

L'EBE DI CANOVA: MODELLO DIGITALE E SVILUPPI APPLICATIVI

PRIMA PARTE

di Francesca De Crescenzo, Massimiliano Fantini Franco Persiani,
Valentina Virgilli, Nicola Santopuoli, Leonardo Seccia

In questo contributo sono descritti i principali aspetti di un articolato progetto di ricerca portato avanti dai laboratori CAILab e V-lab della Seconda Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna. Il progetto, tuttora in fase di sviluppo, è basato sul rilievo tridimensionale ad alta precisione, mediante diverse tecnologie a scansione laser, di una scultura di Antonio Canova, l'*Ebe* conservata a Forlì. Nella prima parte dell'articolo ci occuperemo della fase di rilievo, mentre nella seconda degli sviluppi applicativi.

Per cercare di contribuire a dare risposte alle complesse esigenze della tutela, conservazione e valorizzazione dei beni storico-artistici ed architettonici, la Seconda Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna (sede di Forlì), ha costituito da tre anni il *Laboratorio di Archeoingegneria CAILab*, che, insieme al Laboratorio di Realtà Virtuale e Simulazione V-lab, è impegnato in numerosi progetti riguardanti i Beni Culturali, soprattutto con riferimento a tre ambiti di ricerca ed applicazione:

- *Realtà Virtuale*: la progettazione e lo sviluppo di sistemi di realtà virtuale immersiva e semi-immersiva; l'utilizzo di tecniche di rilievo 3D (ad esempio, mediante *laser scanner*) e di prototipazione rapida;
- *Diagnostica*: l'uso di metodi diagnostici non distruttivi di tipo multispettrale (ad esempio, riflettografia e telefotometria, termografia, colorimetria e spettrofotometria);
- *Materiali innovativi*: la progettazione e lo sviluppo di dispositivi per il restauro basati su materiali di nuova concezione (ad esempio, sistemi *intelligenti* per il restauro di mosaici e la protezione di affreschi realizzati con *leghe a memoria di forma*).

Va sottolineato, inoltre, che CAILab e V-lab operano in sinergia, sia per gli aspetti scientifici che didattici, con molti altri enti e strutture di ricerca, in particolare con la Facoltà di Architettura Valle Giulia della Sapienza Università di Roma¹, in quanto solo una progettualità multidisciplinare può dare risposte efficaci nel medio e lungo periodo alla salvaguardia del patrimonio culturale per le attuali e future generazioni.

In occasione della mostra su Antonio Canova (1757-1822) presso i Musei San Domenico a Forlì (20 gennaio-21 giugno 2009) intitolata "Canova. L'ideale classico tra scultura e pittura", CAILab e V-lab hanno curato l'allestimento di due sale, nelle quali far conoscere ai visitatori alcuni dei propri contributi nel campo dei Beni Culturali. In particolare, due importanti opere del grande scultore di Possagno sono state oggetto di articolati progetti di ricerca, tuttora in corso di sviluppo: la statua dell'*Ebe* forlivese (1816-1817), di cui si parlerà sinteticamente in questo contributo (quarta opera di Canova con questo soggetto, personificazione della "bellezza rasserenatrice", eseguita



Figura 1 - *Ebe forlivese* di Canova nella sede della Pinacoteca Civica di Forlì prima del trasferimento nei Musei San Domenico.

per la contessa Veronica Guarini di Forlì, è stata trasferita nel gennaio 2009 ai Musei San Domenico dalla Pinacoteca Civica di Forlì e la *Stele funeraria in memoria di Domenico Manzoni* (1817-1818), che non è stato possibile portare in mostra dalla sua originaria collocazione all'interno della Chiesa della Trinità a Forlì.

Inoltre, occorre sottolineare che la statua di Ebe qui esaminata (figura 1), è stata oggetto di vari interventi di restauro ed è attentamente monitorata con indagini periodiche², al fine di tenere sotto costante controllo l'evoluzione del suo stato conservativo (ad esempio, con riferimento ad alcune fessurazioni, di cui una nella parte superiore della schiena), che attualmente risulta buono.

REALIZZAZIONE DEL MODELLO DIGITALE

Un primo studio di fattibilità per l'applicazione di tecnologie avanzate di rilievo, prototipazione e realtà virtuale sull'*Ebe forlivese* di Canova è stato condotto nel novembre 2006 insieme al DIAPReM (*Development of Integrated Automatic Procedures for Restoration of Monuments*) della Facoltà di Architettura dell'Università di Ferrara e i risultati di questo lavoro sono stati presentati in occasione della Fiera del Restauro di Ferrara nel 2007.

