

Ritratto di Cosimo I de' Medici di Clemente e Baccio Bandinelli: ragioni e modi di una copia

Grazia TUCCI, Alessandro CONTI, Lidia FIORINI, Daniele GUERRINI

SOMMARIO

Oggi confrontarsi con la copia di opere d'arte implica nuovi paradigmi che, sebbene richiamino i concetti espressi da Benjamin¹ nel suo "L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica", vengono ancora rivisitati di fronte ad un diverso registro percettivo rispetto al passato.

Salvatore Settis, curatore di due importanti mostre² sul tema evidenzia come alla perdita dell'aura e della ritualità proprie dell'originale fa da contraltare "l'esuberanza tecnologica" con i suoi strumenti innovativi che modificano i tradizionali approcci ai concetti di proprietà, condivisione, valorizzazione e comunicazione dei manufatti artistici. Questo avviene soprattutto se si pone l'accento sullo straordinario processo di copia attraverso l'acquisizione dall'originale con un "calco" digitale e la ri-produzione realizzata con tecniche additive o sottrattive, senza dimenticare le nuove possibilità offerte da esplorazioni virtuali attraverso visori 3D, datagloves e sistemi aptici.

È un processo con cui ci si deve misurare per produrre "copie" che siano espressione del nostro tempo, utilizzando tecniche mutuare dal settore industriale ma che trovano riscontro nei principi di base degli antichi procedimenti artigianali.

ABSTRACT

Today, engaging with the replication of works of art involves new paradigms that, although reminiscent of the concepts expressed by Benjamin¹ in his "The Work of Art in the Age of Mechanical Reproduction," are still revisited in light of a different perceptual register compared to the past.

Salvatore Settis, curator of two important exhibitions² on the subject, highlights how the loss of aura and ritual inherent in the original is counterbalanced by "technological exuberance," with its innovative tools that alter traditional approaches to the concepts of ownership, sharing, valorization, and communication of artistic artifacts.

This is particularly true when focusing on the extraordinary process of replication through digital "molding" from the original and re-production using additive or subtractive techniques, not to mention the new possibilities offered by virtual explorations through 3D viewers, datagloves, and haptic systems.

It is a process that must be contended with to produce "copies" that are expressions of our time, using techniques borrowed from the industrial sector but rooted in the fundamental principles of ancient artisanal processes.

INTRODUZIONE

Il dibattito sulle copie ha radici profonde né questa è la sede per illustrarne i contenuti. Tuttavia, proviamo a ripercorrere alcuni passaggi salienti che possano inquadrare la realizzazione della copia del busto di Cosimo I di Baccio e Clemente Bandinelli, grazie alle nuove tecnologie oggi disponibili, in una breve analisi retrospettiva.

È opinione diffusa che l'artista sia un genio che segue solo le proprie intuizioni rompendo con ogni regola del passato e che quindi le copie, anche quando non sono dei veri e propri falsi, sarebbero prive di valore artistico.

In realtà questa idea è nata solo a partire dall'Ottocento, mentre sin dall'antichità greco-romana il riferimento consapevole a una invenzione figurativa preesistente era tenuto in gran considerazione, così come ora siamo in grado al cinema di apprezzare e distinguere tra una citazione, un remake o un reboot di un precedente film.

Per Platone, l'arte che imita la natura ha un valore negativo in quanto distrae dalla contemplazione delle idee.

Secondo Aristotele invece l'imitazione artistica è migliorare la natura per mezzo dell'azione umana. La rielaborazione dei capolavori del passato è quindi superiore all'imitazione della natura perché tende alla ricerca di modelli ideali.

Da un punto di vista più prosaico, la diffusione di copie, repliche, varianti, reinvenzioni di modelli formali e repertori figurativi derivava sicuramente anche da una grande maestria e pratica artigianale (le grandi sculture erano prodotte da botteghe che tendevano a riutilizzare elementi già esistenti) oltre che da una committenza che le ordinava per motivi devozionali o per puro collezionismo.

A partire dal Rinascimento la realizzazione di copie fu ritenuta la diretta continuazione dell'alta manifattura che aveva prodotto i capolavori del mondo greco-romano e non a caso la copia è stato lo strumento privilegiato della formazione nelle accademie d'arte almeno fino all'inizio del XX secolo.

Se è abbastanza intuitivo come un bravo artista possa copiare un quadro, è più difficile immaginare come replicare una statua o un'opera tridimensionale.

Fino a tempi recenti, i due metodi più diffusi erano gli stessi già utilizzati nel mondo classico.

L'invenzione del calco (Figura 1) è attribuita al grande scultore Lisippo: l'originale, per lo più in bronzo, era racchiuso in una cassaforma in cui era colato gesso liquido o, più recentemente, gomma siliconica. In questo modo si otteneva un negativo da cui, ripetendo l'operazione, potevano essere prodotte nuove copie in positivo, anche in modo seriale.



Figura 1. Per la realizzazione di un calco in gesso si riveste l'originale con una sostanza protettiva e si cola il gesso liquido in una cassaforma ottenendo una forma negativa. Da: <https://www.didatticarte.it/Blog/?p=3904>

Un metodo diverso, utilizzato soprattutto per eseguire copie in marmo, è basato sulla creazione di due identici sistemi di riferimento tridimensionali intorno all'originale e al blocco di pietra da scolpire (Figura 2). Le coordinate dei punti principali delle sculture erano misurate con fili a piombo, compassi, pantografi o altri ingegnosi sistemi (come il “finitorium” inventato da Leon Battista Alberti) (Figura 3) e riportati trapanando il blocco da scolpire fino alla profondità misurata. A partire da pochi punti di riferimento, lo scultore toglieva la pietra in eccesso ricavando un modello grezzo ma con le proporzioni desiderate, poi procedeva alle finiture.

