

La costruzione di modelli multisensoriali di statuaria antica, tra innovazione e tradizione

Luca James Senatore

Abstract

La ricerca si focalizza sullo sviluppo di una metodologia scientifica per la creazione di copie di beni culturali senza riduzione di scala, in grado di simulare le qualità fisiche dei materiali originali come il marmo, per consentire una fruizione multisensoriale. Utilizzando tecnologie innovative e tecniche tradizionali, il processo inizia con un rilievo massivo, identificando un modello digitale di riferimento. Successivamente, la costruzione di un "nuovo originale" tramite stampa 3D in PLA e scialbatura apre la strada alla creazione di copie mediante colatura con una miscela cementizia in grado di simulare la materialità del marmo. La scelta dei materiali, sottoposti a test percettivi e termici, gioca un ruolo cruciale nella scelta del materiale da utilizzare per la replicazione delle caratteristiche dell'originale. La validazione dei risultati geometrici dimostra la compatibilità dei modelli fisici con l'obiettivo della ricerca. In ultimo, lo studio introduce il concetto di "livello di attendibilità metrica" come parametro essenziale per la validazione scientifica dei risultati. La ricerca, svolta con la collaborazione della Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Roma e della Pontificia Commissione per l'Archeologia Sacra, si concentra sulla copia della Testa di Sant'Elena nel Mausoleo di Sant'Elena a Roma, evidenziando l'applicabilità della metodologia proposta nel contesto del patrimonio culturale.

Parole chiave: modello 3D, scanner a luce strutturata, SfM, Testa di Sant'Elena, modelli da stampanti 3D.

Introduzione

Le attuali tecnologie di produzione con stampante 3D hanno modificato in maniera sostanziale le modalità costruttive dei modelli analogici. In relazione alla tipologia di oggetto e alla scala del modello fisico che si voglia ottenere, è possibile selezionare la tecnologia di stampa e il supporto più adatti alle caratteristiche prestazionali richieste, offrendo al fruitore un numero considerevole di possibilità. Il mercato dei materiali di stampa si è concentrato in particolare sull'individuazione di soluzioni, tutte a base plastica o resinosa, che variano sostanzialmente nelle qualità meccaniche del prodotto finito, ma non esistono al momento metodi che permettano di riprodurre le caratteristiche tipiche dei materiali utilizzati nella scultura. Non si tratta di simulare la cromia, fatto che in alcuni casi è possibile,

quanto piuttosto di riuscire a realizzare oggetti in grado di emulare le qualità fisiche, quali la temperatura e la trama della materia originale, che troverebbero un interessante impiego per la valorizzazione multisensoriale di un gran numero di beni culturali e in particolare per la riproduzione della statuaria antica.

Il contributo si incentra sui risultati di una ricerca che ha come obiettivo la definizione di una soluzione metodologica e tecnologica capace di superare questo limite permettendo di realizzare copie di beni culturali senza riduzione di scala e in grado di simulare le qualità dei materiali originali in marmo. Le copie così realizzate, proprio in virtù della possibilità di restituire tutte le caratteristiche dell'originale, potranno trovare un immediato utilizzo nell'ambito

della valorizzazione, permettendo una fruizione multisensoriale di beni e garantendo al contempo la salvaguardia degli originali [1].

Tradizione e innovazione si incontrano in questa esperienza che dal reale permette di tornare al reale attraverso la creazione di un "nuovo originale" costruito con stampante 3D, con il quale realizzare una matrice a contatto da utilizzare come stampo per la costruzione di una copia mediante colatura, in grado di restituire le proprietà materiche dell'oggetto originale.

Attraverso un percorso articolato che mette a sistema tecnologie innovative e tecniche tradizionali, la ricerca si è

concentrata sull'intero processo di creazione della copia andando a validare scientificamente tutte le fasi di lavoro: dall'acquisizione delle superfici; all'individuazione delle procedure per la realizzazione delle copie; alla valutazione delle caratteristiche proprie della materia con cui sono realizzati gli originali affinché siano riprodotte nella copia; all'individuazione di procedure per il controllo e la validazione scientifica di tutte le fasi di lavoro.

Lo ricerca [2], svolta con il contributo della Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Roma e della Pontificia Commissione per l'Archeologia Sacra, descrive le attività necessarie per la costruzione della copia di un reperto archeologico in scala 1:1 per permetterne una più ampia fruizione multisensoriale all'interno del percorso museale del Mausoleo di Sant'Elena in Roma.

