

# BOLLETTINO DI ARCHEOLOGIA ON LINE

DIREZIONE GENERALE ARCHEOLOGIA, BELLE ARTI E PAESAGGIO

XV, 2024/1

doi: 10.60978/BAO\_XV\_01\_05

LUCA JAMES SENATORE\*

## IL RILIEVO E LA MODELLAZIONE PER LA CONOSCENZA, IL RESTAURO E LA VALORIZZAZIONE DELLA STATUARIA ANTICA. IL CASO DELLA STATUA-RITRATTO *IN FORMAM HERCULIS*

*This contribution is part of the study of the digitisation processes of ancient statuary and focuses on the identification of operational protocols for the construction and use of high-resolution digital models or digital twins. Specifically, the study focuses on the case study of the statue in formam Herculis, and all the work phases will be analysed, from activity planning and data acquisition to modelling and analysis, demonstrating how it is possible to put new technologies at the service of the Ancient Statuary knowledge process, integrating the techniques of the past with the most innovative ones based on the tools offered by the digital environment, and offering scholars of the various disciplines the possibility of approaching this type of artefacts in a completely new way.*

### 1. INTRODUZIONE

Le attuali tecnologie di rilievo e modellazione digitale stanno rivoluzionando l'approccio alla conoscenza dei Beni Culturali. Mentre in passato per lo studio di un oggetto era essenziale un contatto diretto con le opere, oggi è possibile condurre simulazioni interpretative, integrazioni o analisi senza dover necessariamente interagire fisicamente con gli oggetti, ma agendo direttamente su copie digitali.

Ciò è reso possibile sfruttando il potenziale delle moderne tecnologie digitali di rilevamento non a contatto<sup>1</sup> che permettono di acquisire un numero considerevole di dati in grado di documentare in maniera accurata sia la qualità metrica che cromatica delle superfici, e con le quali è possibile costruire copie digitali verosimili dei manufatti, gemelli digitali o *digital twin*, con le quali è possibile operare mediante simulazioni scientificamente attendibili<sup>2</sup>.

L'applicazione di questo approccio basato sulla digitalizzazione trova immediate ricadute in tutti gli ambiti inerenti la Conoscenza e la Valorizzazione dei Beni Culturali: per la documentazione, offrendo la possibilità di costruire una base dati descrittiva dello stato

---

<sup>1</sup> GEORGIOPOULOS, STATHOPOULOS 2017.

<sup>2</sup> RUSSO, SENATORE 2022.

dell'opera al momento dell'acquisizione alla quale è possibile accedere anche *off-site*<sup>3</sup>; per il restauro<sup>4</sup>, permettendo la costruzione di simulazioni attendibili che possono costituirsi come riferimento in grado di guidare la vera e propria attività di restauro<sup>5</sup>; per l'analisi, offrendo allo studioso gli strumenti della modellazione avanzata per effettuare verifiche sulla natura e la qualità delle superfici degli oggetti<sup>6</sup>; per la disseminazione, permettendo la costruzione di modelli ottimizzati, ma scientificamente attendibili, da utilizzare per un uso nel *web*<sup>7</sup>.

Per ciò che attiene alla statuaria, questo approccio trova un suo immediato utilizzo per tutte quelle opere che risultano frammentarie in quanto consente di operare in digitale, e in anticipo rispetto alla realtà, mediante simulazioni: andando a definire, con estrema accuratezza, la posizione reciproca tra i frammenti anche attraverso piccole rototraslazioni di fatto impossibili da realizzare nella realtà; andando a completare eventuali porzioni mancanti per dare maggiore consistenza alle scelte di posizione dei vari pezzi; verificando ogni singola riconfigurazione di frammenti non solo da un punto di vista visuale ma anche geometrico, sottoponendo le superfici ad analisi specifiche per valutare la coerenza dei risultati.

Il presente contributo rientra nell'ambito dello studio dei processi di digitalizzazione della statuaria antica e si focalizza sull'individuazione di protocolli operativi per la costruzione e l'utilizzo di modelli digitali ad alta risoluzione o *digital twin*.