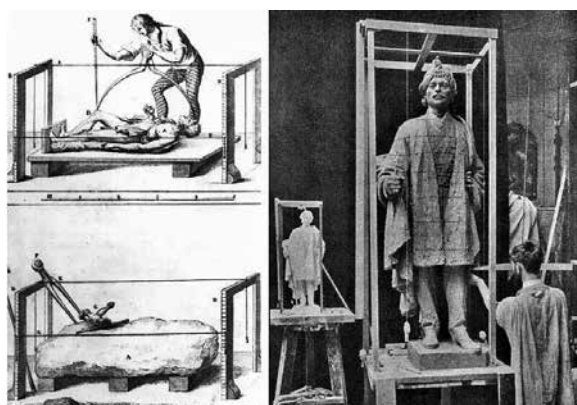


Figura 2. Un esempio di telaio metrato, il sistema usato da Canova per riprodurre in marmo il bozzetto in gesso. Da: <https://www.didatticarte.it/Blog/?p=3904>

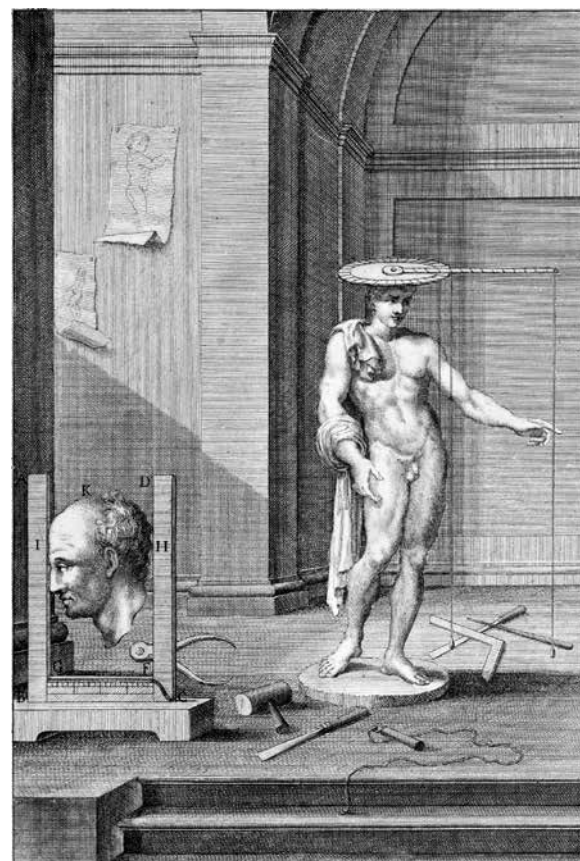


Figura 3. Il finitorium di Leon Battista Alberti. Pio Panfilì, Public domain, da Wikimedia Commons



Figura 4. Esempio di utilizzo del pantografo. Da: <https://www.galleriabazzanti.it/replica-david-michelangelo/>

A differenza del calco, con il metodo del riporto di punti si potevano eseguire anche copie in scala maggiore o minore dell'originale, quindi era il metodo utilizzato anche per passare dai bozzetti alle opere definitive (Figura 4).

Oggi ai sensi dell'art. 107, comma 2, del Codice dei beni culturali³, per evitare rischi alle opere d'arte “è di regola vietata la riproduzione di beni culturali che consista nel trarre calchi, per contatto, dagli originali delle opere di scultura e di opere a rilievo”.

Per questo motivo le tecniche digitali di misura non a contatto sono sempre più applicate anche al campo della documentazione e replica delle opere scultoree.

Come descritto in precedenza, le copie venivano eseguite utilizzando misure di un numero (ridotto) di punti caratteristici e ben riconoscibili sull'originale (Figura 5). Oggi, la possibilità di ricorrere alle tecnologie digitali consente di aumentare enormemente il numero di punti misurati (e quindi di evitare la fase soggettiva di interpolazione), di fornire le suddette misurazioni senza contatto, in modo automatico e, non ultimo, in tempi significativamente ridotti. Gli odierni sistemi digitali (con sensori attivi e passivi), misurano quindi automaticamente, e con grande accuratezza, tanti punti molto ravvicinati su tutta la superficie dell'opera da riprodurre (Figura 6). Alcuni sistemi di misura, inoltre, registrano non solo le coordinate tridimensionali ma anche il colore di ciascun punto misurato e quindi i modelli che ne derivano possono essere fedeli sia alla geometria che al colore dell'originale.



Figura 5. Bozzetto di Lorenzo Bartolini (Galleria dell'Accademia di Firenze): si osservano i "repere" utilizzati per la riproduzione. L'artista è in grado di riprodurre l'opera a partire da pochi punti noti.



Figura 6. Modello di punti del busto di Cosimo ottenuto da un rilievo fotogrammetrico: la numerosità di punti che, a differenza della immagine precedente, descrive la forma con maggiore dettaglio consente la riproduzione automatica.