Fig. 1. Testa di Sant'Elena, IV secolo, Mausoleo di Sant'Elena, Roma (fotografia dell'autore).



Caso di studio

Il caso studio indagato è la cosiddetta *Testa di Sant'Elena* [Inv. PCAS-82] (fig. 1) conservata presso l'Antiquarium del Mausoleo di Sant'Elena, un sito culturale della Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Roma riaperto nel 2019 dopo un lungo restauro grazie alla Pontificia Commissione per l'Archeologia Sacra che attualmente gestisce parte della mostra che include le vicine catacombe dei Santi Marcellino e Pietro [Giuliani 2015; Bochicchio 2019].

Il Mausoleo di Sant'Elena costituisce uno dei più importanti complessi architettonici della Roma paleocristiana del IV secolo. Costruito tra il 315 e il 326, originariamente destinato a servire da sepoltura per lo stesso Costantino, fu poi utilizzato come sepolcro per Flavia Giulia Elena, madre dell'imperatore, morta nel 329.

La ricerca ha come obiettivo la ricostruzione fisica della *Testa di Sant'Elena* [Russo et al. 2023], un manufatto in marmo pentelico che si presenta in buono stato di conservazione. La testa consiste nel frammento di un volto di dimensioni 215×213×218 mm caratterizzato da capigliatura a "turbante" con una grande treccia che avvolge i capelli, divisi da una riga centrale e ripiegati in onde regolari che scendono fino alla nuca, nascondendo le orecchie. Lo studio del manufatto, autorizzato dalla Commissione Pontificia, rientra in un lavoro di promozione attivato nel 2021 dalla Soprintendenza Speciale di Roma per il completamento dell'Antiquarium del complesso [Giuliani 2016].

Il rilievo

Il rilievo costituisce un passaggio essenziale per la costruzione della base dati necessaria all'ottenimento di una copia, sia essa digitale o fisica. Molto si è scritto negli ultimi anni in merito alle possibilità offerte dalle diverse tecnologie di acquisizione massiva applicate a oggetti statuari con lo sviluppo di workflow dedicati che sfruttano in particolare le tecniche Lidar e le metodologie SfM. Tra i diversi contributi presenti in letteratura è utile citare alcuni studi risalenti a ormai più di 20 anni fa [Levoy et al. 2000; Bernardini et al. 2002; Fontana et al. 2002; Guidi et al. 2004] che hanno permesso di testare per la prima volta le potenzialità degli strumenti di acquisizione range-based, definendo la pipeline [Bernardini, Rushmeier 2002; Godin et al. 2002] e aprendo la strada alla loro diffusione nel dominio del patrimonio culturale.

Le ragioni che hanno visto porre l'attenzione sui complessi statuari sono rintracciabili nella natura geometrica e formale che caratterizza le superfici statuarie che risultano di notevole complessità. Data la natura sensibile degli oggetti studiati, il ricorso a strumenti di rilievo a contatto risulta non applicabile, e questo fatto ha portato allo sviluppo di tecniche adeguate alla raccolta di un numero considerevole di dati necessari alla comprensione delle superfici stesse. Le sperimentazioni iniziano a essere condotte intorno al 2000 con le tecniche fotogrammetriche che, seppure ancora non in grado di estrarre un numero significativo di punti omologhi nello spazio da coppie di fotogrammi, già mettevano in evidenza il potenziale di queste metodologie per la costruzione, anche se semplificata, di superfici free-form [Grün et al. 2002]. Certamente alcune prime discussioni sulle potenzialità dell'uso delle immagini per la costruzione di modelli 3D [Curless 2000] hanno portato nel primo quinquennio del 2000 allo sviluppo definitivo delle tecniche *Visual Structure from Motion* [Szeliski, Kang 1993] capaci di restituire artefatti 3D complessi, aprendo alcune discussioni sull'uso di sistemi attivi o passivi per piccoli artefatti [Remondino et al. 2005] e portando le tecniche di *image-matching* a essere una effettiva alternativa ai sistemi *range based* [Remondino et al. 2014]. Queste sperimentazioni hanno consentito di implementare un processo di ripresa oggi consolidato e applicato in molteplici ambiti applicativi del patrimonio culturale. Queste condizioni al contorno definiscono un quadro di ricerca complesso, che motiva le molteplici sperimentazioni nell'ambito della statuaria.

