

# LE TECNOLOGIE DIGITALI PER LA CONOSCENZA, LA TUTELA E LA VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE

## DIGITAL TECHNOLOGIES FOR THE KNOWLEDGE, THE PROTECTION AND THE VALORIZATION OF CULTURAL HERITAGE

R. Rivola<sup>a</sup>

<sup>a</sup> GEIS SRL – Geomatics Engineering Innovative Solutions, via Vivarelli 2, 41125 Modena, Italia -  
riccardo@geomaticsengineering.it

**PAROLE CHIAVE:** Laser scanning, Beni Culturali, Conoscenza, Tutela, Valorizzazione, Analisi geometriche, *Tour* virtuale, Stampa 3D

**KEY WORDS:** Laser scanning, Cultural Heritage, Knowledge, Protection, Valorization, Geometrical analysis, Virtual *tour*, 3D printing

### RIASSUNTO

Le moderne tecnologie digitali di rilievo, restituzione e visualizzazione 3D offrono enormi possibilità per la documentazione, la conservazione e la fruizione del patrimonio culturale. L'esperienza presentata ha avuto come obiettivo quello di mostrare i molteplici utilizzi di un rilievo laser scanning per applicazioni legate ai Beni Culturali, sperimentando le potenzialità d'interazione tra le tecniche geomatiche e quelle informatiche per il recupero e la riqualificazione di spazi urbani (edifici, monumenti, territori) di particolare interesse storico-artistico scarsamente qualificati e valorizzati. L'articolo illustra alcuni possibili impieghi delle nuvole di punti derivanti da un rilievo laser scanning per le attività di conoscenza, tutela e valorizzazione di un monumento storico-architettonico di Reggio Emilia (RE). Dal lato tecnico il modello tridimensionale a nuvola di punti è stato utilizzato a scopo documentativo e conservativo per effettuare approfondite analisi geometriche sulla struttura; come strumento di comunicazione, il rilievo 3D è invece stato utilizzato come base per la creazione di un *tour* virtuale interattivo e, per finalità divulgative e didattiche, per la riproduzione materica di un elemento caratteristico del sito mediante stampa 3D.

### ABSTRACT

The modern digital technologies for surveying, modeling and 3D visualizing offer enormous possibilities for the documentation, the preservation and the use of Cultural Heritage. This experience aims to show the multiple uses of a laser scanning survey for applications related to cultural heritage. The main focus is the experimentation of integrating geomatics and information technologies for the recovery and redevelopment of urban spaces (buildings, monuments, territories) characterized by great historical and artistic assets but barely promoted and enhanced. The paper discusses several possible uses of the point clouds resulting from a laser scanning survey for the activities of knowledge, protection and enhancement of an historical-architectural monument of Reggio Emilia (RE). On the technical side, the three-dimensional point cloud model is used for documentation and conservation purposes to perform detailed analyses on the geometric structure. As a communication tool, the 3D model obtained by the survey is used for creating an interactive virtual *tour* of the monument whereas for educational and didactic purposes it is exploited for the rapid prototyping with a 3D printer of a characteristic element of the site.

### 1. INTRODUZIONE

L'ambito dei Beni Culturali e quello della tecnologia sono sempre più tenacemente legati: le nuove tecnologie afferenti alla geomatica e all'informatica offrono oggi notevoli potenzialità applicative per la documentazione dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda le fasi di acquisizione dei dati sia per quelle di rappresentazione, diffusione e comunicazione multimediale (Böhler et al., 2001). La documentazione del patrimonio culturale mediante archiviazione digitale è divenuto nel recente passato un obiettivo globale e al tempo stesso una sfida per garantirne la trasmissione alle generazioni future (National Library of Australia, 2003). Documentare significa, infatti, anche conoscere per conservare e valorizzare, rendendo i Beni Culturali maggiormente fruibili per la popolazione e creando un sistema di coscienze che ne impedisca irrimediabili ed inestimabili perdite.

La geomatica, in quanto disciplina di rilevamento e trattamento informatico dei dati geometrici, offre immense potenzialità per le attività di documentazione del patrimonio esistente. Finora i modelli tridimensionali per le applicazioni nel settore dei Beni Culturali hanno avuto l'obiettivo principale di fornire ai tecnici e agli operatori del settore nuovi mezzi di studio e conoscenza, limitando però la possibilità di accesso da parte dei "non addetti ai lavori".

Le recenti tecnologie per l'acquisizione digitale hanno aperto prospettive innovative nel campo della conservazione, della riproduzione, dello studio e della fruizione di opere scultoree, architettoniche ed archeologiche. In linea con i principi di riferimento e le misure previste dall'UNESCO, il miglioramento della fruibilità dei siti richiede, infatti, la programmazione di interventi sul patrimonio monumentale in grado di agire contestualmente sia sul piano della tutela e della conservazione sia su quello della comunicazione e valorizzazione.

## 1.1 Tecnologie geomatiche per i Beni Culturali

Le attuali tecnologie geomatiche offrono potenzialità applicative per la documentazione dei Beni Culturali che possono essere efficacemente integrate per finalità di conservazione, riproduzione, studio e fruizione di opere scultoree, architettoniche ed archeologiche (Fig. 1).



Figura 1. La geomatica per i Beni Culturali.