UNA STATUA A RISCHIO

Se pure la sostituzione con copie può ancora suscitare dibattiti sulla autenticità e sull'esperienza estetica dell'opera d'arte, è sempre più considerata una misura necessaria per proteggere il patrimonio culturale per le generazioni future. Anche se non ci sono regole esplicite riguardo l'impiego delle copie per salvare gli originali, le decisioni relative all'uso di copie per la conservazione del patrimonio culturale dipendono da una combinazione di normative internazionali, linee guida professionali e regolamenti nazionali. Ad esempio, l'ICOM (International Council of Museums) ha elaborato il "Codice etico per i musei"⁴, che contiene principi per la gestione e la conservazione delle collezioni museali. Sebbene non sia specificamente menzionato il concetto di copie per la conservazione degli originali, il codice sottolinea l'importanza della conservazione preventiva e della salvaguardia del patrimonio culturale per le generazioni future. Allo stesso modo, l'ICCROM (International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property) e l'UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) forniscono linee guida e raccomandazioni per la conservazione del patrimonio culturale mondiale, che possono includere approcci alla protezione degli originali attraverso la creazione di copie.

Il tema della copia è stato affrontato con un ampio dibattito nel corso di una conferenza tenutasi a Palazzo Ducale nel maggio 1999, organizzata dal conservatore Toto Bergamo Rossi e da Anne Markham Schulz, (stimata studiosa della scultura italiana del rinascimento), quando si lamentava l'assenza di adeguate misure di salvaguardia per quelle sculture che adornavano facciate di edifici pubblici e chiese di Venezia, esposte agli effetti erosivi del vento e della pioggia acida. Allora, secondo la dottoressa Schulz, le opinioni contrarie alla rimozione, erano il prodotto di un'ossessione del XX secolo per l'originalità: "La nostra svalutazione delle copie è condizionata storicamente dalla proliferazione moderna delle copie. Al contrario, i conoscitori del Rinascimento erano felici di acquistare copie. Per quanto riguarda l'antichità, non sapremmo nulla della scultura greca se non fosse per le copie romane"⁵. Nel numero 191 del *Giornale dell'arte*, Giorgio Bonsanti⁶ dichiara di essere tra i sostenitori di misure di salvaguardia che si avvalgono del "ricovero al chiuso delle sculture esterne (e la sostituzione con repliche), spesso l'unico modo di affrontare il problema del degrado", pur riconoscendo che ciò non vale indiscriminatamente per tutti i casi. D'altra parte, proprio a Firenze ciò si colloca in continuità con una tradizione in tal senso, dal David di Michelangelo ai rilievi e alle statue del Campanile di Giotto, dalla Giuditta di Donatello alle statue di Orsanmichele e alla Porta del Paradiso del Ghiberti⁷.

A distanza di oltre 30 anni, la sostituzione delle sculture originali con copie a fini protettivi è una prassi consolidata in contesti ove le opere d'arte sono esposte a condizioni ambientali estreme. Tali rischi, riferiti in particolare alle opere in marmo, bronzi e terracotta, comprendono l'esposizione a cicli di caldo e freddo, gelo e disgelo, umidità e altri agenti atmosferici capaci di danneggiare irreparabilmente le opere originali. La Strategia nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici⁸ adottata in Italia nel 2015, il cui strumento operativo è il "Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici"⁹ ha evidenziato il ruolo predominante dell'acqua come il principale fattore ambientale che provoca degrado a strutture e materiali dei beni culturali. La maggiore frequenza di piogge di grande intensità può provocare danni significativi al patrimonio, accelerando il deterioramento delle strutture e delle superfici, in particolare quelle formate da carbonato di calcio, come il marmo. L'assorbimento dell'umidità causa opacità del marmo, favorisce la formazione di macchie causate dai sali, lo sgretolamento della superficie e i distacchi, come indicato da studi previsionali sulla dissoluzione dei materiali lapidei carbonatici dovuti in prevalenza ai cambiamenti climatici, alle precipitazioni e all'aumento della concentrazione atmosferica di CO₂^{10,11}. Gli estremi termici possono provocare dilatazione e contrazione dei materiali, generando crepe e rotture. Il fenomeno del gelo e disgelo può causare danni ancor più severi, portando a fratture e sfaldamenti delle superfici.

Se quindi, come afferma Giorgio Bonsanti "l'allontanamento di un'opera d'arte dalla sua collocazione d'origine non è certo motivo di soddisfazione per nessuno", di fronte a fenomeni naturali "ineliminabili" la creazione di copie per la sostituzione permette di preservare l'integrità delle opere d'arte originali, consentendo loro di essere esposte al pubblico nella collocazione originaria senza il rischio di danni irreversibili. D'altra parte, la copia, in questi casi, non ha certo finalità di contraffazione ma di memoria storica e di contestualizzazione scenografica e ambientale. Tuttavia, è fondamentale che le copie siano eseguite con cura e precisione; già nel 2002 Giorgio Accardo presentava la pluriennale esperienza dell'ICR nell'uso di modelli digitali 3D per la scultura¹² sia "per studiare le forme che le statue materializzano, e per sviluppare le soluzioni più adatte ai relativi problemi di documentazione, restauro e conservazione (...) che per costruire modelli fisici nella scala dimensionale desiderata (...) o realizzare un modello conforme all'originale dell'intera statua o delle sole parti perdute", sottolineando così le molteplici funzioni del processo di digitalizzazione, oggi assunto a piano nazionale¹³ oltre che tema di spicco a livello internazionale per una politica culturale volta alla salvaguardia del patrimonio.¹⁴

IL CALCO DIGITALE DELL'OPERA

Attualmente, nessuna copia può rappresentare completamente tutti i dettagli dell'originale e nel settore del merchandising museale abbondano riproduzioni grossolane e di pessima fattura.