In questo contesto si inserisce la ricerca che, in continuità con le informazioni ricavate da alcune precedenti esperienze [Russo et al. 2022], si è posta l'obiettivo di definire parametri scientifici per la costruzione della base dati e per la validazione dei risultati. Tenuto conto dell'obiettivo – ovvero la riproduzione senza riduzione di scala – si è posta l'attenzione sull'individuazione di parametri di controllo e valori che potessero garantire la migliore attendibilità metrica di tutti i modelli. I parametri considerati sono stati l'accuratezza sul punto (con valore soglia pari a 0,1 mm) e la risoluzione della nuvola di punti (con valore di soglia pari a $0,2 \times 0,2$ mm). Questi criteri si sono dimostrati raggiungibili sia in fase di acquisizione che si stampa [3] (fig. 2). Per l'acquisizione condotta all'interno dell'Antiquarium (fig. 3), sono state testate due distinte metodologie [4] di rilievo: attraverso la tecnica SfM e l'impiego di scanner a luce strutturata.

Metodologia SfM

La metodologia SfM rappresenta una soluzione efficace sia in termini di tempo che di logistica. La possibilità di effettuare un numero considerevole di scatti permette la costruzione di modelli di alto dettaglio, ovvero nuvole di punti con risoluzione anche inferiore al decimo di millimetro e quindi compatibili con i valori soglia.

L'utilizzo di questa metodologia ha permesso l'ottenimento di un modello *point cloud* quantitativamente conforme ai

Fig. 2. Risultati della fase di acquisizione di modelli *point cloud* texturizzati ottenuti con tecnica SfM (a sinistra) e con laser a luce strutturata (a destra), (elaborazione digitale dell'autore).



valori soglia di progetto. Per la messa in scala della nuvola di punti si è operato mediante un confronto *cloud to cloud* con un modello dall'attendibilità compatibile con i parametri di progetto. Non essendo possibile interagire con il manufatto originale con strumentazione a contatto con accuratezze inferiori al decimo di millimetro, si è deciso di prendere come riferimento il modello realizzato con scanner a luce strutturata con attendibilità strumentale dichiarata in 0,1 mm e risoluzione pari a $0,2 \times 0,2$ mm. La costruzione della superficie mesh di interpolazione della nuvola di punti ha rimarcato il limite di questa metodologia, in particolare per la presenza di una grande quantità di rumore evidente soprattutto nelle zone lisce della superficie originale.

Scanner a luce strutturata

Una seconda attività di rilevamento è stata effettuata con uno scanner *hand-held* a luce strutturata [5] che, tenendo conto della distanza variabile di acquisizione stimata a 0,2 mm, è capace di realizzare una nuvola di punti con maglia $0,2 \times 0,2$ mm. L'utilizzo di questo

Fig. 3. La fase di acquisizione realizzata dopo aver predisposto un set dell'Antiquarium del Mausoleo di Sant'Elena (fotografia dell'autore).



strumento ha permesso la costruzione di un modello affidabile e metricamente attendibile con un'accuratezza coerente con le richieste dello studio. L'analisi della nuvola di punti risultante dal rilievo ha evidenziato una quasi totale assenza di rumore con effetti positivi per la successiva elaborazione della superficie mesh. I migliori risultati si sono osservati nella definizione delle superfici lisce che lo strumento è in grado di riconoscere e discretizzare con bassissimo livello di rumore. Proprio in virtù delle caratteristiche geometriche, i modelli realizzati a partire dalla base dati ottenuta con questo strumento – sia point cloud che mesh – sono stati considerati *Gold Standard* in tutte le attività di validazione dei risultati delle diverse fasi della ricerca. In virtù della migliore qualità della superficie mesh, il modello generato dai dati acquisiti dalla scansione con luce strutturata è stato utilizzato in fase di stampa 3D per la creazione del "nuovo originale".