Nello specifico lo studio si concentra sulle attività che hanno visto come caso studio la statua ritratto *in formam Herculis* e verranno analizzate tutte le fasi di lavoro, dalla programmazione delle attività e acquisizione dati fino alla modellazione e analisi, dimostrando come sia possibile mettere le nuove tecnologie a servizio del processo di conoscenza della statuaria antica, integrando le tecniche del passato con quelle più innovative basate sugli strumenti offerti dall'ambiente digitale, e offrendo agli studiosi delle diverse discipline la possibilità di approcciare a questa tipologia di manufatti in maniera del tutto nuova.

## 2. OBIETTIVI DELLO STUDIO

Lo studio della statua-ritratto *in formam Herculis* ha avuto inizio subito dopo il ritrovamento della stessa, in una fase precedente al restauro, offrendo la rara possibilità di analizzare tutti i frammenti oggetto di ritrovamento prima di qualsiasi azione di ricomposizione e di procedere al lavoro in digitale in parallelo con le operazioni di restauro sul reale.

Proprio questo aspetto ha permesso la costruzione di un programma di attività molto articolato che in accordo con i Funzionari del Parco ha consentito la definizione dei seguenti obiettivi:

- documentare i frammenti con costruzione di modelli ad alta risoluzione (*Hi-Poly*);
- simulare la ricomposizione dei frammenti;
- documentare la statua ricomposta con costruzione di modello ad alta risoluzione (*Hi-Poly*);
- analizzare, con gli strumenti della modellazione digitale il risultato della ricomposizione reale valutando la qualità delle relazioni geometriche tra frammenti, validando scientificamente l'intera operazione;
- ottimizzare i modelli in alta risoluzione (*Hi-Poly*) per un utilizzo su piattaforma *web* mediante conversione in modelli a bassa risoluzione (*Low-Poly*).

---

<sup>3</sup> AGNOLI, SENATORE 2022.

<sup>4</sup> LIMONCELLI 2012.

<sup>5</sup> SENATORE 2023.

<sup>6</sup> RUSSO, SENATORE 2022.

<sup>7</sup> GUIDI *et al.* 2015.

L'applicazione del processo di digitalizzazione ha quindi seguito l'intero iter del restauro, in parte anticipandolo e in parte seguendolo, andando per prima cosa a documentare i singoli frammenti; per poi proporre una ricomposizione che fosse coerente da un punto di vista geometrico oltre che percettivo; validando infine il risultato della ricomposizione realizzata nella realtà sulla base delle analisi condotte delle superfici.

Ciò è stato reso possibile proprio grazie ad un sistema di conoscenza basato sul processo di digitalizzazione che ha alla base la costruzione di un rilievo ad alta risoluzione in grado di restituire con estrema accuratezza le caratteristiche formali dell'oggetto di studio. Dimostrando come oggi sia possibile costruire dei gemelli digitali che da un lato rappresentano una nuova e più accurata forma di documentazione, dall'altro la base dati dinamica per studi e ricerca da realizzare direttamente in digitale prima che sull'opera fisica, ampliando enormemente le possibilità di studio e ricerca.

### 3. RILIEVO E MODELLAZIONE

Il rilievo dei manufatti ha costituito la base per il raggiungimento di tutti gli obiettivi dello studio. L'operazione di rilievo è stata condotta applicando protocolli scientifici pianificati e validati dalle numerose ricerche sul campo realizzate nel corso degli anni all'interno del Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura della Sapienza di Roma.

Dopo un primo sopralluogo finalizzato alla conoscenza dei luoghi e delle opere, e una volta definiti gli obiettivi dello studio, si è proceduto alla stesura di un progetto di rilievo finalizzato alla definizione della strumentazione da utilizzare e delle modalità di acquisizione in grado di garantire una quantità di dati compatibile con gli obiettivi prefissati.

Tenuto conto della tipologia dei frammenti e delle richieste in termini di qualità del dato da utilizzare per la costruzione delle copie, la scelta dello strumento è ricaduta su di uno Scanner 3D a luce strutturata di tipo Handheld, iReal 2S della Scantech, in grado di acquisire la geometria delle superfici con accuratezza sub millimetrica nonché il dato colore.