Il progetto di rilievo tridimensionale dell'opera di Canova si è poi sviluppato in due ulteriori campagne di acquisizione adottando due diversi sistemi di scansione: nel maggio 2007 è stato utilizzato un laser scanner a triangolazione ottica *Konica Minolta Vivid 9i* per la scansione 3D della te-

sta dell'opera, mentre nell'agosto 2007, in collaborazione con il DIAPReM, è stato impiegato un sistema integrato di misura che combina interferometria, videogrammetria e triangolazione ottica, per il rilievo completo dell'opera³. Prima di entrare nel dettaglio della descrizione delle due campagne di acquisizione, è opportuno sottolineare un aspetto di fondamentale importanza quando si opera nel campo dei Beni Culturali: in entrambi i casi si tratta di interventi di rilievo assolutamente non invasivi in quanto, non essendo richiesto il contatto con l'opera o l'applicazione di target fotogrammetrici o polvere opacizzante sulla sua superficie, non si corre il rischio di danneggiare l'originale.

SCANSIONE 3D DELLA TESTA DELLA STATUA TRAMITE KONICA MINOLTA VIVID 9I

Strumentazione adottata

Durante la prima campagna di acquisizione, è stato adottato lo scanner Konica Minolta Vivid 9i per la digitalizzazione tridimensionale della testa dell'*Ebe*.

Si tratta di un sistema attivo (non a contatto) che sfrutta il principio della triangolazione ottica. Questo laser scanner 3D è fondamentalmente costituito da una sorgente laser e da un sensore CCD (*Charge Coupled Device*). La sorgente emette un raggio laser che, opportunamente deviato da uno specchio galvanometrico, scandisce l'oggetto in esame in modo regolare con una serie di profili di luce paralle-



Figura 2. Scansione 3D della testa della statua tramite il laser scanner Konica Minolta Vivid 9i.

li che si muovono dall'alto verso il basso. Il sensore CCD, posto ad una distanza nota rispetto all'emettitore, acquisisce il segnale di ritorno riflesso dalla superficie dell'oggetto. Essendo nota la distanza tra emettitore e ricevitore, la misura degli angoli di emissione e di riflessione del raggio laser permette di ottenere, attraverso il principio della triangolazione, la posizione spaziale (x, y, z) dei punti sulla superficie dell'oggetto che appartengono al profilo di luce prodotto. L'insieme dei profili generati, ottenuti al termine della scansione, restituisce una "nuvola di punti" molto densa, con una risoluzione dell'ordine dei decimi di millimetro, necessaria per la realizzazione del modello tridimensionale.

Lo strumento, dotato di un gruppo di tre ottiche intercambiabili, *tele*, *middle* e *wide*, con distanza focale rispettivamente a 25, 14 e 8 mm, è capace di acquisire fino a un massimo di 307.200 punti (640x480) per ogni scansione. Congiuntamente alla riproduzione della geometria esterna di un oggetto, questo scanner è in grado di ottenere anche un'immagine RGB che fornisce informazioni sul colore registrando una texture di 640x480 pixel per ogni scansione.

Acquisizione dei dati

Il rilievo 3D della testa dell'*Ebe* è stato condotto utilizzando l'ottica tele (distanza focale 25mm) per ottenere un modello ad elevato livello di dettaglio. Tale operazione ha richiesto la pianificazione di una complessa campagna di acquisizione caratterizzata da un elevato numero di scansioni, a causa, in particolare, della grande complessità della capigliatura. Infatti, per la realizzazione di un modello digitale 3D completo è necessario effettuare scansioni da più punti di vista per garantire la totale copertura della superficie dell'oggetto in esame. In questo caso, sono state necessarie acquisizioni mirate dello stesso particolare da diverse stazioni di rilievo per coprire le lacune causate dalla presenza dei numerosi sottosquadri. Durante la campagna di acquisizione, lo scanner è stato posizionato ad una distanza dalla statua compresa tra i 60 e i 90cm, cercando di mantenerlo in direzione ortogonale rispetto alla superficie da acquisire, al fine di ottimizzare il risultato delle scansioni. E' stato inoltre necessario utilizzare un'im-

patto per poter accedere alla parte superiore della statua (Figura 2).