La costruzione della copia: dal reale al reale attraverso il digitale

Una volta realizzato il modello digitale *mesh* dell'opera, è stato possibile costruire il modello fisico attraverso la stampa 3D. Tra le tecnologie di produzione additiva è stata preferita la stampa a deposizione di filamento fuso utilizzando una *Delta Wasp 4070* caricata con acido polilattico (PLA) di colore bianco, estruso con ugello di 0,4 mm e impostata per realizzare slice di 0,2 mm. La tecnologia *Fused deposition modeling* (FDM) è stata scelta in quanto attualmente risulta essere l'unica soluzione idonea a riprodurre oggetti di grandezze considerevoli e quindi potenzialmente la sola utilizzabile per la costruzione di copie di statue di notevoli dimensioni (fig. 4). Prodotta la copia in PLA, questa è stata sottoposta a un trattamento di scialbatura (fig. 5) con miscela a base di carbonato di calcio e resina data a pennello al fine di eliminare le creste tipiche del processo di *slicing*. Il risultato di questa operazione ha permesso la definizione di un nuovo originale con il quale si è potuto procedere con l'applicazione delle tecniche tradizionali per la costruzione di copie mediante contatto. Nello specifico, si è operato con la creazione di uno stampo realizzato con gomme siliconiche capace di aderire perfettamente alla superficie del nuovo originale per restituirne un negativo da utilizzare per l'elaborazione della copia finale (fig. 6).

Realizzata la gomma siliconica e ricomposto lo stampo (fig. 7), è stata quindi realizzata la copia fisica mediante colatura con una miscela a base cementizia selezionata in relazione all'effetto materico desiderato per simulare il materiale dell'originale.

I materiali per la costruzione della copia

La scelta dei materiali da utilizzare nell'operazione di colatura all'interno dello stampo in silicone ha riguardato una parte sostanziale della ricerca per il suo ruolo chiave nella caratterizzazione percettiva della copia [Senatore et al. 2022]. Tra le caratteristiche che possono qualificare una superficie sono state valutate la trama al tatto, la resistenza all'abrasione, la durezza, la permeabilità a liquidi e grassi, e la capacità di dispersione del calore.

Per la valutazione delle qualità specifiche delle possibili soluzioni per miscela da adoperare nella riproduzione, sono stati costruiti provini con due differenti leganti, a base cementizia e a base resinosa, ai quali è stata aggiunta polvere di marmo in diverse percentuali. I provini sono stati oggetto di test al fine di qualificarli in relazione ai parametri precedentemente definiti.

Allo stesso tempo, su alcuni pezzi originali in materiale fittile o marmoreo, sono state effettuate le medesime prove di controllo al fine di creare dei riferimenti per un confronto (fig. 8).

La verifica ha messo in luce alcune proprietà comuni tra i provini in relazione al legante utilizzato:

- le miscele a elevato contenuto di resina si sono caratterizzate per un'ottima resistenza agli agenti esterni;

un'ottima resistenza all'usura; una buona elasticità; un'ottima capacità isolante ovvero in grado di mantenere a lungo il calore. A livello percettivo-tattile i campioni hanno evidenziato la quasi totale assenza di trama. Un approfondimento in merito alla capacità di disperdere il calore ha rilevato come, a parità di condizioni ambientali, il materiale a base resinosa impieghi fino a cinque volte più tempo per disperdere una determinata quantità di calore rispetto alla pietra, da cui la sensazione di calore percepita entrando a contatto con superfici plastiche;

- le miscele a base cementizia hanno mostrato una minor capacità di resistenza agli agenti esterni con problematiche legate all'usura; una parziale permeabilità a liquidi e grassi; una maggiore rigidità; a livello termico una buona capacità di dispersione del calore. A livello percettivo-tattile i campioni hanno evidenziato la presenza di una trama assimilabile a quella della pietra. Un approfondimento specifico sulle capacità termiche dei materiali ha permesso di individuare alcune miscele con una dispersione termica simile a quella della pietra e del marmo;
- per le miscele a base cementizia, sia possibile migliorarne la resistenza agli agenti esterni mediante applicazione, a conclusione del processo di asciugatura, di un film a base resinosa andando a modificare le capacità di dispersione del calore.

Una volta determinati i valori di confronto rilevando i medesimi parametri sugli oggetti originali, è stato possibile stilare un elenco di soluzioni classificate in relazione alla capacità di restituire le caratteristiche degli originali e utilizzabili di volta in volta in relazione ai diversi materiali per cui è richiesta la copia fisica (fig. 9).

Fig. 4. La stampa 3D: a sinistra il processo di stampa; a destra il dettaglio della superficie con le scalettature tipiche del processo di produzione (fotografie dell'autore).



Fig. 5. La scialbatura: a sinistra il nuovo originale dopo il trattamento; a destra il dettaglio che permette di apprezzare l'eliminazione della scalettatura del processo di stampa (fotografie dell'autore).