Questa tipologia di strumenti permette di acquisire le superfici restituendole sotto forma di una nuvola ordinata e colorata di punti (*point cloud*) con una maglia predefinita che, considerando gli obiettivi dello studio, è stata impostata su di un passo pari a 0,5 x 0,5 millimetri.

Si è quindi proceduto alla scansione di tutti i frammenti nelle loro superfici accessibili che, da una prima analisi, risultavano sufficienti all'acquisizione di tutte le informazioni necessarie alla successiva fase di ricostruzione.

Particolare attenzione è stata dedicata alle zone di contatto tra i frammenti facilmente distinguibili dal confronto con gli originali e che, successivamente, avrebbero dovuto fornire una serie di informazioni necessarie al riposizionamento dei frammenti.

Il risultato di questa prima fase di lavoro è stata la realizzazione, in digitale, di un modello *point cloud* per ciascun frammento, con una copertura pressoché completa di tutte le superfici, ad esclusione di alcune zone marginali non raggiungibili dallo strumento. Dall'analisi dei dati queste zone molto limitate sono risultate ininfluenti nella costruzione del modello *point cloud* complessivo.

Successivamente alla costruzione del modello *point cloud* che ha riunito le diverse scansioni dei frammenti, si è proceduto ad una prima elaborazione del modello con la costruzione della superficie poligonale (*mesh*) in grado di meglio approssimare la *point cloud*. Analizzata la superficie ed effettuate operazioni di pulizia e di ottimizzazione, si è quindi proceduto alla texturizzazione della stessa con i dati cromatici rilevati in fase di acquisizione (*fig. 1*).



1. MODELLO *MESH* TEXTURIZZATO DELLA STATUA DI ERCOLE RICOMPOSTO (elaborazione Autore)

Il risultato delle diverse operazioni ha permesso la realizzazione dei seguenti modelli, ovvero di copie digitali di alto dettaglio o *digital twin* dei frammenti, di cui si riporta una denominazione schematica: basamento; braccio; clava alta; clava bassa; corpo; faretra; gamba destra; gamba sinistra.

L'applicazione del medesimo protocollo, con gli stessi parametri di qualità, ha consentito, una volta ricomposta la statua originale da parte del restauratore, la digitalizzazione della statua nella sua configurazione finale per ottenere, anche in questo caso, il suo gemello digitale.

#### 4. SUPPORTO AL RIMONTAGGIO

Costruite le copie digitali dei singoli frammenti, è stato possibile strutturare le diverse simulazioni all'interno del modellatore informatico che si è trasformato in un laboratorio di restauro per proporre una soluzione di rimontaggio geometricamente coerente, da mettere a servizio del restauratore.

I frammenti digitali sono stati riuniti in un unico ambiente digitale e, individuate le superfici di contatto fra i frammenti, si è operato attraverso singole rototraslazioni finalizzate a far combaciare i bordi di contatto delle superfici. Tenuto conto della qualità dei frammenti, della quasi perfetta corrispondenza tra le diverse parti, e soprattutto dell'assenza di lacune rilevanti in corrispondenza dei punti di contatto, è stato possibile realizzare una simulazione di riconfigurazione con un buon margine di attendibilità. Il modello così realizzato, rappresentato attraverso modelli bidimensionali, è stato messo a servizio del restauratore per le successive fasi di rimontaggio.

## 5. ANALISI E VERIFICHE DELLE SUPERFICI

Una volta ricomposta la statua da parte del restauratore si è proceduto all'acquisizione della stessa applicando il medesimo protocollo utilizzato per i frammenti.

Questa operazione è stata effettuata al fine di documentare la statua nella sua interezza ma anche per poter effettuare delle verifiche di tipo analitico finalizzate alla valutazione del lavoro di rimontaggio dei frammenti da un punto di vista geometrico. A questo scopo si è operato analizzando geometricamente gli attacchi tra i diversi frammenti per valutare le proprietà geometriche delle superfici limitrofe ed in particolare la "curvatura".