Le stampanti 3D¹⁵, pur offrendo una flessibilità e una capacità di personalizzazione eccezionali, presentano ancora limiti significativi nella resa dei dettagli fini e nella gestione dell'effetto scalettatura. La dimensione degli ugelli e la precisione del movimento della testina di stampa influiscono su risoluzione e qualità dei dettagli, e l'effetto scalettatura richiede fasi di post-produzione che possono introdurre imperfezioni. Sebbene il progresso tecnologico e l'innovazione nei materiali e nei metodi di stampa potranno mitigare questi problemi nel tempo, attualmente rappresentano sfide rilevanti da considerare in fase di progettazione e produzione. Anche le frese 3D, o macchine per la fresatura CNC (Computer Numeric Control), pur essendo strumenti potenti e versatili, presentano limitazioni nella riproduzione di superfici complesse: sottosquadri e dettagli profondi potrebbero richiedere riposizionamenti multipli del pezzo, e gli utensili da taglio hanno un diametro minimo sotto il quale non è possibile scendere, aumentando in modo significativo i tempi necessari per le operazioni di sgrossatura e finitura. A ciò si aggiungono le necessarie competenze tecniche per la programmazione, la simulazione e l'ottimizzazione dei percorsi utensile. (Figure 7A e 7B)

Questo non vuol dire che non siano stati fatti progressi rilevanti nella riproduzione della forma di superfici complesse. Tuttavia è la digitalizzazione 3D, fase imprescindibile per la documentazione e lo studio ma anche preliminare alla realizzazione delle copie, che permette di colmare in modo più accurato il divario tra un'opera d'arte e la sua replica fisica; il modello numerico, infatti, fornisce la rappresentazione più fedele all'originale e pertanto diviene doveroso cogliere l'occasione, anche nel caso la finalità sia quella della riproduzione di opere d'arte, per definire metodologie e flussi di lavoro in grado di garantire il miglior risultato possibile nella fase di acquisizione dei dati. Il risultato, infatti, può essere considerato un vero e proprio "calco digitale". Sarà quest'ultimo a costituire il nuovo "patrimonio digitale" del quale dobbiamo essere in grado di garantire sia la qualità che la durata nel tempo, temi entrambi di grande attualità^{16,17}.

Tra le tecniche più diffuse per l'acquisizione dei dati 3D sono da ascrivere due metodologie che, al netto delle varie declinazioni tecnologiche, possono essere classificate come fotogrammetria (oggi SfM, Structure from Motion) e scansione 3D; entrambe permettono di eseguire misure senza contatto con l'oggetto e quindi garantiscono la massima sicurezza nella digitalizzazione di opere d'arte. La scansione 3D utilizza dispositivi specializzati, come scanner laser o a luce strutturata, per rilevare direttamente le coordinate spaziali degli oggetti. La fotogrammetria SfM



Figura 7A e 7B. Testa di un profeta (Opera del Duomo di Firenze). Differenti fasi di lavorazione con frese progressivamente più sottili.

utilizza, invece, immagini fotografiche da diverse angolazioni e ricostruisce la posizione tridimensionale dei punti della superficie esplorata attraverso algoritmi di corrispondenza; entrambe le metodologie generano un modello tridimensionale nel quale ad una maggiore densità di punti (ovvero una maggiore risoluzione) corrisponde una migliore descrizione dei dettagli.

PROGETTAZIONE E PROCESSO DI PRODUZIONE DEL MODELLO DIGITALE

La digitalizzazione del busto di Cosimo e della sua base è stata realizzata attraverso fotogrammetria e si è rivelata impegnativa, sia per raggiungere la restituzione del dettaglio necessario e la completezza della geometria, sia per consentire una documentazione accurata del loro stato di conservazione. Il busto e la base sono in marmo. I Bandinelli, padre e figlio, vollero realizzare il busto alla maniera dei ritratti imperiali, curando con grande attenzione non solo l'espressione del volto, ma anche la riproduzione dei minuti dettagli della corazza con squame metalliche e finiture in cuoio. Le due parti dell'opera erano scolpite per essere montate sulla facciata di un edificio¹⁸. La base, infatti, era progettata per essere incastrata stabilmente nella muratura. Il busto invece presenta sul retro un incavo in sottosquadro (Figura 8) con finitura uniforme e priva di dettagli. In esso si trova un



Figura 8. Modello di superficie del busto di Cosimo. Vista lato posteriore con sottosquadro e anello di aggancio alla facciata.

occhiello in metallo che permette l'ancoraggio alla parete per assicurare la stabilità della statua. L'esposizione agli agenti atmosferici ha notevolmente deteriorato il marmo, rendendolo opaco e generando macchie sulla superficie. Le spalle mostrano evidenti segni di erosione, mentre il volto presenta piccoli fori e diverse lacune superficiali, soprattutto sul naso e sulle sopracciglia.

PREPARAZIONE DEL SET E ACQUISIZIONE

Le acquisizioni sono state realizzate direttamente presso il laboratorio Fedeli, dove il busto originale, con la sua base, erano conservati per le operazioni di restauro. Questo ha permesso l'utilizzo di un carroponte per la movimentazione delle sculture e per la loro collocazione in un luogo idoneo per garantire una distanza di presa costante.

L'inserimento di "scale bar" per la misurazione e il controllo, insieme al "color checker" per assicurare una corrispondenza cromatica affidabile, ha completato il set per le acquisizioni fotogrammetriche.

Le condizioni e i dati di acquisizione sono riassunti in tabella: la messa a fuoco è stata impostata come fissa, con ISO 400, e si è scelta la modalità di scatto con priorità di diaframma (f/8) per ottenere una buona profondità di campo.