La precisa ed accurata conoscenza di un edificio di pregio storico costituisce un presupposto fondamentale al fine di ottenere un'attendibile valutazione del suo comportamento strutturale. Come prescritto dalle "Linee guida per la Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" il percorso di conoscenza del manufatto deve essere sviluppato con la finalità di approfondire differenti aspetti (identificazione della costruzione; rilievo geometrico; analisi storica degli eventi e degli interventi subiti; rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione; caratterizzazione meccanica dei materiali) al fine di ottenere un livello di conoscenza adeguato per l'applicazione di modelli di vulnerabilità (Direttiva 9 febbraio 2011).

La tecnologia a scansione laser terrestre applicata allo studio degli edifici storico monumentali è ormai divenuta una metodologia affermata per la determinazione della geometria delle strutture, poiché garantisce un'analisi complessiva ed accurata anche di architetture complesse (Guarnieri et al., 2004; Neubauer et al., 2005; Bertacchini et al., 2010), consentendo la percezione e l'analisi di particolari geometrici difficilmente rilevabili con le tecniche tradizionali. Il rilievo tridimensionale che ne deriva è un database di informazioni fondamentali sia per la documentazione e la valutazione delle caratteristiche costruttive, strutturali, materiche e di conservazione (fase della conoscenza) sia per la progettazione di eventuali interventi di restauro, recupero o ripristino (fase della tutela).

Nell'ambito strutturale, le scansioni laser risultano particolarmente efficaci anche ad uso diagnostico per estrarre direttamente dalla nuvola di punti parametri ed informazioni metriche necessarie alla valutazione della stabilità o dell'assetto geometrico. In bibliografia è possibile reperire esempi di esperienze di utilizzo dei dati laser scanning per la conoscenza geometrica di edifici, soprattutto di quelli facenti parte del patrimonio storico e religioso, da cui formulare ipotesi o analisi strutturali (Capra et al., 2011; Capra et al., 2015; Castagnetti et al., 2012; Castagnetti et al., 2016), sulla vulnerabilità statica e dinamica (sismica) (Gordon et al., 2004). Tuttavia, è bene sottolineare che tali potenzialità perdono il proprio valore se non vengono affiancate da un rigoroso approccio metrico, per il quale il concetto di accuratezza è determinante e deve essere commisurato alle finalità del rilievo in ciascuna sua fase.

Le tecnologie geomatiche, ed in particolare laser scanner e fotogrammetria, possono essere efficacemente sfruttate anche ad altri fini, non esclusivamente tecnici, grazie all'interazione

con le tecniche informatiche di visualizzazione e divulgazione *online* (Guarnieri et al., 2010; Meyer et al., 2002). Ad oggi, la tecnologia informatica viene usata in maniera molto diffusa per arricchire la comunicazione delle informazioni all'interno di esposizioni, musei e siti culturali in genere. Per contro, a tali utilizzi non sempre è accompagnata una piena consapevolezza del valore e delle potenzialità dei prodotti tridimensionali come strumenti di comunicazione dello studio e della ricerca, rivolta tanto al pubblico degli "addetti ai lavori" quanto ad un'utenza più vasta (Orlandi et al., 2014).

L'acquisizione e l'elaborazione di dati metrici raccolti mediante tecniche a scansione e/o fotogrammetriche apre la strada a due interessanti e contrapposti utilizzi: le ricostruzioni virtuali e le riproduzioni materiche. Infatti, se da una parte la ricostruzione virtuale rappresenta un'interessante frontiera sul piano della ricerca in ambito conservativo, permettendo lo studio del degrado, delle lacune e della loro integrazione virtuale, dall'altro la riproduzione materica delle opere a partire dai loro file 3D si sta sempre più affermando tra le metodologie in grado di rispondere a necessità legate all'accessibilità e alla fruibilità. L'ampia varietà di tecnologie e materiali di prototipazione rapida, associata alla necessaria esperienza di impiego, può rivelarsi molto utile per rispondere a esigenze altrimenti difficilmente affrontabili, tra cui il restauro integrativo, gli allestimenti tattili alternativi per disabili e bambini o il merchandising museale (Arbace et al., 2013; Scopigno et al., 2014; Bigliardi et al., 2015).

## 1.2 Obiettivo del lavoro

L'esperienza condotta ha avuto come obiettivo quello di sperimentare le potenzialità delle tecniche geomatiche per il recupero e la riqualificazione di spazi urbani di particolare interesse storico-artistico scarsamente qualificati e valorizzati e mostrare i molteplici utilizzi di un rilievo laser scanning, nel rispetto di un uso efficiente e produttivo delle risorse economiche disponibili. L'attività, autorizzata dai Musei Civici di Reggio Emilia ([www.musei.re.it](http://www.musei.re.it)) in collaborazione con Reggio Emilia Innovazione ([www.reinnova.it](http://www.reinnova.it)), è stata proposta nel tentativo di dare impulso ad un approccio tecnologicamente innovativo ma ancora poco diffuso per conoscere, tutelare e soprattutto valorizzare l'enorme patrimonio culturale italiano, di cui siamo eredi e custodi.

L'articolo illustra per fasi successive gli utilizzi di un rilievo laser scanning di tipo architettonico su un edificio di pregio storico-artistico per incentivarne le attività e le iniziative di documentazione, conservazione e fruizione.

L'attività cardine del progetto è indubbiamente quella del rilievo geometrico e fotografico mediante laser scanner. L'elaborazione dei dati di scansione ha permesso di creare il modello tridimensionale dell'edificio, inizialmente a nuvola di punti, da cui è stato possibile estrarre importanti caratteristiche ed informazioni geometriche di interesse diagnostico e conservativo.