L'analisi è stata realizzata costruendo dei piani di sezione in corrispondenza delle linee di contatto tra i frammenti (in numero variabile in considerazione della complessità geometrica delle superfici) e successivamente sono state realizzate le spezzate intersezione tra i suddetti piani di sezioni e le superfici scultoree (figg. 2-6).

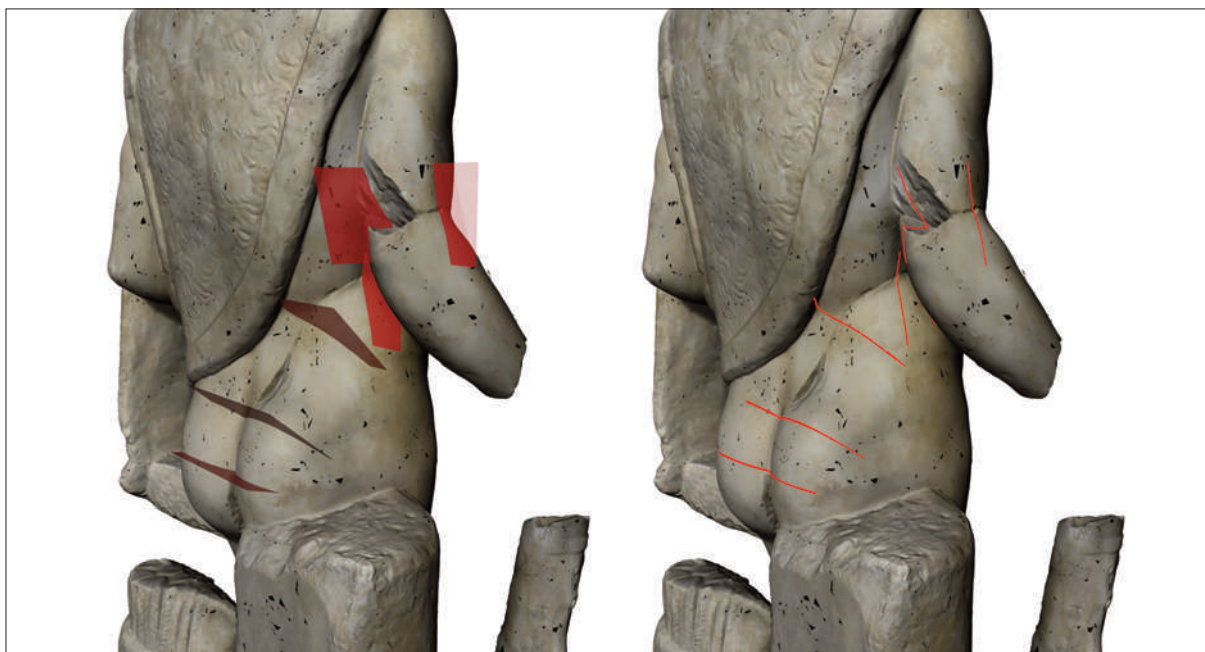


2. ANALISI DEI PUNTI DI CONTATTO (INDIVIDUAZIONE DEI PIANI DI TAGLIO E CREAZIONE DELLE SEZIONI IN PUNTI SIGNIFICATIVI PER CIASCUN ATTACCO (elaborazione Autore)

Queste sezioni sono state sottoposte ad analisi visiva e qualitativa, cercando di individuare la presenza di scalini o disallineamenti in corrispondenza delle linee di contatto che avrebbero evidenziato la presenza di problematiche di montaggio. Successivamente, al fine di valutare la correttezza geometrica della superficie, si è operata una verifica di "curvatura" sia sulle linee di sezione (spezzate) che sulle superfici (curvatura gaussiana): il presupposto della verifica era individuare eventuali interruzioni della continuità di curvatura, caratteristica che non si addice ai corpi organici, ovvero con il soggetto della scultura in esame.

Per valutare la presenza di continuità di curvatura, ciascuna sezione, costituita da una spezzata di segmenti rettilinei, è stata convertita in una curva di interpolazione tra i punti componenti la spezzata. La curva è stata quindi sottoposta ad analisi per verificare la presenza di punti di discontinuità nella curvatura in grado di rivelare la presenza di scalini generati da un rimontaggio di frammenti non coerenti con la tipologia di oggetto.