L'illuminazione artificiale e disomogenea del laboratorio è stata compensata dall'uso di un flash. Le prese sono state eseguite muovendosi ad intervalli regolari intorno agli oggetti a diverse altezze, secondo uno schema radiale prefissato.

Le immagini sono state acquisite sia con asse ortogonale alle superfici, sia in direzione inclinata per inquadrare da più punti di vista anche le superfici in sottosquadro. Ogni punto delle opere è stato inquadrato infatti in almeno nove immagini secondo angolazioni diverse, assicurando le condizioni utili ad una efficace ricostruzione fotogrammetrica (Figura 9).

Elaborazioni

L'uso del "color checker" ha consentito di correggere la radiometria e il bilanciamento del bianco delle immagini in formato RAW, ottenendo una migliore fedeltà cromatica.

Sono stati eseguiti due modelli fotogrammetrici distinti per il busto e la base. La tecnica Structure from Motion permette di calcolare simultaneamente i punti di presa (orientamento esterno) e i parametri di distorsione della camera (orientamento interno). Il modello è stato messo in scala per mezzo della distanza tra i target a riconoscimento automatico presenti sulle scale bar. Sei scale bar sono state imposte come misure di vincolo e due sono state utilizzate come misure di controllo. L'errore è risultato mediamente inferiore a 2 mm per il busto e a 0.5 mm per la base.



Figura 9. Screenshot del modello fotogrammetrico con visualizzazione della posizione della camera al momento dello scatto.

Editing del modello mesh e preparazione del file di stampa

Per riprodurre il modello di punti (costituito da entità isolate) con una stampante 3D occorre trasformarlo in un “modello mesh”, ovvero una superficie continua composta da triangoli i cui lati collegano i punti più prossimi tra loro. I modelli mesh ottenuti sono stati elaborati chiudendo le lacune corrispondenti alle basi d'appoggio e verificando l'assenza di artefatti o errori topologici. (Figura 10)

Come sopra indicato, la risoluzione delle stampanti 3D attualmente disponibili non raggiunge ancora quella dei modelli numerici che si ottengono dal processo di digitalizzazione, quindi, il risultato finale dovrà essere semplificato attraverso una riduzione del numero di triangoli (decimazione) differenziando le varie parti del modello per non compromettere la qualità e, di conseguenza, la leggibilità dei dettagli.



Figura 10. Visualizzazione del modello mesh del busto di Cosimo in modalità wireframe, shaded e texture.

Tabella

Acquisizioni	05/07/2023
Persone sul campo	2
Macchina fotografica	SLR Nikon full frame D700, 12MP
Obiettivo	Nikkor lens 50mm 1.4G
8 Scale bar con 12 target	
Sw di elaborazione	Agisoft Metashape Professional v.1.8.2.0

Busto

Foto del busto	316
Distanza media di presa	0,88 m
GCP/Check points	6/2
Tie points	155,489
TP projections	479,462
GSD	0,141 mm/px
Modello mesh	2,183,645 triangoli

Base

Foto Base	281
Distanza media di presa	0,70 m
GCP/Check points	6/2
Tie points	106,185
TP projections	363,270
GSD	0,111 mm/px
Modello mesh	1,810,588 triangoli

STAMPA E FINITURA

Il modello digitale che deriva dall'acquisizione e successiva modellazione, costituisce l'input da cui viene avviata la riproduzione fisica. Per la stampa del busto di Cosimo e della sua base è stata impiegata la tecnologia FDM (Modellazione a Deposizione Fusa), che si basa su un principio additivo. Questa modalità prevede l'estrusione di un filamento termoplastico srotolato da una bobina; il filamento viene depositato strato dopo strato seguendo un percorso (slicing) tracciato automaticamente da un software che invia alla stampante un codice preparatorio in grado di posizionare correttamente l'ugello di stampa.

Considerata la collocazione finale all'aperto e per ridurre al minimo l'intervento manuale di finitura, che generalmente introduce elementi interpretativi, è stato realizzato un filamento speciale con acido polilattico, un polimero biodegradabile derivato dalla condensazione dell'acido lattico, caricato con un'alta percentuale di carbonato di calcio e additivato con un filtro anti-raggi ultravioletti. L'alta percentuale di carbonato di calcio ha conferito alla copia un aspetto più naturale riducendo il caratteristico effetto delle superfici di materiale sintetico.

Sia il busto che la base sono stati stampati con un ugello da 0,6 mm e un layering da 0,3 mm; la parete è stata eseguita con un doppio strato dello spessore di 3 mm.

Un elemento molto importante nella stampa è la progettazione dei supporti esterni e dei sostegni strutturali interni per eliminare i rischi di deformazione quando si raggiungono temperature elevate; l'interno del busto è stato rinforzato con un riempimento (infill) al 20%.

La fase di stampa ha richiesto quasi un mese di lavoro per la realizzazione di 8 pezzi. (Figura 11)

La scomposizione in pezzi si è resa necessaria in parte per le dimensioni della scultura (circa 70 x 45 x 90) e in parte per semplificare la post lavorazione.

A stampa ultimata, si è proceduto con il distacco di tutti i supporti esterni e l'assemblaggio dei vari pezzi, utilizzando perni in alluminio e resina poliuretanica da colata per consolidare l'unione.

La stampa 3D ha ridato "fisicità" al modello digitale ma ancora non era sufficiente per trasmettere l'emozione della materia e il pathos di una superficie modificata dal tempo. Per questo motivo, l'abilità artigianale nella trasformazione e rifinitura del prodotto stampato, anche se frutto della più avanzata tecnologia, rimane fondamentale. L'opera di esperti artigiani, ieri come oggi, è insostituibile e deve essere valorizzata, salvaguardata e diffusa come un patrimonio prezioso.

