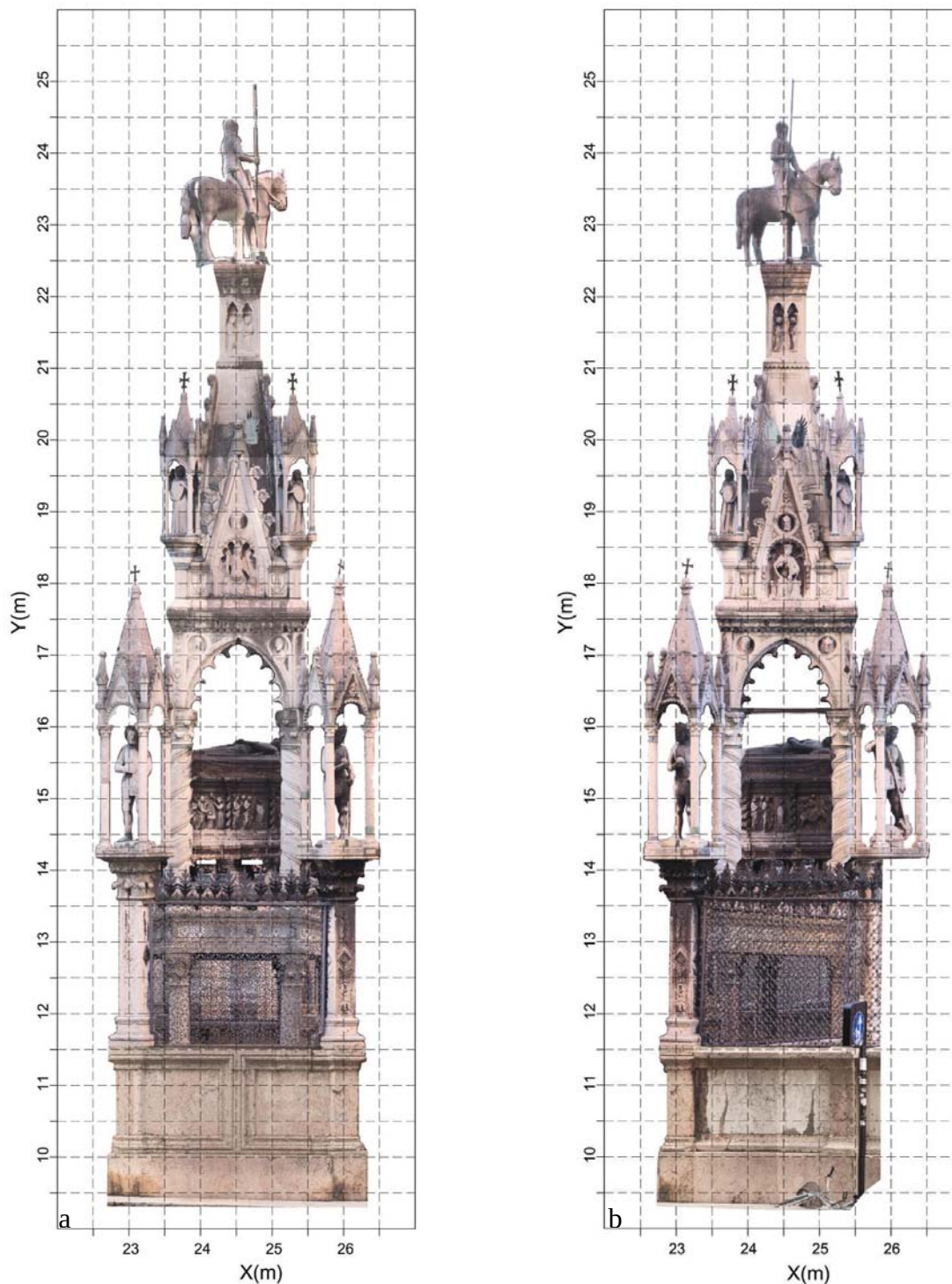


Figura 5 – Ortofoto relative ai prospetti E (a) ed F (b)

Le immagini utilizzate per il rilievo fotogrammetrico ed altre acquisite con la stessa camera digitale metrica *EOS 1 – Ds Mark II* dai punti di stazionamento del *laser scanner*, sono state utilizzate anche per la texturizzazione del modello tridimensionale ottenuto con il *laser scanning*: allo scopo è stato utilizzato il software *Z-Map* che permette di effettuare la proiezione di ogni singola immagine sulla porzione di DSM corrispondente. Relativamente ad una stessa area dell'Arca sono state utilizzate più immagini acquisite da differenti punti di presa per realizzare la copertura delle aree occluse. In questo modo, è stato possibile aggiungere informazioni fotorealistiche al modello tridimensionale ottenendo un prodotto fruibile in modo immediato ed interattivo.