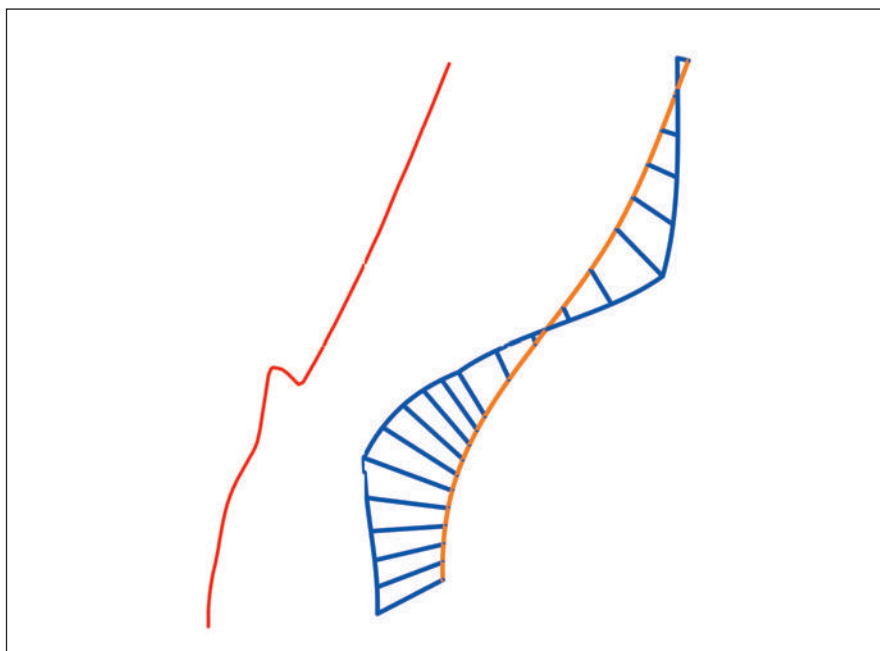




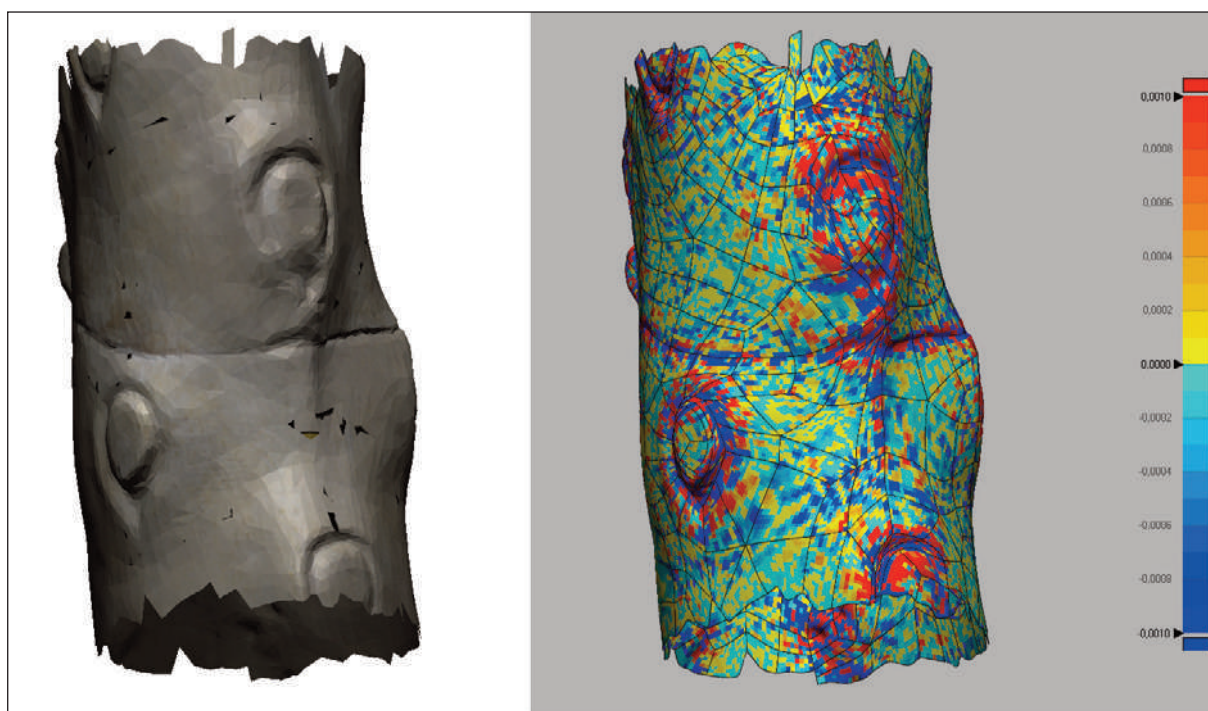
3. DETTAGLIO DEI PIANI DI TAGLIO E DELLE RELATIVE SEZIONI (in rosso) (elaborazione Autore)