Il restauratore (Fedeli Restauri) ha eseguito la stuccatura e la lisciatura con frese e carta vetrata di diversa grammatura per ottenere una superficie liscia come



Figura 11. Alcuni elementi del busto e della base prima dell'assemblaggio.

quella marmorea. Su questa superficie è stata applicata una resina acrilica con funzione di aggrappante per facilitare l'aderenza dei colori utilizzati per la pigmentazione. La colorazione è stata eseguita con colori reversibili all'acqua miscelati con legante acrilico; i colori sono stati applicati su tutta la superficie della scultura mediante pennelli di diversa forma e dimensione imitando il marmo in tutte le sue sfumature. Nell'opera originale, infatti, il marmo presenta una colorazione particolarmente variegata con toni tendenti al giallo in alcune zone (Figura 12).

Il busto di Cosimo è quindi una "creazione collettiva" in cui tutte le competenze coinvolte - digitalizzazione, stampa, assemblaggio e finitura - diventano parte di un processo più ampio. La "copia" non solo assolve al suo compito di proteggere l'originale ma diventa anche occasione per una nuova narrazione, una palestra di invenzioni tecnologiche e confronto



Figura 12. Originale del busto di Cosimo (in secondo piano) e stampa (in primo piano) a confronto.

tra professionalità che si muovono tra innovazione e tradizione.

Il progetto di digitalizzazione e riproduzione fisica ha così permesso il raggiungimento di molteplici risultati:

- lo studio di un'opera del XVI secolo poco conosciuta eseguita da Baccio e Clemente Bandinelli,
- il ricovero di un'opera già degradata a causa dell'esposizione agli effetti degli agenti atmosferici, peraltro sempre più violenti,
- la creazione di un "gemello digitale" in grado non solo di documentare lo stato di conservazione in cui l'opera è pervenuta a noi ma anche di fornire un supporto alle modellazioni numeriche per la simulazione del comportamento strutturale e superficiale e quindi anche il supporto ad eventuali decisioni relative a come intervenire sugli originali,
- la produzione di un modello 3D ottimizzato per la realizzazione di repliche fisiche da ricollocare in situ al posto degli originali,
- lo studio della valutazione del comportamento fisico e materico delle repliche 3D esposte all'aperto^{19, 20}.

Un esempio di maggiore complessità e rilevanza dello stesso processo è quello eseguito dal laboratorio GeCo in occasione della riproduzione del David di Michelangelo per l'Expo 2020 a Dubai, una scultura iconica le cui dimensioni (di oltre 7 metri, compreso

il basamento) hanno rappresentato una sfida in ogni fase della riproduzione: dalla digitalizzazione, realizzata con sistemi provenienti dal mondo industriale (Divisione Commerciale Italia di Hexagon), alla stampa con un gel che polimerizza con luce ultravioletta (3D Venice <https://3d-venice.com/>), alla finitura con polvere di marmo realizzata da laboratori di restauro specializzati. Collocata quindi all'interno del Teatro della Memoria del Padiglione e visibile direttamente negli occhi ha rafforzato il suo ruolo per il quale sembra dire al mondo che non sarà la forza a sconfiggere Golia ma l'intelligenza dell'uomo^{21, 22, 23}.

DALLE REPLICHE FISICHE VERSO LA "CONTINUITÀ DIGITALE"²⁴

Le nuove sfide legate alla digitalizzazione spostano i problemi sulla gestione dei dati, i formati, l'aggiornamento e la loro conservazione nonché sulla visualizzazione, condivisione e, non ultimo, sui diritti d'uso e di trasmissione a terzi.

Presto le istituzioni pubbliche si troveranno a gestire una enorme quantità di dati digitali che consentiranno di amplificare enormemente l'accessibilità, aprendo scenari non ancora esplorati; ma perché ciò accada bisognerà pensare alle "cast courts"²⁵ del fu-

turo, che avranno più la connotazione di piattaforme digitali e stanze virtuali che non di luoghi fisici.

Il “calco digitale”, esito di un rilievo tridimensionale così come mostrato nei paragrafi precedenti, consente d'altra parte, di soddisfare esigenze differenti sia nell'ambito della conservazione dell'originale che della sua fruizione e divulgazione.

Per quanto riguarda il primo aspetto, quello della conoscenza, conservazione e manutenzione dell'originale, basti pensare agli studi condotti da numerosi gruppi di ricerca sulla possibilità di creare “gemelli digitali” su cui “stratificare” gli esiti di ricerche scientifiche e ai quali riferire tutti i dati necessari alla simulazione di comportamenti (strutturali e materici) a fronte di sollecitazioni sismiche e variazioni delle condizioni ambientali.

Sono possibili, a titolo esemplificativo, studi sulla esposizione della superficie della scultura alla deposizione di polvere e di altri contaminanti; una modellazione 3D consente l'accurato posizionamento di tutte le analisi effettuate sulla superficie e quindi mappature tematiche^{23,26} ad hoc. Studi strutturali consentono il calcolo del baricentro e delle sollecitazioni a cui sono sottoposte le varie parti della scultura. Un gemello digitale può evolversi fino a diventare una vera e propria replica digitale di risorse fisiche potenziali ed effettive di processi, sistemi e dispositivi che possono essere utilizzati per vari scopi.