Dall'interrogazione del modello 3D a nuvola di punti sono state esportate sezioni verticali e orizzontali, sulla base delle quali è stata effettuata un'attività di modellazione superficiale NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines free-form*). Il modello geometrico così ottenuto è poi stato arricchito con informazioni documentative e storico-artistiche di diverso tipo per la creazione di un *tour* virtuale interattivo per la fruizione immersiva da remoto del sito.

Infine, un'ulteriore e differente fase di elaborazione e modellazione a *mesh* delle nuvole di punti ha permesso di ottenere il file 3D di un elemento caratterizzante del sito, che è stato successivamente riprodotto matericamente mediante tecnologia di stampa 3D per finalità divulgative e didattiche.

### 1.3 Caso studio: Il Mauriziano di Reggio Emilia (RE)

Il Mauriziano, villa quattrocentesca in cui spesso visse negli anni giovanili Ludovico Ariosto (1474-1533), è il principale monumento architettonico del Parco del Rodano ed è considerato il luogo dell'identità storica dell'intera città di Reggio Emilia (Fig. 2). Il Palazzo del Mauriziano si trova a circa tre chilometri dalla città, lungo la via Emilia verso Modena, inserito in un sistema di aree verdi che comprende il parco della villa e le zone agricole adiacenti.



Figura 2. Il Palazzo del Mauriziano di Reggio Emilia (RE).

Nonostante le significative ristrutturazioni del Sei-Settecento, il Palazzo mantiene l'impianto volumetrico cinquecentesco, tipico della villa rinascimentale emiliana, caratterizzato dalla pianta a base quadrangolare con un salone centrale passante sul quale si fonda l'asse di simmetria dell'edificio attorno a cui si articolano i vani laterali. Particolarmente interessante è l'ala est dell'edificio, in cui si conservano ancora tre ambienti con volte a vela e capitelli pensili (secondo moduli stilistici di matrice ferrarese riferibili al XV e XVI secolo), tradizionalmente definite "stanze ariostesche". I tre Camerini ("dei Poeti", "degli Orazi e Curiazi" e "dell'Ariosto"), seppur di piccole dimensioni, rispondono alle più raffinate concezioni dell'architettura civile del Rinascimento e ospitano pregevoli affreschi cinquecenteschi attribuiti a Nicolò dell'Abate raffiguranti scene di caccia, paesaggi, scene amorose, episodi di storia e figure di letterati, in piena sintonia con il gusto cortese e letterario dell'epoca (Fig. 3). Gli affreschi del salone centrale e della sala grande di sinistra sono invece riferiti alle ristrutturazioni effettuate da Prospero Malaguzzi dopo il 1742 e rappresentano con tono celebrativo le vicende salienti della sua vita e di quella dei suoi più illustri congiunti. Esternamente, sull'ingresso principale è posto un busto dell'Ariosto del 1880 opera dello scultore reggiano Ilario Bedotti.



Figura 3. Fotografia di dettaglio degli affreschi di uno dei Camerini dell'ala est della villa.

Il Palazzo rimase di proprietà della famiglia Malaguzzi fino al 1863, quando fu acquistato dal Municipio di Reggio Emilia ([www.municipio.re.it](http://www.municipio.re.it)). Nonostante sia stato recentemente sede di mostre ed iniziative culturali, ospitando al primo piano anche laboratori didattici gestiti dai Musei Civici di Reggio Emilia, la villa è attualmente in fase di recupero e riqualificazione.

## 2. IL RILIEVO GEOMETRICO CON LASER SCANNER

Il rilievo geometrico del Palazzo del Mauriziano è stato effettuato con il laser scanner a differenza di fase Zöller+Fröhlich Imager 5010C ([www.zf-laser.com](http://www.zf-laser.com)) (Fig. 4), ideale per applicazioni di rilievo architettonico di dettaglio. Tra le caratteristiche di spicco di questo strumento vi è sicuramente la fotocamera integrata con tecnologia HDR (*High Dynamic Range*), che permette di abbinare ai dati di scansione ad alta risoluzione e accuratezza un'immagine panoramica a 360° a 80 Mpixel con colori brillanti e un'illuminazione omogenea in tutte le parti della scansione. Lo strumento è inoltre dotato di compensatore biassiale di verticalità, con accuratezza di 0.007°, che permette una lettura precisa degli eventuali fuori piombo presenti sull'oggetto del rilievo.



Figura 4. Laser scanner distanziometrico a differenza di fase Z+F Imager 5010C.

Il rilievo laser scanner è stato eseguito nel mese di marzo 2015 ed ha riguardato i quattro prospetti esterni e le stanze della prestigiosa ala est della villa quattrocentesca.

A causa della fitta vegetazione in prossimità della villa, il rilievo degli esterni ha richiesto 7 stazionamenti con distanze medie di presa abbastanza ridotte, indicativamente tra 7 e 12 metri. Inoltre, dalle tre posizioni di scansione antistanti al prospetto frontale, sono state fatte delle acquisizioni di maggiore dettaglio e qualità del busto di Ariosto, scultura posta all'interno di una nicchia nella parte sommitale. Internamente, il rilievo laser scanning è stato focalizzato in particolare sui tre Camerini affrescati, caratterizzati dalle volte a vela e dai capitelli pensili. Sono inoltre state eseguite acquisizioni del salone centrale di ingresso e della sala grande di sinistra, oltre che dei tre ambienti seminterrati sottostanti ai tre Camerini. In ogni ambiente interno rilevato, ad esclusione dei seminterrati, sono stati effettuati due stazionamenti, in modo da ridurre al massimo le occlusioni prospettiche degli arredi.