4. DETTAGLIO RELATIVO ALL'ANALISI DELLE SEZIONI (elaborazione Autore)

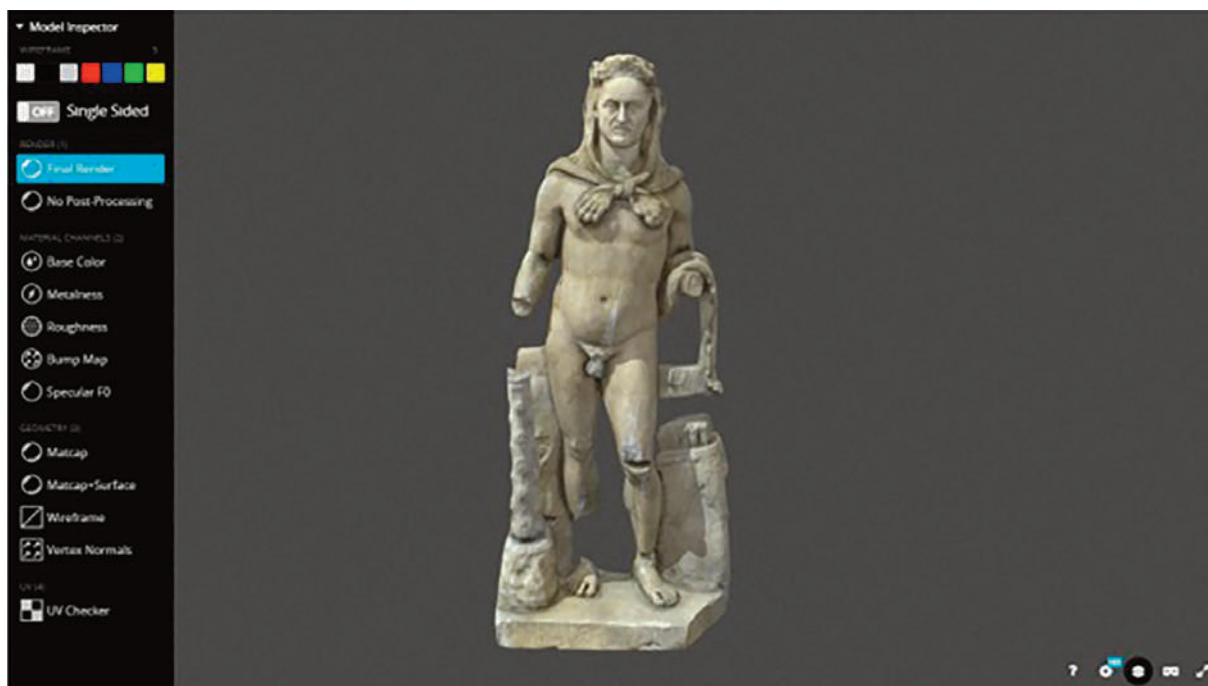


5. ANALISI DI CURVATURA GEOMETRICA DELLA SEZIONE (elaborazione Autore)



6. ANALISI DELLE SUPERFICI: ANALISI DELLA CURVATURA GAUSSIANA DEL MODELLO NURBS REALIZZATO SULLA BASE DEI DATI DI RILIEVO (elaborazione Autore)

Oltre alle linee di sezione sono state eseguite alcune sperimentazioni andando ad operare direttamente sulle superfici. Anche in questo caso l'analisi ha riguardato la curvatura gaussiana, dato che qualifica l'andamento della curvatura di una superficie mettendo in evidenza la presenza di eventuali incoerenze o punti di discontinuità.