### Confronto dei dataset ottenuti

Per ogni prospetto sono stati quindi prodotti due DSM derivanti dalle metodologie *laser scanning* e fotogrammetria digitale terrestri. I due modelli sono stati confrontati relativamente a tre particolari aree corrispondenti ai riquadri 1, 2 e 3 di figura 3b. Prima di effettuare il confronto diretto i dataset sono stati allineati per ridurre l'errore residuo di co-registrazione. Per ciascuna area vengono riportate le ortofoto (figure 6a, 7a, 8a), i DSM fotogrammetrici estratti automaticamente (griglia di passo 5 mm, figure 6b, 7b, 8b), i DSM ottenuti dal *laser scanning* (figure 6c, 7c, 8c) e le mappe che rappresentano la distribuzione planimetrica dei residui derivanti dal confronto (figure 6d, 7d, 8d).

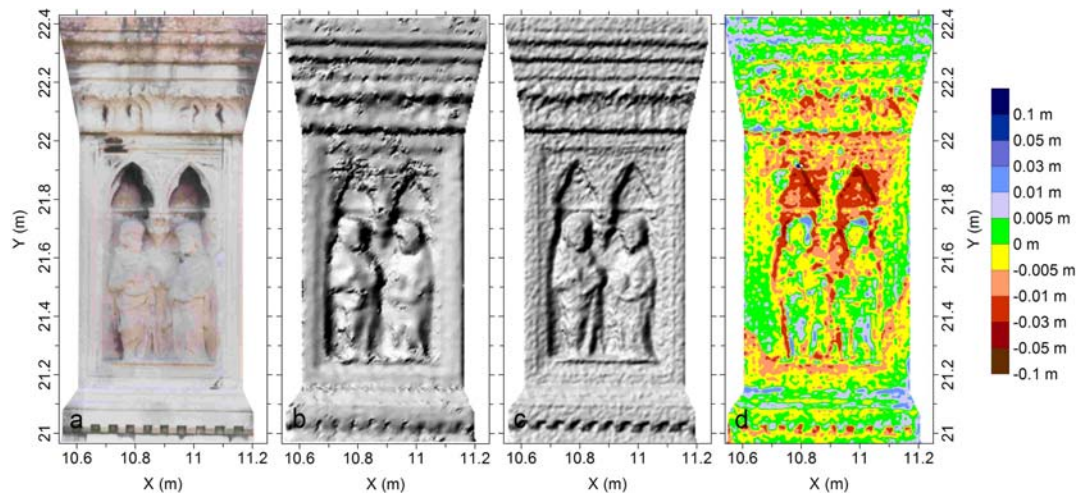


Figura 6 – Ortofoto (a), DSM fotogrammetrico automatico (b), DSM laser scanning (c) e mappa della distribuzione dei residui (d) derivante dal confronto dei dataset

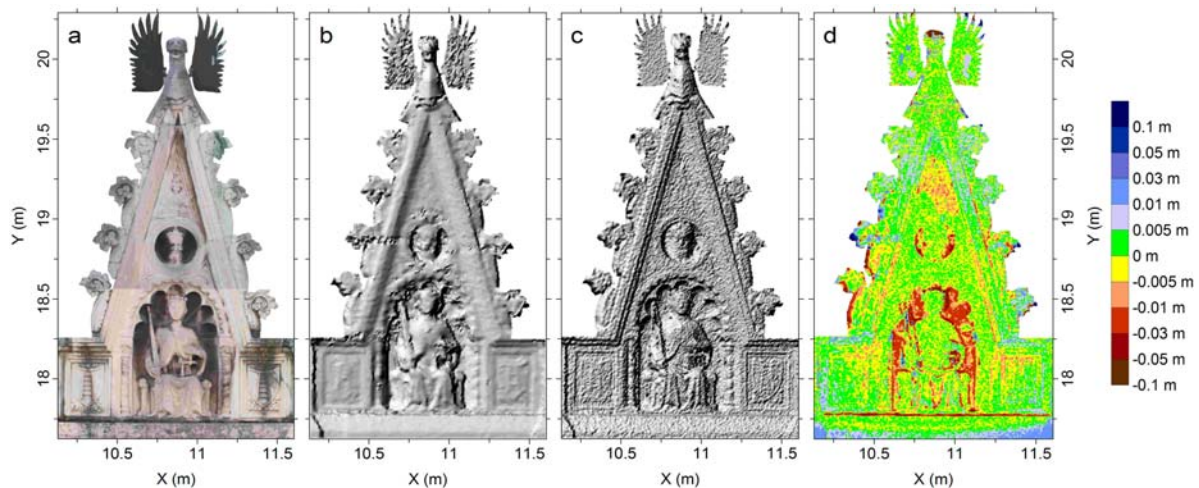


Figura 7 – Ortofoto (a), DSM fotogrammetrico automatico (b), DSM laser scanning (c) e mappa della distribuzione dei residui (d) derivante dal confronto dei dataset