Rispetto al paradigma dell'Industria 4.0 il concetto di digital twin rappresenta lo stato dell'arte. In questo modo si potrà fare riferimento a un modello di gestione evoluto di tutto ciò che è collegato all'opera. I vantaggi sono molteplici, a partire dalla possibilità di accedere facilmente ai dati provenienti da fonti diverse, aggregarli e visualizzarli attraverso un unico cruscotto centralizzato, sincronizzato e condiviso, potendo aggiungere informazioni contestuali, fino all'attivazione di processi di analisi dei dati e di monitoraggio tale per cui sarà possibile ragionare in modalità predittiva, affrontando i problemi prima ancora che questi si verifichino.

Sul fronte della fruizione dell'opera a fini educativi e divulgativi il panorama è decisamente in rapida evoluzione.

Quando ci si accosta alla questione della fruizione di opere plastiche si percepisce immediatamente il limite costituito da una riproduzione statica e frontale di una fotografia: ne deriva la necessità di acquisire la terza dimensione come frutto dell'esperienza visiva spazio-temporale dello spettatore.

Con i dati digitali si assiste ad un riversamento della cultura visiva su nuovi supporti elettronici e nuovi canali di diffusione e ad un cambiamento delle modalità con cui forma e sostanza delle opere vengono trasmesse.

Questo patrimonio attende di essere trasformato in linguaggio multimediale per la società della cono-

scenza; d'altra parte, il linguaggio multimediale è lo sbocco naturale per accedere a quegli aspetti dell'originale che sarebbero accessibili solo alla riproduzione. I modelli 3D sono, a differenza di quelli del passato, densi di informazioni e di connessioni reticolari; possiedono un plusvalore che deriva dalla possibilità di montaggio ipermediale, di costruzione sintattica dei nessi, dal mixaggio con altri elementi e dall'interazione con l'esterno.

Forse è giunta l'ora di riscrivere la “Convention for Promoting Universally Reproduction of Works of Art” (che Henry Cole, primo direttore del V&A, formulò nel 1867 al fine di perseguire lo scambio internazionale di copie, calchi in gesso dell'Ottocento, fotografie e chiaroscuri) per adeguarsi al mondo contemporaneo e accelerare il passaggio definitivo ad un futuro digitale attualmente ancora identificato come una fase di “transizione”.

1. Il saggio di Walter Benjamin, *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica* (1936), ci ha consegnato una delle prime riflessioni sul rapporto tra arte e sviluppo dei nuovi mezzi tecnici fotografici e cinematografici. L'opera d'arte, grazie alle nuove tecnologie, non si offre più come oggetto di contemplazione e, liberata dalla sua originaria collocazione nella sfera rituale, viene improvvisamente disponibile per una fruizione di massa.
2. *Serial / Portable Classic. The Greek Canon and Its Mutations*. Fondazione Prada Venezia, Ca' Corner della Regina, 9 maggio - 13 settembre 2015. Milano, Fondazione Prada, 9 maggio - 24 agosto 2015. A cura di Anna Anguissola e Salvatore Settis; Milano, 2015; ISBN 978-88-87029-61-1.
3. https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2002-07-08&atto.codiceRedazionale=002G0159&elenco30giorni=false
4. <https://www.icom-italia.org/codice-etico-icom/>
5. Linda Goddard, *How to save the stones of Venice?* The art Newspaper, 1 Maggio 2000.
6. Giorgio Bonsanti, *Copiate, copiate: qualcosa resterà*, Il giornale dell'arte, 191, Settembre 2000.
7. Loretta Dolcini, “Per Cagione della intemperanza dell'aria”. Copie e sostituzioni di sculture a Firenze dall'Ottocento a oggi, in *Sculture da conservare. Studi per una tecnologia dei calchi*. A cura di A. Giusti, Milano, Vallardi e Associati, 1990, pp. 14-87.
8. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, *Strategia Nazionale Di Adattamento Ai Cambiamenti Climatici*. Available online: https://www.mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/clima/documento_SNAC.pdf (accessed on 6 May 2024).
9. Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, *Piano Nazionale Di Adattamento Ai Cambiamenti Climatici*. Available online: <https://www.mase.gov.it/notizie/clima-approvato-il-piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici> (accessed on 3 May 2024).
10. Bonazza A., Messina P., Sabbioni C., Grossi C.M., Brimblecombe P. Mapping the Impact of Climate Change on Surface Recession of Carbonate Buildings in Europe. *Sci. Total Environ.* 2009, 407, 2039–2050.
11. Coletti C. Climate Change Threats to Stone Cultural Heritage: State of the Art of Quantitative Damage Functions and New Challenges for a Sustainable Future. *Heritage* 2024, 7, 3276–3290.