7. INTERFACCIA DELLA PIATTAFORMA WEB SKETCHFAB.COM CHE CONSENTE LA VISIONE INTERATTIVA DEL MODELLO (elaborazione Autore)

Per l'ottenimento di questo obiettivo si è operato applicando due tipologie di analisi, una qualitativa e una quantitativa. La prima analisi di tipo qualitativo è stata realizzata applicando alla superficie selezionate un algoritmo di *Environment Map* finalizzato all'individuazione di punti di discontinuità di curvatura, non compatibili con un corpo organico.

Successivamente si è proceduto con un'analisi quantitativa che per essere realizzata ha richiesto una serie di trasformazioni della superficie da *mesh* (discreta), ottenuta dal rilievo, in superficie Nurbs (continua) attraverso un'operazione di *reverse modelling* (fig. 6).

Una volta ottenuta, per ciascun attacco, la nuova superficie si è operata un'analisi di curvatura gaussiana per valutare la presenza di cambi improvvisi di curvatura in corrispondenza delle linee di contatto tra i frammenti e valutarne quantitativamente la consistenza.

## 6. DISSEMINAZIONE WEB

Per ciò che attiene alla disseminazione, il dato digitale acquisito è stato messo a servizio per un suo immediato utilizzo all'interno di una piattaforma *web* dedicata.

La problematica insita in questa tipologia di procedura riguarda la necessità di semplificazione imposta dalla rete. Per ottenere questo risultato, il modello della statua è stato semplificato geometricamente attraverso l'applicazione di una serie di filtri che agiscono direttamente sulla superficie *mesh*, andando a semplificare il modello di una quantità significativa. In effetti, tenuto conto della dimensione del modello originale (*Hi-Poly*), il modello per il *web* (*Low-Poly*) ha richiesto una semplificazione superiore al 98 %.

Una volta semplificato il modello *mesh*, è stato possibile applicare nuovamente le *texture* acquisite in fase di rilevamento al fine di ottenere un risultato coerente e verosimile dell'oggetto.

Al fine di valutare l'attendibilità del modello con un livello così alto di semplificazione, si è proceduto attraverso un confronto geometrico tra il modello *Hi-Poly* ottenuto dal rilievo e il modello *Low-Poly* per valutare in quale maniera si fosse distribuita la semplificazione.



Benché consapevoli delle evidenti differenze tra i due modelli il risultato è stato confortante da un punto di vista geometrico, con differenze considerevoli individuabili in particolare nelle zone di maggiore dettaglio mentre una buona corrispondenza era individuabile nelle porzioni lisce di superficie. In aggiunta a queste considerazioni di tipo geometrico è necessario considerare l'importanza ricoperta dall'immagine nei processi di visualizzazione dinamica interattiva: anche in questo caso l'immagine utilizzata per la *texture* ha dimostrato di essere in grado di sopperire alla mancanza di informazione geometrica in virtù del suo essere portatrice di informazioni legate al chiaroscuro che caratterizza proprio le zone che soffrono maggiormente le semplificazioni geometriche e che invece tornano ad essere percepite con tutta la loro complessità proprio grazie alla presenza del dato colore anche su modelli geometricamente semplificati (*fig. 7*).