Sia internamente sia esternamente, la scelta della risoluzione spaziale delle acquisizioni è stata ponderata valutando la finalità di rappresentazione bidimensionale classica in scala 1:100 del complesso architettonico e il rischio di ottenere un'eccessiva ridondanza di punti acquisiti sul modello complessivo, determinando un eccessivo onere computazionale in fase di elaborazione. A questo scopo, sono state testate varie combinazioni dei parametri di risoluzione e qualità di scansione,

al fine di valutare il rapporto tempo-qualità sia in fase di rilievo sia in fase di elaborazione. Contestualmente al rilievo geometrico, da ogni posizione di scansione sono state eseguite

anche le acquisizioni fotografiche HDR a 360° (Fig. 5) mediante la fotocamera integrata dello strumento, per fornire alle nuvole di punti la resa fotorealistica.



Figura 5. Camerino dell'Ariosto: immagine equirettangolare HDR acquisita con la camera integrata del laser scanner Z+F Imager 5010C.

### 3. ANALISI GEOMETRICHE PER LA CONOSCENZA E LA TUTELA

L'attività di documentazione geometrica del Palazzo del Mauriziano di Reggio Emilia mediante scansioni laser è stata efficacemente applicata allo studio dello "stato di fatto" dell'edificio per l'estrazione di importanti informazioni sull'assetto geometrico, finalizzate a valutazioni sulle caratteristiche costruttive, strutturali e di conservazione.

#### 3.1 Elaborazione delle nuvole di punti

L'elaborazione del rilievo laser scanning è stata effettuata primariamente con il software *JRC 3D Reconstructor* di Gexel, in grado di importare e gestire correttamente le nuvole di punti direttamente nel formato proprietario di Z+F (.zfs). La fase di allineamento delle nuvole di punti è stata gestita interamente con metodo indiretto (punti omologhi), grazie anche al consistente utilizzo dell'algoritmo automatico ICP (*Iterative Closest Point*) del software di elaborazione (Rivola et al., 2011). Questa scelta è motivata dalla volontà di testare uno strumento di ottime prestazioni (errore lineare <1 mm), operando su un caso studio di ridotte dimensioni con una metodologia di rilievo ed elaborazione più automatizzata possibile. I controlli effettuati a posteriori su alcuni elementi caratteristici del modello tridimensionale complessivo (principalmente aperture di porte e finestre) hanno pienamente soddisfatto la qualità dei risultati attesi, mostrando disallineamenti di 2-3 mm al massimo. L'entità dei valori di disallineamento tra le nuvole di punti è, infatti, corrispondente a quella degli errori quadratici medi (RMSE) degli allineamenti eseguiti con ICP sulle singole nuvole di punti. Si ritiene quindi che la qualità del risultato ottenuto (Fig. 6) sia pienamente idonea agli scopi del lavoro.

#### 3.2 Estrazione delle informazioni geometriche dal modello 3D

Relativamente al caso di studio del Palazzo del Mauriziano di Reggio Emilia il modello tridimensionale a nuvola di punti ottenuto dal rilievo laser scanning è stato utilizzato per la

vettorializzazione dei prodotti classici di rappresentazione bidimensionale (planimetrie, prospetti e sezioni verticali) in scala 1:100 (Fig. 7) della villa principale e per l'estrazione di informazioni sull'assetto geometrico delle facciate esterne e sullo spessore dei solai e delle murature.



Figura 6. Vista esterna del modello tridimensionale a nuvola di punti del Mauriziano.

Per approfondire la conoscenza geometrica dell'edificio è stato deciso di indagare aspetti dello stato di conservazione delle murature che potessero essere significativi per la valutazione del suo comportamento strutturale.

L'estrazione delle informazioni sull'assetto geometrico dei prospetti esterni è stata eseguita calcolando per ogni facciata la distanza relativa tra la nuvola di punti acquisita e un piano verticale di riferimento. L'algoritmo di *inspection* (verifica) implementato nel software *JRC 3D Reconstructor* permette di ottenere in modo automatico "mappe cromatiche" in grado di evidenziare fenomeni di fuori piombo e/o spanciamiento della parete. I punti laser scanning acquisiti sulla parete vengono colorati in base alla distanza misurata dal piano di riferimento: il colore verde evidenzia i punti che appartengono al piano verticale utilizzato come riferimento, i colori blu e rosso evidenziano invece i punti che si discostano da esso, rispettivamente verso l'interno e verso l'esterno dell'edificio, esaltando cromaticamente eventuali anomalie geometriche rispetto alla condizione di planarità e verticalità ipotizzata.

Ai fini della comprensione delle potenzialità delle metodologie di indagine diagnostica mediante laser scanner, risulta particolarmente interessante la “mappa cromatica” dell’analisi delle anomalie geometriche del prospetto principale della villa (Fig. 8). La colorazione evidenzia chiaramente dei fenomeni di spianciamento simmetrici rispetto all’asse verticale della facciata con valori massimi di scostamento dal piano di riferimento dell’ordine di  $\pm 7-8$  cm. È infatti possibile notare due cunei in aggetto sulle porzioni terminali del prospetto, oltre ad un

comportamento analogo nelle porzioni laterali alla porta di ingresso, presumibilmente riconducibili ad aperture pregresse tamponate.