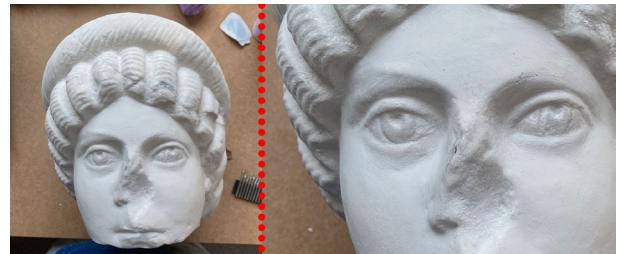


Fig. 6. La costruzione delle gomme siliconiche partendo dal nuovo originale (fotografia dell'autore).

Fig. 7. Lo stampo ricostruito e pronto a ricevere la miscela a base di cemento e polvere di marmo per la costruzione della copia (fotografia dell'autore).



Tenuto conto dell'utilizzo aptico della nuova copia ovvero la capacità della replica di restituire tattilmente al fruitore il senso della materia originale, la scelta del materiale da utilizzare per la colatura è ricaduta in una miscela (campione 5) a base cementizia a polvere di marmo le cui proprietà si avvicinano maggiormente a quelle del marmo originale.

La validazione dei risultati geometrici

Tutti i modelli ottenuti, sia digitali che fisici, sono stati oggetti di verifica metrologica [Russo et al. 2023] mediante comparazione con il modello digitale di riferimento individuato nella scansione con scanner a luce strutturata sull'oggetto originale (*Gold Standard*). Per i modelli fisici si è proceduto a un nuovo rilievo utilizzando lo scanner a luce strutturata. Per poter verificare l'effettiva risposta strumentale al caso studio ai modelli digitali utilizzati per il confronto non sono stati applicati algoritmi di *smoothing* o filtri.

I diversi modelli sono stati importati nel programma *CloudCompare* e, dopo aver effettuato l'operazione di roto-traslazione senza scalatura, sono state analizzate le deviazioni tra i singoli modelli. Ogni modello è stato usato con la risoluzione nativa, evitando di introdurre processi di decimazione che potessero intervenire in un qualche modo nella forma del modello e preservando quindi il dettaglio ottenuto in fase di acquisizione.

Dal confronto metrologico è stato possibile evincere alcune considerazioni. A livello generale, gli scostamenti riscontrati fra i diversi modelli sono estremamente ridotti e non significativi. Per quanto riguarda i metodi SfM è emerso come questa rimanga una tecnica di rilevamento estremamente affidabile sotto il profilo geometrico che radiometrico, con purtroppo considerevoli livelli di rumore rilevabile in particolare per le porzioni di superficie estremamente lisce. L'applicazione di un filtro di *smoothing* è stata scartata in relazione alle variazioni sulla natura delle superfici che ne avrebbe inficiato il risultato.

Per quanto riguarda invece il confronto fra il modello digitale di riferimento, con i modelli fisici, sia quello in PLA con successiva scialbatura (matrice), sia quello realizzato per colatura, si è notato come i vari passaggi legati alla produzione abbiano introdotto variazioni geometriche che sono risultate poco significative in termini quantitativi, se non in corrispondenza di specifici cambi repentini di giacitura o per la presenza di importanti variazioni di profondità. In generale, la differenza tra i modelli fisici e il *Gold Standard*

sono risultati compatibili con l'obiettivo della ricerca come ha messo in luce in particolare il dato della deviazione standard che è risultata per tutti i modelli con valori minori o uguali a 1 mm (fig. 10).

Conclusioni

Lo studio aveva come finalità l'individuazione di una metodologia scientifica "non a contatto" per la realizzazione di copie di beni culturali senza riduzione di scala coerenti con gli originali, sia a livello metrico che materico, finalizzate a una loro fruizione multisensoriale.