## 7. CONCLUSIONI

Tra le sfide del prossimo futuro c'è certamente l'individuazione di strategie che migliorino la conoscenza e la valorizzazione dei beni culturali sfruttando i processi di digitalizzazione. Lo studio con soggetto la statua-ritratto *in formam Herculis* aveva la finalità di valutare alcune possibilità di valorizzazione dei beni culturali proponendo una strategia non solo di acquisizione dati per la costruzione di una copia, ma possibili tecniche operative e di analisi per migliorare la conoscenza dell'oggetto sfruttando il gemello digitale come riferimento. I risultati qui presentati hanno dimostrato come i processi basati sulla digitalizzazione, se pianificati e gestiti attraverso un approccio scientifico, siano in grado di costituirsi come ausilio reale per coloro che operano nell'ambito dei beni culturali e del restauro.

Nello stesso tempo la possibilità di strumenti che operano sul controllo della forma dimostra come si possano applicare tipologie di analisi tradizionalmente appannaggio della meccanica anche su beni culturali, a tutto vantaggio del rispetto e della valorizzazione degli stessi. Più in generale, lo studio ha evidenziato come operando un processo di rilievo di alto dettaglio, e sfruttando gli strumenti propri del digitale, sia possibile simulare, con estrema attendibilità, azioni che coinvolgono le superfici dell'oggetto talvolta impossibili nella realtà.

Il processo di digitalizzazione ha in sintesi dimostrato la sua efficacia, in un ambito ancora da indagare, e dove le strategie messe in atto nel caso specifico rappresentano solo le prime sperimentazioni di procedure che potranno rinnovare in maniera sostanziale l'intero approccio ai beni culturali. Viviamo in un mondo dove reale e digitale si confondono e talvolta si sovrappongono. Come in questo caso, dove lo studio ha dimostrato come sia possibile confrontarsi con entrambi i gemelli, sia quello fisico che quello virtuale, in un passaggio che si fa sempre più labile ma che è in grado di contribuire alla costruzione di un nuovo sistema di conoscenza, di tipo ibrido, ma che per quanto sperimentato già dimostra il suo essere a tutto vantaggio nella valorizzazione del bene culturale.

\*Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura  
Sapienza Università di Roma  
[luca.senatore@uniroma1.it](mailto:luca.senatore@uniroma1.it)

## Bibliografia

AGNOLI, SENATORE 2022: N. AGNOLI, L.J. SENATORE, “Memorie dall’Esquilino. Due statue ricomposte dagli *Horti Lamiani*”, in *BCom123*, 2022, pp. 193-208.

GEORGOPOULOS, STATHOPOULOU 2017: A. GEORGOPOULOS, E.K. STATHOPOULOU, “Data Acquisition for 3D Geometric Recording: State of the Art and Recent Innovations”, in M. VINCENT, V. LÓPEZ-MENCHERO BENDICHO, M. IOANNIDES, T. LEVY (a cura di), *Heritage and Archaeology in the Digital Age. Quantitative Methods in the Humanities and Social Sciences* ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-65370-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65370-9_1); ultimo accesso 24 aprile 2024).

GUIDI *et al.* 2015: G. GUIDI, S. GONIZZI BARSANTI, L.L. MICOLI, M. RUSSO, “Massive 3D Digitization of Museum Contents”, in L. Toniolo, M. Boriani, G. Guidi (a cura di), *Built Heritage: Monitoring Conservation Management*, pp. 335-346 ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-08533-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08533-3_28); ultimo accesso 24 aprile 2024).

LIMONCELLI 2012: M. LIMONCELLI, *Il restauro virtuale in archeologia*, Roma.

RUSSO, SENATORE 2022: M. RUSSO, L.J. SENATORE, “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*, vol. XLVIII-2/W1-2022 (Atti del Convegno ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing; 7<sup>th</sup> International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications; 2022), Würzburg, pp. 229-236 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-229-2022>).

SENATORE 2023: L.J. SENATORE, “Il rilievo e la modellazione per il restauro della statuaria antica”, in T. EMLER, A. CALDARONE, A. FUSINETTI (a cura di), *3d Modeling & BIM 2023 Soluzioni per il Cultural Heritage*, Roma, pp. 198-213.

SENATORE, WIELICH 2022: L.J. SENATORE, B. WIELICH, “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 Convegno DAI; Genova 2022), pp. 716-729.