Ulteriori analisi hanno riguardato lo spessore delle murature perimetrali e lo spessore del solaio tra i Camerini affrescati e l’interrato. Questo tipo di indagine è spesso in grado di evidenziare modifiche strutturali intercorse durante gli anni di vita dell’edificio.

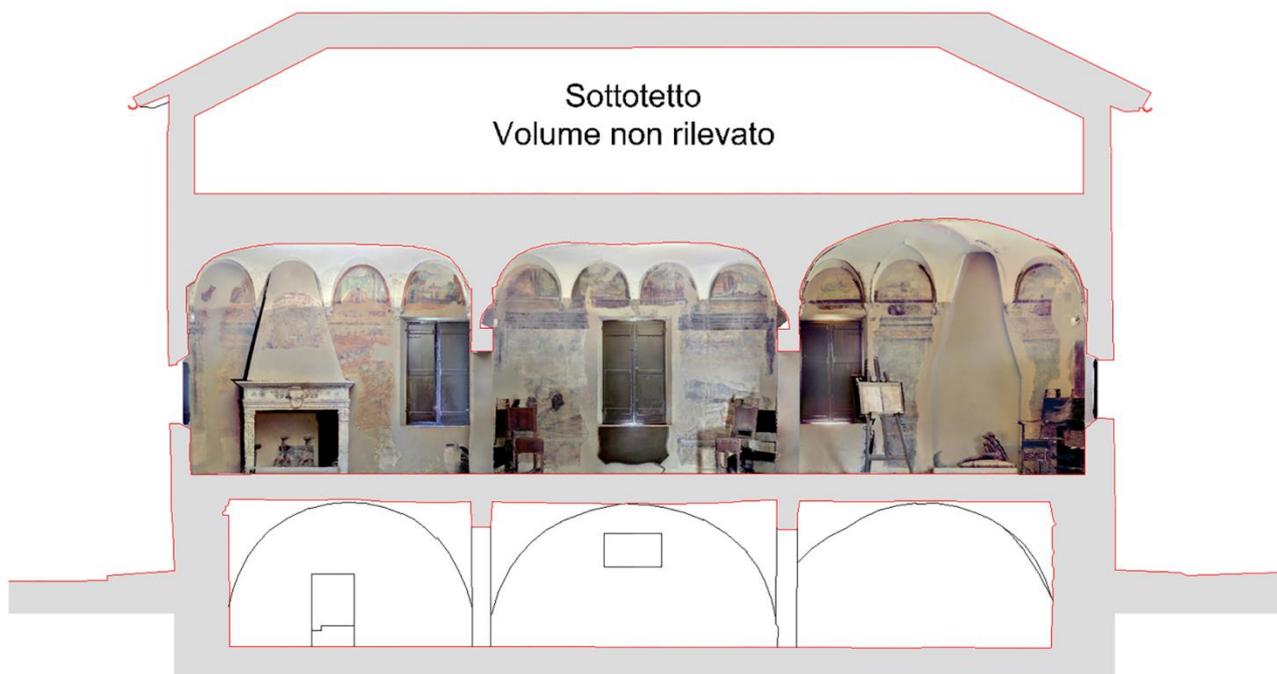


Figura 7. Vettorializzazione di una sezione verticale del Mauriziano, passante per i tre Camerini affrescati.



Figura 8. Mappa cromatica delle anomalie geometriche presenti sul prospetto principale del Mauriziano.

#### 4. TOUR VIRTUALE PER LA VALORIZZAZIONE

Uno degli scopi del progetto sul Mauriziano di Reggio Emilia era proprio quello di mettere in luce le potenzialità informative di prodotti derivati dal rilevamento metrico, a dimostrazione dell’utilizzo della tecnologia laser scanning come strumento di informazione, comunicazione e veicolazione del turismo culturale, oltre che tecnico.

##### 4.1 Modellazione NURBS *free-form*

Le recenti e sempre più ampie possibilità di interazione tra le tecniche geomatiche ed informatiche hanno reso possibile l’utilizzo dei prodotti del rilevamento tridimensionale anche per finalità turistiche, divulgative e didattiche (fase della

valorizzazione). Tuttavia, affinché i modelli tridimensionali siano realmente fruibili dall’utente, ad esempio via web da casa propria, è necessario operare un accurato lavoro di elaborazione e modellazione dei dati acquisiti.

Primariamente, le nuvole di punti sono state processate attraverso il *software JRC 3D Reconstructor* con opportune funzioni di pulitura, filtraggio e ricampionamento. Dal modello ottenuto sono poi state estratte delle sezioni orizzontali e verticali, con passo variabile in funzione delle geometrie murarie e dei particolari elementi architettonici presenti, per procedere alla modellazione geometrica delle superfici.

Questa attività è stata effettuata con il *software Rhinoceros* utilizzando, ad eccezione delle volte dei tre Camerini affrescati, un algoritmo di *lofting* tra le polilinee di sezione estratte. La modellazione accurata della particolare tipologia di volta (a

padiglione ribassata lunettata) dei tre Camerini ha richiesto la creazione di uno specifico algoritmo parametrico in *Grasshopper*, editor grafico di algoritmi strettamente integrato con gli strumenti di modellazione di *Rhinceros*. Lo stesso algoritmo è stato applicato alle volte dei tre stanzini variandone i parametri dimensionali e deformativi al fine di ottenere per ogni ambiente un modello 3D più fedele possibile al dato misurato (Fig. 9).