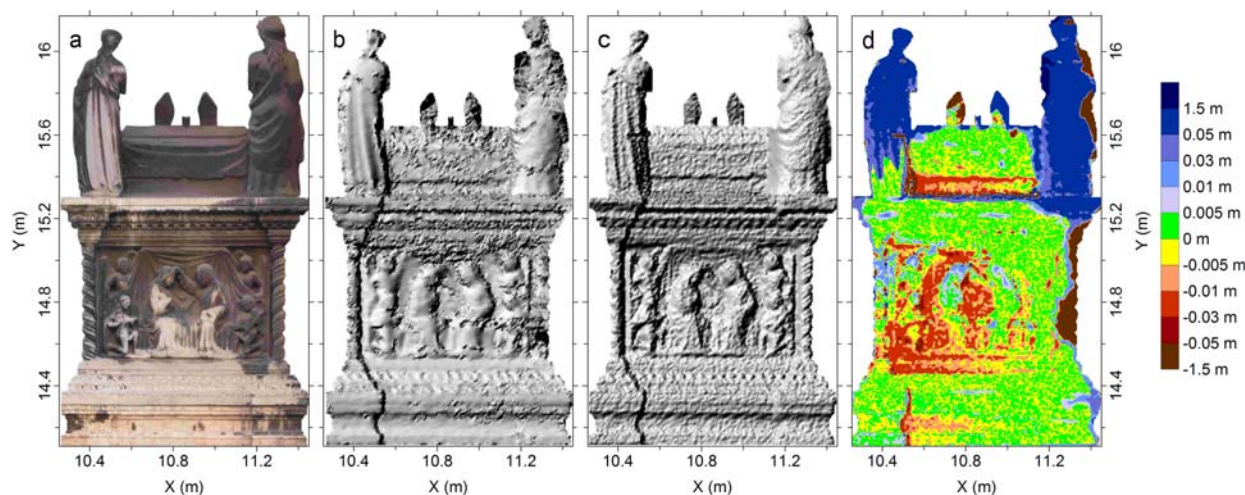


Figura 8 – Ortofoto (a), DSM fotogrammetrico automatico (b), DSM laser scanning (c) e mappa della distribuzione dei residui (d) derivante dal confronto dei dataset

### Discussione e conclusioni

Da un confronto tra i DSM fotogrammetrici e *laser scanning* (mediante le rappresentazioni in *shaded relief* delle figure 6b, 6c; 7b, 7c; 8b, 8c), ottenuti con lo stesso passo di griglia, si nota un dettaglio maggiore nel caso dei modelli *laser*; questo dettaglio, tuttavia, viene accompagnato anche da un “rumore” maggiore, probabilmente dovuto sia ai dati ottenuti dalle scansioni che all’algoritmo di interpolazione utilizzato per la generazione del DSM (Fabris et al., 2005) (in questo caso è stato adottato il metodo di *kriging* (Cressie, 1990) per tutti i *dataset*).

Il confronto dei modelli ottenuti dalle due metodologie fornisce mappe dei residui (figure 6d, 7d e 8d) nelle quali risulta evidente la minore capacità dell’algoritmo di correlazione delle immagini fotogrammetriche di descrivere nicchie (superfici concave e convesse) e merlature delle porzioni analizzate. Nel terzo caso considerato (figura 8d), inoltre, sono state evidenziate grandi differenze tra i due DSM soprattutto in corrispondenza alle due statue sopra il sarcofago, a causa della mancata correlazione automatica tra le immagini fotogrammetriche digitali. E’ da tenere presente però che, mentre nel caso del *laser scanning* è stato possibile effettuare acquisizioni da differenti posizioni (ottenendo una descrizione più dettagliata e completa dell’oggetto), nel caso della fotogrammetria le prese sono state effettuate solo per produrre le ortofoto dei sei prospetti e non per l’analisi di elementi particolari.

L’integrazione delle due metodologie si è dimostrata pertanto estremamente utile sia per analisi dettagliate che globali per la descrizione metrica completa dell’Arca di Cansignorio indispensabile alla successiva fase di restauro conservativo.

### Bibliografia

- Bitelli G. (2002), “Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali”, *Atti della 6<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*, 1: IX-XXIV
- Bornaz L., Rinaudo F. (2004), “Terrestrial Laser Scanner Data processing”, in O. Altan (ed.), *Proceedings of XX ISPRS Congress, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey*, IAPRS vol. XXXV, part B5: 514-519
- Cressie N.A.C. (1990), “The origins of Kriging”, *Mathematical Geology*, 22: 239-252
- Fabris M., Achilli V., Bragagnolo D., Menin A., Salemi G. (2005), “Interpolazione di nuvole di punti ad alta risoluzione da rilievi laser scanner: applicazione a beni culturali ed architettonici”, *Atti della 9<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*, 2: 1037-1044
- Monti C., Fregonese L., Achille C. (2003), “Laser scanner application on complex shapes of architecture. Profiles extraction processing and 3D modelling”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV-5/W10