Per il rilievo completo della testa sono state effettuate 179 scansioni (salvate già in formato di *mesh* triangolare e non come nuvole di punti) e l'intera campagna di acquisizione ha comportato cinque giornate di lavoro.

Dato che le singole scansioni in questa fase conservano un proprio sistema di riferimento, per ottenere un modello digitale completo è necessario registrarle insieme individuando almeno tre punti omologhi (elementi morfologici riconoscibili) presenti all'interno di due scansioni adiacenti. Questa prima fase di allineamento è stata eseguita contestualmente alla fase di rilievo (tramite il software *Polygon Editing Tool* che controlla lo scanner), registrando ogni scansione su quella precedentemente acquisita, al fine di semplificare la successiva fase di elaborazione dei dati.

Elaborazione dei dati

La lunga e complessa fase di elaborazione dei dati acquisiti dal laser scanner ha permesso la ricostruzione digitale della testa dell'opera con un elevato livello di accuratezza e con una risoluzione superficiale ampiamente sotto il millimetro. Questa elaborazione è stata eseguita attraverso un processo di *post-processing* (software *Rapidform XOS*) unendo insieme in un unico modello tridimensionale tutte le singole scansioni pre-registrate, avendo cura di diminuire il "rumore" presente in ogni presa (il marmo è una superficie non facile da rilevare con metodi ottici a causa della sua elevata riflettività) e di ricostruire con precisione le eventuali zone nascoste e non acquisite a causa della presenza di sottosquadri.

Come primo passo di questo processo, è stato eseguito un filtraggio per la riduzione del rumore superficiale e una pulitura dei dati tramite l'eliminazione dei punti esterni alla parte di interesse. Successivamente, è stato effettuato un affinamento globale dell'allineamento, in modo da far combaciare perfettamente le diverse scansioni pre-registrate e da minimizzare e ridistribuire globalmente l'errore precedentemente introdotto nella registrazione delle singole coppie. E' stata poi effettuata un'operazione di fusione delle scansioni in un'unica *mesh* a facce trian-

golari eliminando le parti ridondanti e ottenendo un solo modello, sottoposto ad una serie di operazioni di finitura, quali la chiusura dei buchi e l'eliminazione delle facce degeneri. Infine, il modello digitale 3D è stato sottoposto ad un leggero *smoothing* e ad una semplificazione geometrica attraverso la decimazione, controllata in funzione della curvatura superficiale della mesh, del numero dei vertici e dei triangoli fino ad ottenere la versione finale composta da 4.3 milioni di facce (figura 3).

SCANSIONE 3D DELLA STATUA TRAMITE SISTEMA DI MISURA INTEGRATO

Strumentazione adottata

Durante la seconda campagna di acquisizione per il rilievo completo dell'opera, è stato utilizzato un sistema integrato di misura che combina interferometria, videogrammetria e triangolazione ottica.

Il sistema integrato di misura è composto fondamentalmente da due elementi: una stazione *Laser Tracker* accoppiata con una videocamera digitale (*T-Cam*) e un sensore remoto che in via opzionale può essere costituito da uno scanner portatile *T-Scan* o da un tastatore portatile *T-Probe*.

Il *T-Scan* è un laser scanner non a contatto che utilizza il principio della triangolazione ottica per l'acquisizione delle nuvole di punti della superficie in esame. Il *T-Probe* è uno strumento di misura a contatto che utilizza tastatori Renishaw e che consente di operare esattamente come si fa con una *CMM (Coordinate Measurement Machine)* tradizionale effettuando misure puntuali.

Durante la fase di rilievo il sensore remoto del sistema (*T-Scan* o *T-Probe*) è impugnato dall'operatore e movimentato manualmente, mentre la localizzazione è costantemente monitorata in base alla Tecnologia di Posizionamento Locale tramite la stazione *Laser Tracker* accoppiata alla videocamera digitale *T-Cam*.