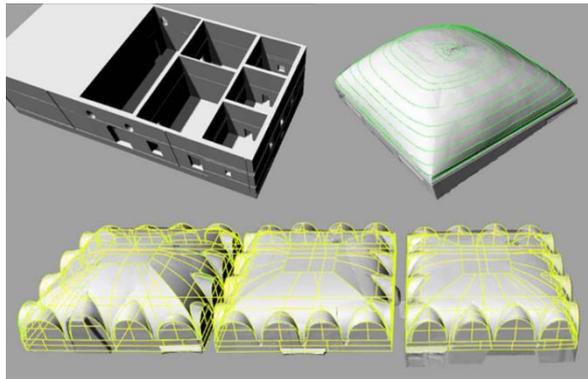


Figura 9. Modellazione NURBS *free-form* delle volte con *Rhinoceros*.

Le polisuperfici dei singoli ambienti interni sono poi state unite per ottenerne i solidi chiusi che sono stati utilizzati per effettuare le operazioni booleane per la creazione dei vuoti dal solido dell'esterno. Il modello 3D solido così ottenuto è stato esportato direttamente in formato "3ds" per poterlo importare nel software *3D Studio Max* di *Autodesk* per le operazioni di *texturing*.

L'applicazione delle *texture* sul modello geometrico ha previsto due scelte procedurali differenti tra esterni ed interni. Per l'esterno sono state utilizzate *texture* standard di mattoni facciavista per le murature e di coppi in laterizio per la copertura; porte, finestre ed altri dettagli dei prospetti sono invece stati mappati con fotografie ortorettificate al fine di permettere una visione specifica dei dettagli di interesse storico-architettonico. Le stanze interne, invece, sono state mappate utilizzando direttamente le immagini sferiche HDR acquisite dalla fotocamera del laser scanner. Potendo applicare una sola *texture* per ogni superficie modellata, prima di essere mappate, le immagini panoramiche sono state modificate con *Adobe Photoshop* per eliminare, ove possibile, il cono d'ombra alla base dello scanner ed altre occlusioni prospettiche (Fig. 10).

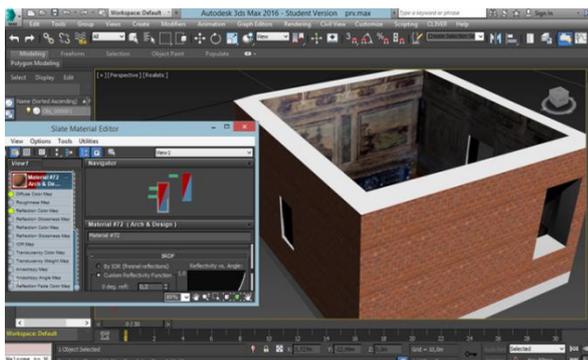


Figura 10. *Texturing* del modello 3D in *3D Studio Max*.

#### 4.2 Creazione del tour virtuale interattivo

Per la creazione del *tour* virtuale a partire dai dati modellati sono stati valutati diversi *software*, applicativi e motori grafici.

La scelta è ricaduta su *Cl3ver* per la sua facilità di utilizzo, la compatibilità massima con i *software* di modellazione utilizzati e, non ultima, la possibilità di testarlo gratuitamente.

*Cl3ver* è sostanzialmente un motore grafico 3D in tempo reale che permette di modificare, pubblicare e visualizzare contenuti 3D su un sito web. I modelli 3D, realizzati con *software* di modellazione terzi, vengono importati in un *editor* da cui è possibile creare esperienze interattive coinvolgenti tramite semplici comandi. Il visualizzatore, basato su tecnologia *WebGL* e librerie *JavaScript open source*, è ottimizzato per *Google Chrome* e consente l'interazione con la scena 3D senza la necessità di *plug-in* di terze parti.

Il modello geometrico 3D del Maurizioano arricchito con le informazioni cromatiche è stato trasferito direttamente da *3D Studio Max* a *Cl3ver* grazie all'apposito *plug-in*. Utilizzando i comandi di *editor* di *Cl3ver* sono state impostate le modalità di navigazione, alcune viste predefinite ed i collegamenti per l'accesso a contenuti multimediali di vario tipo (testi, fotografie, video, modelli 3D) o a *link* esterni (Fig. 11).



Figura 11. Creazione del *tour* virtuale interattivo del modello 3D del Maurizioano in *Cl3ver*.

La possibilità di interazione diretta dell'utente con un modello tridimensionale *as-built* generato da dati metrici rilevati, con l'applicazione di *texture* fotografiche e l'inserimento di contenuti informativi determina l'opportunità di utilizzo della visita virtuale anche come avanzato strumento scientifico e di ricerca.

### 5. STAMPA 3D PER LA FRUIZIONE

Nel progetto del Maurizioano la tecnologia di stampa 3D è stata utilizzata per riprodurre in scala il busto di Ariosto posizionato sulla facciata principale della villa quattrocentesca.

#### 5.1 Modellazione a *mesh*

Le scansioni del busto di Ariosto sul prospetto principale, effettuate con maggiore risoluzione (*ultra high*) e qualità (*premium quality*) rispetto a quelle del rilievo architettonico, sono state oggetto di modellazione superficiale a *mesh* mediante il software *Geomagic Studio* per la creazione di un file idoneo alla riproduzione materica mediante tecniche additive di stampa 3D.