Gli attuali metodi di produzione presentano ancora una serie di limiti tecnologici che non permettono la costruzione automatizzata di questa tipologia di manufatti che potrebbe avere enormi vantaggi per la conservazione e valorizzazione delle opere presenti all'interno delle collezioni e nei depositi museali. Per sopperire a questo limite, mettendo a sistema tecnologie innovative e tecniche tradizionali, l'indagine ha dimostrato come sia possibile la costruzione di copie in grado di restituire la forma, la trama e la materia dell'originale (fig. 11). Parallelamente la ricerca ha cercato di definire alcuni parametri oggettivi sulla base dei quali sia possibile validare scientificamente le copie e i modelli. Questo aspetto, rilevante quando si attivano processi di digitalizzazione, assume un carattere prioritario nel momento in cui sia necessario costruire un oggetto a grandezza reale. A questo scopo, lo studio ha preso in considerazione il livello di attendibilità metrica, dato scientifico quantitativo che può essere considerato come la "quantità di informazioni" necessarie a garantire l'affidabilità dei risultati, utilizzabile sia in fase di costruzione che di validazione. In passato la quantità di informazioni restituite da un modello era insito nel concetto di scala e rappresentava un riferimento essenziale per valutare la qualità di un prodotto. La possibilità di costruire modelli digitali ha introdotto nuove complessità nella definizione del livello di qualità e ciò richiede la determinazione di nuovi parametri di controllo dei risultati: il livello di attendibilità metrica – parametro strettamente legato alle tecnologie di acquisizione e di produzione – si è dimostrato come valido strumento per la validazione di processi e risultati.

La ricerca ha evidenziato come operando nell'ambito della digitalizzazione, solo la costruzione di un sistema di parametri per la valutazione scientifica dei prodotti permetterà di considerare adeguatamente la qualità dei modelli e che questa attenzione sia auspicabile diventi una prassi non solo

nell'ambito dello studio qui descritto ma, più in generale, ogni qual volta si costruisca un modello digitale, al fine di qualificarlo e contemporaneamente a dare valore alle informazioni che possono essere ricavate da esso.

In merito ai prossimi sviluppi, lo studio qui presentato ha dimostrato la possibilità di simulare oggetti di natura fittile e marmorea e le attività si stanno già concentrando sull'individuazione di una strategia, a basso costo, in grado di restituire la trama e la temperatura di oggetti metallici, ampliando le possibilità di costruzione di copie a tutti quelli che sono i reperti caratterizzati da questa tipologia di materiali. Parallelamente, in virtù della stretta relazione che lega le copie fisiche con le strumentazioni utilizzate nel processo di digitalizzazione e stampa 3D, lo studio si sta concentrando sia sul miglioramento dei livelli di accuratezza dei diversi modelli, che nell'individuazione di soluzioni tecnologiche in grado di automatizzare il processo di costruzione della copia, riducendo al minimo l'interazione umana per migliorando l'accessibilità all'utilizzo delle copie nell'ambito della valorizzazione dei beni culturali.

Fig. 8. Test con Termocamera sui campioni per la valutazione del tempo di ritorno alla temperatura ambiente del materiale a seguito di contatto (fotografia ed elaborazione grafica dell'autore).

Fig. 9. Valutazione del tempo di ritorno alla temperatura ambiente dei campioni di miscela per il confronto con il materiale dell'originale. Sull'asse delle y è indicata la temperatura espressa in gradi centigradi, sull'asse x il tempo espresso in secondi (elaborazione grafica dell'autore).

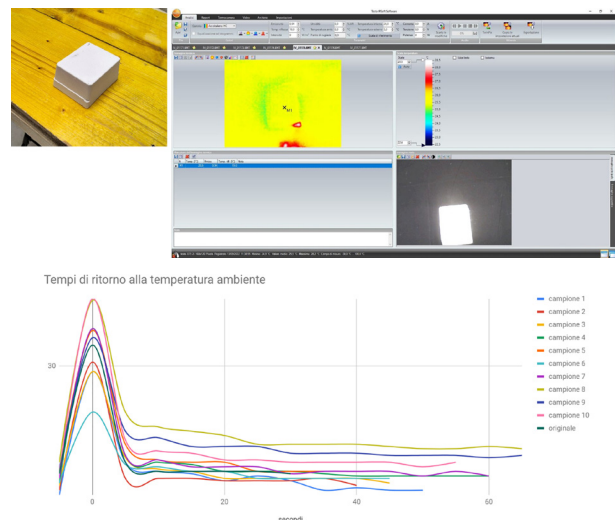
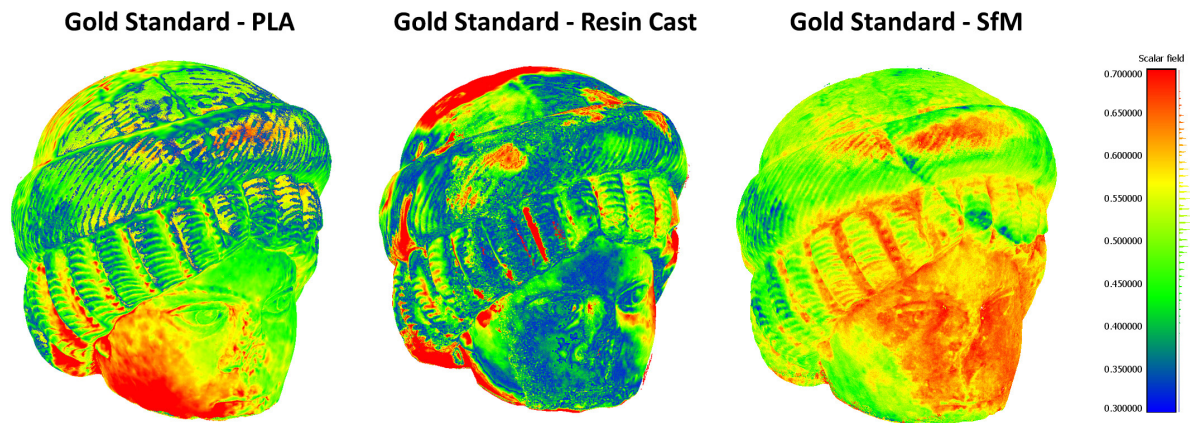