Il *Laser Tracker* è un sistema basato su interferometria laser 3D ad inseguimento con incorporato un distanziometro assoluto per la misura diretta della distanza che fornisce la posizione (x, y, z)⁴ di uno dei prismi riflettori posti sul sensore remoto in utilizzo, mentre la *T-Cam* ne fornisce i tre angoli di Eulero (i, j, k), leggendo la mutua posizione di 10 diodi infrarossi adeguatamente disposti. In questo modo, combinando i vantaggi della tecnologia basata sull'interferometria laser con quelli della videogrammetria, è possibile ottenere un sistema in grado di risolvere i sei gradi di libertà del sensore remoto movimentato dall'operatore

durante l'acquisizione. E' ovvio che in fase operativa il sensore remoto portatile del sistema (*T-Scan* o *T-Probe*) deve risultare sempre visibile alla stazione di localizzazione; in caso contrario si verifica l'interruzione del rilievo per evitare dati indesiderati.

Acquisizione dei dati

Per il rilievo completo dell'opera è stato predisposto il sistema integrato di misura posizionando la stazione *Laser Tracker* (accoppiata con *T-Cam*)⁵ pochi metri di fronte alla statua, mentre l'operatore che impugnava il *T-Scan* era libero di muoversi vicino all'opera durante l'intera campagna di acquisizione (Figura 4).

Infatti, il rilievo tridimensionale dell'opera avviene attraverso una serie di successive scansioni spostando lentamente lo scanner portatile in maniera parallela alla superficie da acquisire e mantenendolo ad una distanza di circa 7 cm da questa. Essendo noti i sei gradi di libertà del sensore remoto rispetto al sistema di riferimento individuato dalla stazione *Laser Tracker*, le singole "pennellate 3D" vengono automaticamente registrate e visualizzate tramite il software *Polyworks* utilizzato per la gestione delle nuvole di punti.

In questa prima fase di scansione, è stato possibile acquisire solo una metà della statua senza compromettere la localizzazione del *T-Scan* da parte del sistema di inseguimento *Laser Tracker*, mentre per il rilievo della restante parte si è dovuto spostare la stazione di riferimento e posizionarla pochi metri dietro la statua. Per non effettuare la registrazione del nuovo set di scansioni sul precedente (come è usuale nei processi di ricostruzione 3D da scansione), è stato prima necessario definire un sistema di riferimento per registrare insieme le nuvole di punti acquisite dalle due posizioni del *Laser Tracker*.

Pertanto, cinque riferimenti calibrati (tre è il numero minimo) sono stati collocati nell'ambiente intorno alla statua; la posizione di questi riferimenti è stata acquisita con il tastatore portatile *T-Probe* (impiegato in questa fase di registrazione come sensore remoto al posto del *T-Scan*) e mantenendo il *Laser Tracker* nella prima posizione. Dopo aver spostato il *Laser Tracker* nella seconda posizione, gli stessi riferimenti sono stati nuovamente misurati per determinare la trasformazione di rototraslazione tra le due posizioni del sistema di inseguimento.

In totale, per completare la campagna di acquisizione, sono state complessivamente realizzate 1290 scansioni in tre giornate di lavoro.