Le tre nuvole di punti di dettaglio sono state dapprima elaborate separatamente per la creazione automatica delle superfici (*meshes*) ad elementi triangolari TIN (*Triangulated Irregular Network*). A seguire, è stata posta particolare attenzione all'attività di pulitura, filtraggio e soprattutto rimozione delle difettologie (punte, autointersezioni, piccoli fori, tunnel, ecc.) dalle singole *mesh* ottenute, poiché queste avrebbero influito

negativamente sulle successive fasi di allineamento e unificazione delle *mesh* generando disallineamenti e “rumore”. Le tre *mesh* attentamente processate sono state allineate mediante l’ausilio di algoritmi automatici ed unificate per creare un’unica superficie con risoluzione media di circa 2 mm.

L’attività di rimozione delle difettologie è poi stata ripetuta sulla *mesh* unificata prima di procedere con la chiusura di tutti i buchi e la scalatura del modello 3D (Fig. 12) al fine di ottenere un unico file “chiuso” in formato “.stl” di circa un milione di triangoli ottimizzato per la riproduzione materica mediante stampa 3D in scala 1:10.



Figura 12. Modello 3D a *mesh* del busto di Ariosto.

## 5.2 Riproduzione materica

In relazione alla finalità di fruizione tattile della riproduzione materica del busto di Ariosto è stata effettuata un’attenta valutazione delle tecnologie e dei materiali disponibili sul mercato. Le caratteristiche discriminanti di scelta sono risultate essere la leggerezza e resistenza del materiale e l’economicità e risoluzione della tecnologia.

Sulla base di questi criteri la scelta è ricaduta velocemente sulla tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) o FFF (*Fused Filament Fabrication*), grazie alla quale un filamento plastico passa attraverso un estrusore che, portato ad alta temperatura, rende il materiale fluido; questo viene poi “depositato” sul piatto di stampa secondo uno schema di linee che costituiscono gli strati (*layer*) che vengono sovrapposti ai precedenti.

Con questa tecnica è possibile l’utilizzo di diversi materiali, a seconda del tipo di estrusori e di stampanti, per la realizzazione di oggetti con qualsiasi geometria utilizzando, se necessario, strutture di supporto. Tra i materiali di maggiore utilizzo nel settore consumer vi sono il PLA (Acido Polilattico), che unisce ottime caratteristiche di robustezza a buone doti di flessibilità, e l’ABS (Acrilnitrile-Butadiene-Stirene), che consente invece di ottenere oggetti robusti, con ottime caratteristiche meccaniche.

Nell’immaginario comune questa tecnologia è considerata erroneamente economica in quanto utilizzata dalla maggior parte delle stampanti 3D *desktop*. In realtà anche macchine professionali molto costose sfruttano questa tecnologia utilizzando materiali molto specifici, prestazionali e costosi ([www.justprint3d.it](http://www.justprint3d.it)).

Al fine di contenere il peso e soprattutto il costo della riproduzione materica è quindi stata valutata la possibilità di “svuotare” il file dando alle pareti esterne del busto uno spessore (minimo 1 mm) al fine di ridurre la quantità di materiale da utilizzare. Tuttavia, a causa delle numerose strutture di supporto necessarie per sorreggere il materiale in fase di realizzazione, questa soluzione non avrebbe determinato un’effettiva diminuzione dei costi rispetto all’impostazione di pieno riempimento a bassa densità (25%), che garantisce al

contempo autosostegno e leggerezza. È infatti importante sottolineare che, almeno in questo caso, il costo della riproduzione è determinato principalmente dai lunghi tempi di stampa (7 ore) e solo marginalmente dalla quantità di materiale (35 grammi, compresi i supporti).

Il file digitale in formato “.stl” è quindi stato convertito nel *G-code*, ovvero nel linguaggio di programmazione usato anche dalle macchine a controllo numerico (CNC), che fornisce alla stampante 3D le informazioni necessarie per comandare il movimento degli assi, dell’estrusore e dell’ugello. Terminata la stampa, la superficie dell’oggetto è stata appositamente trattata con appositi solventi per la rimozione dei supporti e il lavoro di finitura mirato a ridurre, per quanto possibile, la visibilità degli strati di materiale (spessore *layer* 0.178 mm) depositi dall’estrusore (Fig. 13).



Figura 13. Realizzazione in ABS mediante stampa 3D del busto di Ariosto.

## 6. CONCLUSIONI

La sperimentazione svolta sul caso studio del Palazzo del Maurizio di Reggio Emilia ha permesso di valutare alcune possibilità di utilizzo delle nuvole di punti derivanti da un rilievo 3D a scansione laser per scopi legati alla documentazione, alla conservazione e alla fruizione dei Beni Culturali.

La nuvola di punti grezza, dopo una prima fase di elaborazione necessaria all’ottenimento del modello 3D completo, è stata indagata per individuare anomalie geometriche utili a professionisti e tecnici incaricati della progettazione degli interventi di restauro e manutenzione sull’edificio; sulla facciata frontale e sulle murature sono state svolte analisi specifiche che hanno evidenziato risultanze non altrimenti individuabili con la medesima continuità spaziale mediante tecniche tradizionali. Successive attività di elaborazione della stessa nuvola di punti hanno permesso di realizzare il modello solido 3D degli ambienti che, con la sovrapposizione di *texture* fotografiche, è stato utilizzato per la creazione di un *tour* virtuale interattivo idoneo alla fruizione da remoto; ad oggi, questo utilizzo è di particolare interesse a causa della chiusura temporanea del monumento per lavori di ripristino. Al fine di mostrare anche le potenzialità di sfruttamento dei dati raccolti per la creazione di laboratori didattici e/o percorsi tattili nei musei è stata riprodotta in scala la statua raffigurante il busto di Ludovico Ariosto con tecnica di stampa 3D.