Fig. 10. Comparazione e deviazione in mm: Gold Standard - Copia fisica in PLA; Gold Standard - Copia fisica colata (elaborazione grafica dell'autore).

Fig. 11. La nuova copia realizzata tramite colatura (fotografia dell'autore).



Ringraziamenti

La ricerca rientra tra le attività che fanno parte di un Accordo di Ricerca tra il Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Sapienza e la Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Roma (Responsabile Scientifico Luca J. Senatore). Si ringraziano il dott. Rocco Bochicchio della Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti

e Paesaggio di Roma e la dott.ssa Raffaella Giuliani della Pontificia Commissione di Archeologia Sacra per il supporto e la disponibilità durante tutte le fasi della ricerca.

Si ringrazia inoltre il restauratore Luigi Loi che ha seguito tutte le fasi di lavoro necessarie alla realizzazione della copia fisica.

Note

[1] La proposta, che utilizza metodologie “non a contatto”, risponde all'attuale normativa vigente e in particolare al limite imposto dal Codice dei Beni Culturali, Art 107 comma 2 del Dlgs 42/2004 che impedisce la costruzione di copie di opere sottoposte a salvaguardia con le tradizionali tecniche a contatto.

[2] Il contributo costituisce la sintesi conclusiva dei risultati di una lunga attività di ricerca finanziata dall'Università di Roma Sapienza (Bando Seed PNR 2022 e 23) che vede il sottoscritto in qualità di PI. Nel corso del tempo, alcuni dei risultati parziali conseguiti durante le fasi di studio che in questa sede sono riproposti in maniera sistematica e organica, sono stati già oggetto di pubblicazione in convegni nazionali e internazionali. Per approfondimenti specifici, si rimanda alle indicazioni bibliografiche presenti sul testo e in bibliografia.

[3] Si fa riferimento in particolare alle stampanti a filo che rappresentano, ad oggi, l'unica soluzione operativamente praticabile per la realizzazione di copie di grandi dimensioni. Benché di qualità decisamente superiore con la possibilità di creare strati submillimetrici, le stampanti a

resina sono ancora limitate alla realizzazione di oggetti di dimensioni non superiori a 30 × 30 × 30 cm, incompatibili per la gran parte dei beni culturali. Nello stesso tempo le stampanti a filo permettono la costruzione di oggetti anche di dimensioni considerevoli che possono raggiungere, in alcune versioni di uso industriale, la dimensione di 1 × 1 × 1 m.

[4] La scelta dei sensori non ha previsto l'impiego di scanner laser terrestri in relazione all'impossibilità di ottenere con questi strumenti nuvole di punti con attendibilità compatibili con le richieste definite dal progetto.

[5] Le scansioni sono state realizzate con il dispositivo Skantech Ireal 2 che può restituire nuvole di punti con risoluzione 0,2 mm × 0,2 mm e con accuratezza sul punto pari a 0,1 mm. Lo strumento nasce specificamente per essere utilizzato come body scan. Questa caratteristica e la presenza di filtri di ottimizzazione dedicati allo scopo si sono dimostrati un enorme vantaggio sia nella costruzione di una nuvola di punti ordinata e ottimizzata che nella definizione della costruzione di una superficie mesh in grado di descrivere sia le superfici lisce che quelle scabre.