12. Giorgio Accardo, *Modelli digitali 3D per la scultura*, Bollettino ICR, Nuova Serie, 5, 2002.
13. Istituto Centrale per la Digitalizzazione del Patrimonio Culturale - Digital Library; Linee Guida per la Digitalizzazione del Patrimonio Culturale Versione 1.0. Giugno 2022. Available online: <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html> (accessed on 04 June 2024).
14. Commission Recommendation (EU) 2021/1970 of 10 November 2021 on a Common European Data Space for Cultural Heritage. 2021; pp. 5–16. Available online: <http://data.europa.eu/eli/reco/2021/1970/oj> (accessed on 9 May 2024).
15. Tucci G., Bonora V. From real to... "real". A review of geomatic and rapid prototyping techniques for solid modelling in cultural heritage field. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2011, XXXVIII-5/W16, 575-582.
16. https://www.unesco.it/wp-content/uploads/pdf/UploadCKEditor/carta_UNESCO_it.pdf
17. https://londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_it.pdf
18. Si veda l'articolo sulla storia dell'opera di Francesca e Tommaso Fedeli, in questo stesso numero.
19. Golubović Z., Bojović B., Kirin S., Milovanović A., Petrov L., Anđelković B., Sofrenić I. Effect of Aging on Tensile and Chemical Properties of Polylactic Acid and Polylactic Acid-Like Polymer Materials for Additive Manufacturing. *Polymers* 2024, 16, 1035.
20. Maraveas C., Kyrtopoulos I.V., Arvanitis K.G. Evaluation of the Viability of 3D Printing in Recycling Polymers. *Polymers* 2024, 16, 1104.
21. Tucci G., Betti M., Pizzo B. Lessons Learnt on 3D Printing Michelangelo's David Replica. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2023, 48, 1573-1579.
22. Tucci G., Conti A., Bonora V., Fiorini L., Pagliaricci G. Recording Michelangelo's David: Ultra-High Resolution 3D Scanning and Modeling for Digital and Physical Reproduction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2023, XLVIII-M-2-2023, 1581-1588.
23. Tucci G., Conti A., Fiorini L. The Mock-up of the "Ratto Delle Sabine" by Giambologna: Making and utilization of a 3D model. *ICONARP International Journal of Architecture and Planning* 2015, 2(2), 73-83.
24. Per continuità digitale si intende la capacità di garantire che i dati e le informazioni digitali rimangano accessibili, utilizzabili e comprensibili nel tempo, nonostante i cambiamenti tecnologici. Questo concetto è fondamentale per la preservazione a lungo termine di documenti digitali, archivi, e qualsiasi tipo di informazione memorizzata in formato digitale.
25. Le Cast Courts sono una sezione del Victoria and Albert Museum (V&A) di Londra, inaugurata nel 1873. Queste gallerie sono famose per la loro collezione di repliche in gesso di alcune delle più importanti sculture e architetture del mondo; furono create come risorsa educativa per artisti, studenti e il pubblico in generale. L'obiettivo era fornire accesso a riproduzioni di opere d'arte che altrimenti sarebbero state inaccessibili a causa della distanza o del costo di viaggio.
26. Apollonio F.I., Basilissi V., Bertacchi S., Callieri M., Catalano D., Celaschi F., Vai, E. (2017). Gestire e comunicare il progetto. In *Nettuno. La fontana: studio, progetto, restauro* (pp. 171-192). Bononia University Press.

Alessandro CONTI. Architetto libero professionista. Si occupa da sempre di rilievo e di restauro dei monumenti con particolare riferimento al restauro dell'Architettura Moderna. Dal 2010 collabora con il Laboratorio di Geomatica per l'Ambiente e la Conservazione dei Beni Culturali dell'Università degli Studi di Firenze. In collaborazione con il Laboratorio ha partecipato a progetti di ricerca e campagne di rilievo sia di ambito nazionale che internazionale.

Lidia FIORINI. Architetto, libero professionista. si occupa di acquisizione, gestione e modellazione 3d di dati spaziali per la conservazione e il restauro dei Beni Culturali. Collabora da diversi anni a campagne di rilievo architettonico ed archeologico in Italia ed all'estero partecipando alle attività svolte dal Laboratorio di Geomatica per l'Ambiente e la Conservazione dei Beni Culturali (GeCo – DICEA UNIFI). È membro ICOMOS, expert member CIPA-HD.

Daniele GUERRINI è un giovane imprenditore con oltre dieci anni di esperienza nel campo della digitalizzazione, modellazione e riproduzione 3D, applicata a settori eterogenei come gioielleria, meccanica, moda e beni culturali. È specializzato nella riproduzione fisica di oggetti, utilizzando principalmente tecnologie FDM (filamento) e SLA (resina). Ha partecipato a numerosi progetti di digitalizzazione e riproduzione nel settore dei beni culturali, tra cui la realizzazione di un sarcofa-

go per una mostra sugli Egizi a Firenze, la riproduzione fedele della croce di Nicola da Guardiagrele esposta in San Giovanni in Laterano (l'originale è conservato al Museo Lateranense), la replica del David di Michelangelo per l'Expo di Dubai e diverse riproduzioni tattili per il Museo Novecento di Firenze. Guerrini è anche docente di modellazione 3D presso aziende private e presso la MITA Academy.

Grazia TUCCI. Professore Ordinario di Geomatica all'Università degli Studi di Firenze. Ha coordinato la riproduzione, con stampa 3D, del David per l'Expo di Dubai, del Pugile a Riposo per la mostra Tota Italia in Cina e di una serie di opere del Museo del Novecento di Firenze per un progetto di inclusività nei Musei. Ha condotto importanti campagne di digitalizzazione 3D del patrimonio culturale in Italia e all'estero. Coordina il Progetto di rilevante interesse internazionale - Cultural Heritage Digitization And Reconstruction Legacy Expo 2020 Dubai. Coordina lo Spoke 7 "Protection and Conservation of Cultural Heritage against Climate Changes, Natural and Anthropogenic Risks" nel PE5_CHANGES. È vicepresidente dell'organizzazione internazionale CIPA Heritage documentation, È nel consiglio di direzione di Icomos Italia. Coordina il Curriculum Materiali e metodologie avanzate per la salvaguardia del patrimonio culturale: transizione ecologica e digitale per la mitigazione dei rischi antropici e naturali del Dottorato Nazionale in Heritage Science.