Attraverso questa esperienza si è cercato di dare impulso ad un approccio poco convenzionale di impiego delle nuvole di punti risultanti da rilievi laser scanning. Il lavoro ha pienamente dimostrato come le attività di rilievo tridimensionale, se correttamente progettate ed effettuate, possano essere sfruttate per molteplici utilizzi, non esclusivamente tecnici. Sebbene le

possibilità di applicazione siano sicuramente più ampie di quelle menzionate e presentate in questo lavoro, grazie ad un approccio multidisciplinare si auspica che quanto fatto possa comunque favorire sia il dialogo tecnico con i restauratori sia quello comunicativo e didattico con gli utilizzatori per portare realmente le tecnologie geomatiche a servizio dei Beni Culturali.

### RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato reso possibile grazie alla collaborazione dei Musei Civici di Reggio Emilia che hanno autorizzato le attività di rilevamento presso il sito e la successiva pubblicazione dei risultati del progetto.

Si intende inoltre ringraziare Reggio Emilia Innovazione per il prezioso aiuto nelle fasi organizzative e Zöller+Fröhlich Italia per aver reso possibile l'esecuzione dei test strumentali.

Dal punto di vista tecnico, è doveroso sottolineare il supporto delle colleghe di GEIS ([www.geomaticsengineering.it](http://www.geomaticsengineering.it)), Cristina Castagnetti ed Eleonora Bertacchini, durante tutte le fasi del progetto e ringraziare Maria Beatrice Starace per la preziosa collaborazione sull'attività di modellazione solida 3D propedeutica alla creazione del *tour* virtuale.

### BIBLIOGRAFIA

Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Idelson, A.I., Scopigno, R., 2013, Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*, 14(4), pp. 332-345.

Bertacchini, E., Boni, E., Capra, A., Castagnetti, C., Dubbini, M., 2010, Terrestrial laser scanner for surveying and monitoring middle age towers. *Proceedings of XXIV FIG International Congress 2010 (ISBN 978-87-90907-87-7)*

Bigliardi, G., Dioni, P., Panico, G., Michiara, G., Ravasi, L., Romano, M.G., 2015, Resaturo e innovazione al Palazzo Ducale di Mantova: la stampa 3D al servizio dei Gonzaga. *Archeomatica*, 2015(3), pp. 40-44.

Böhler, W., Hein, G., Marbs, A., 2001, The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. *Proceedings of XVIII CIPA Symposium, Postdam, Germany*.

Capra, A., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Dubbini, M., Rivola, R., Toschi, I., 2011, Rilievi Laser Scanner per l'analisi geometrica delle torri degli Asinelli e della Garisenda. *INARCOS*, 719, pp. 35-42.

Capra, A., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Rivola, R., Dubbini, M., 2015, Recent approaches in geodesy and geomatics for structures monitoring. *Rendiconti Lincei*, 26(1), pp. 53-61. DOI 10.1007/s12210-015-0436-z.

Castagnetti, C., Bertacchini, E., Capra, A., Dubbini, M., 2012, Terrestrial Laser Scanning for Preserving Cultural Heritage: Analysis of Geometric Anomalies for Ancient Structures. *Proceedings of FIG Working Week 2012, Rome, 6-10 May, ISBN 97887-90907-98-3*.

Castagnetti, C., Silvestri, E., Capra, A., 2016, Diagnostic Use of Laser Scanning Data to Identify Current and Historical Deformations and Geometries: the case of the Modena Cathedral. *Proceedings of the 3rd Joint International*

*Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, pp. 1-6, 30.03-01.04 Wien.

Gordon, S., Lichti, D., Franke, J., Stewart, M., 2004, Measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners. *Proceedings of 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, UK, 28 June - 1 July*.

Guarnieri, A., Vettore, A., El-Hakim, S., Gonzo, L., 2004, Digital photogrammetry and laser scanning in cultural heritage survey. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, pp. 154-159.

Guarnieri, A., Pirotti, F., Vettore, A., 2010, Cultural heritage interactive 3D models on the web: an approach using open source and free software. *Journal of Cultural Heritage*, 11, pp. 350-353.

Meyer, E., Grussenmeyer, P., Perrin, J.O., Durand A., Drap P., 2002, A web information system for the management and the dissemination of Cultural Heritage data. *Journal of Cultural Heritage*, 3, pp. 325-331.

Neubauer, W., Doneus, M., Studnicka, N., Riegl, J., 2005, Combined high resolution laser scanning and photogrammetrical documentation of the pyramids at Giza. *CIPA XX International Symposium, Torino*, pp. 470-475.

Orlandi, M., Zambruno, S., Vazzana, A., 2014, Tecnologia, Beni Culturali e Turismo: i Tour Virtuali (Virtual Tours) come strumento per una corretta comunicazione dei Beni Culturali. *Didattica*, 2014(34).

Rivola, R., Bertacchini, E., Castagnetti, C., Toschi, I., Capra, A., 2011, Registrazione di scansioni laser scanner: potenzialità del metodo diretto. *Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia*, 2011(2), pp. 43-62. ISSN 1721-971X.

Scopigno, R., Cignoni, P., Pietroni, N., Callieri, M., Dellepiane, M., 2014, Digital Fabrication Technologies for Cultural Heritage (STAR). *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, pp. 75-85.

### Riferimenti da norme e linee guida

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011. *Linee guida per la Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*.

National Library of Australia, 2013. *Guidelines for the preservation of digital heritage*. Information Society Division, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.