Autore

Luca James Senatore, Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Sapienza Università di Roma, luca.senatore@uniroma1.it

Riferimenti bibliografici

Bernardini, F., Rushmeier, H. (2002a). The 3D Model Acquisition Pipeline. In *Computer Graphics Forum*. New Jersey: Wiley-Blackwell Publishing, 2002, 21 (2), pp. 149-172. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00574>.

Bernardini, F., Rushmeier, H., Martin, I.M., Mittleman, J., Taubin, G. (2002b). Building a Digital Model of Michelangelo's Florentine Pietà. In *IEEE Comput. Graphics Appl.*, 22 (1), pp. 59-67.

Bochicchio, R. (a cura di). (2019). *Il Mausoleo di Sant'Elena. Il monumento e l'Antiquarium*. Milano: Electa.

Curless, B. (2000). *3D Photography. Course notes for Special Interest Group on Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2000)*. Los Angeles, CA, 24 July 2000.

Fontana, R., Greco, M., Materazzi, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., Rocchini, C., Scopigno, R. (2002). Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo. In *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3 (4), pp. 325-331. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01242-6](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01242-6).

Giuliani, R. (2015). *SS. Marcellino e Pietro. Catacombe di Roma e d'Italia, I I*. Città del Vaticano: Pontificia Commissione di Archeologia Sacra.

Giuliani, R. (2016). Un ritratto ritrovato dell'Augusta Elena dal complesso ad duas lauros? In O. Brandt, G. Castiglia, V. Fiochi Nicolai (a cura di). *Costantino e i Costantinidi. L'innovazione costantiniana, le sue radici e i suoi sviluppi*. Atti del XVI Congresso Internazionale di Archeologia Cristiana. Roma, 22-28 settembre 2013, pp. 879-893. Città del Vaticano: Pontificio Istituto di Archeologia Cristiana.

Godin, G., Beraldin, J.-A., Taylor, J., Cournoyer, L., Rioux, M., El-Hakim, S., Baribeau, R., Blais, F., Boulanger, P., Domey, J., Picard, M. (2002). Active optical 3d imaging for heritage applications. In *IEEE Comput. Graphics Appl.*, 22 (5), pp. 24-36.

Grün, A., Remondino, F., Zhang, L. (2002). Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Conference proceedings of ISPRS Commission V Symposium Close-Range Imaging, Long-Range

Vision. Corfù, GRK, 2-6 September 2002, vol. XXXIV, No 5, pp. 363-368. ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institute of Geodesy and Photogrammetry. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004655538>.

Guidi, G., Beraldin, J.-A., Atzeni, C. (2004). High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: the digitizing of Donatello's "Maddalena". In *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13 (3), pp. 370-380. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.822592>.

Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Gintzton, M., Anderson, et al (2000). The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues. In *SIGGRAPH 2000*. Conference proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New Orleans, 23-28 July 2000, pp. 131-144. Association for Computing Machinery, Inc. <https://doi.org/10.1145/344779.344849>.

Remondino, F., Guarnieri, A., Vettore, A. (2005). 3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning? In J.A. Beraldin, S.F. El-Hakim, A. Gruen, J.S. Walton (Eds.), *Videometrics VIII*. Conference proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging. San José, CA, 2005, vol. 5665, pp. 216-225. International society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.586294>.

Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. In *The Photogram Record*, No 29, pp. 144-166. <https://doi.org/10.1111/phor.12063>.

Russo, M., Senatore, L.J. (2022). Low-cost 3d techniques for real sculptural twins in the museum domain. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Proceeding of the 7th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications. Würzburg, Germany, 15-16 December 2022, vol. XLVIII-2/W1-2022, pp. 229-236. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-229-2022>.

Senatore, L.J., Wielich, B. (2022). Modelli tattili per la conoscenza. "Eros che incorda l'arco" al Parco Archeologico di Ostia Antica. In C. Candito, A. Meloni (a cura di). *DAI - Il Disegno per l'Accessibilità e l'Inclusione*. Atti del I convegno internazionale. Genova 2-3 dicembre 2022, pp. 716-729. Alghero: Publica.

Szeliski, R., Kang, S.B. (1993). Recovering 3d shape and motion from image streams using nonlinear least squares. In *Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York, NY, 15-17 June 1993, pp. 752-753. IEEE. 10.1109/CVPR.1993.341157.