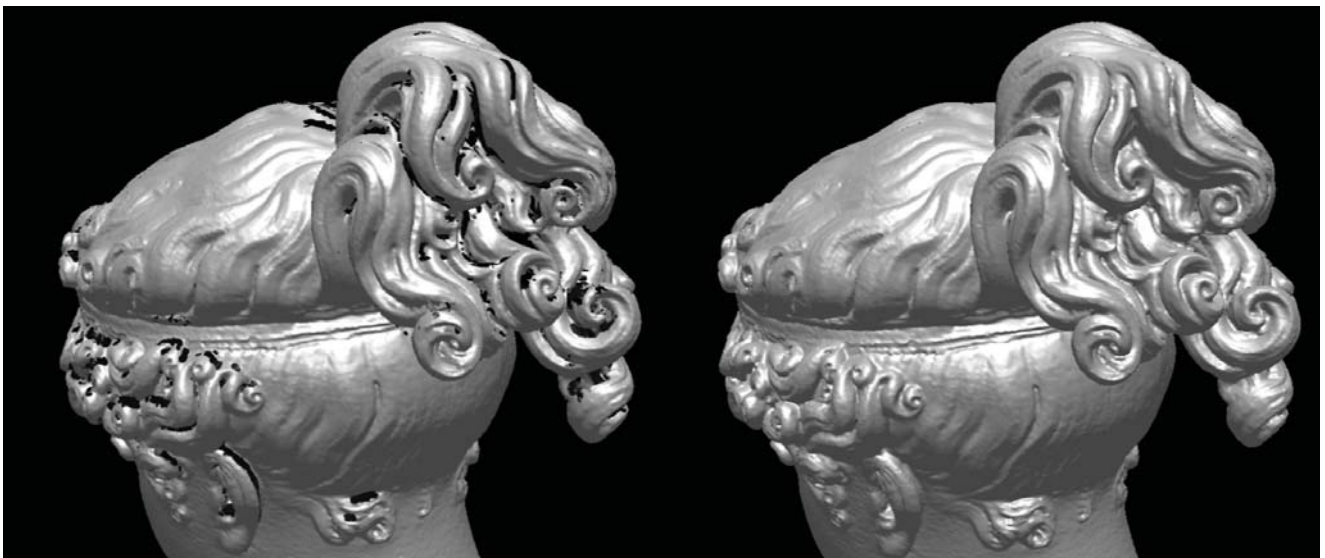


Figura 3 - Confronto tra il modello tridimensionale della testa dell'*Ebe* prima e dopo la fase di chiusura dei fori.



Figura 4 - Scansione 3D della statua tramite il T-Scan del sistema di misura integrato.

Elaborazione dei dati

Il post-processing dei dati è stato effettuato tramite il software Polyworks, che dispone di un plug-in di interfaccia con il sistema di misura integrato per la gestione e visualizzazione in tempo reale delle nuvole di punti acquisite tramite il T-Scan.

Questa fase di elaborazione dei dati è risultata particolarmente lunga e complessa in funzione dell'elevato numero di scansioni. Le 1290 nuvole di punti registrate tra di loro, grazie alla funzione di localizzazione dello scanner portati-

le rispetto alla stazione di riferimento Laser Tracker, sono state sottoposte ad un affinamento dell'allineamento attraverso una funzione di registrazione globale seguita da un processo automatico per la riduzione della sovrapposizione tra le diverse scansioni (zone di overlap), che ha portato ad una prima diminuzione della massa di dati.

La mesh a facce triangolari è stata poi ottenuta attraverso un processo di triangolazione che converte le nuvole di punti acquisiti dallo scanner in una superficie continua e ne produce una rappresentazione visivamente più intuitiva. Consi-



Figura 5 - A sinistra: insieme delle scansioni registrate (visualizzate in colori diversi) ottenute tramite il T-Scan. A destra: modello digitale 3D dell' *Ebe* ottenuto dalla fusione delle precedenti scansioni.

derata la grande quantità di dati (dipendente dalle dimensioni della statua), è stato necessario sottoporre il modello digitale ad una forte semplificazione geometrica attraverso una decimazione controllata in funzione della curvatura superficiale della mesh. Questo approccio determina quindi una mesh a risoluzione variabile, che utilizza triangoli più grandi dove la superficie dell'oggetto ha una minore curvatura e triangoli più piccoli nelle aree a maggiore curvatura. Il risultato è stato un modello finale composto da poco più di 5 milioni di triangoli, non molti di più rispetto al modello di più piccole dimensioni, ma a più alta risoluzione, della sola testa dell'opera (figura 5).

[continua...]

BIBLIOGRAFIA

- S. A. Curuni, N. Santopuoli, 2007, "Pompei, Via dell'Abbondanza. Ricerche, restauri e nuove tecnologie", Edizioni Skira, Milano.
- F. De Crescenzo, M. Fantini, F. Persiani, N. Santopuoli, L. Seccia, V. Virgilli, 2008, *Monitoring of the conservation state of the internal wall surfaces of Room with Golden Vault in the Domus Aurea*, in Proceedings of the International Workshop - In Situ Monitoring of Monumental Surfaces, Florence, 27-29 ottobre 2008, pp. 77-86.
- S. Androsov, F. Mazzocca, A. Paolucci (a cura di), 2009, "CANOVA. L'ideale classico tra scultura e pittura", Silvana Editoriale, Milano.
- M. Balzani, M. Fabbri, F. Persiani, L. Seccia, F. De Crescenzo, M. Fantini, V. Virgilli, 2007, *L'Ebe di Antonio Canova nella Pinacoteca Civica di Forlì: studio di fattibilità per l'applicazione di tecnologie avanzate di rilievo, prototipazione e realtà virtuale*. In "Restauro. Economia della Cultura - Salone dell'Arte del Restauro e della Conservazione dei Beni Culturali e Ambientali", Catalogo della Fiera del Restauro di Ferrara 2007, 22-25 marzo 2007, Acropoli s.r.l., Bologna, pp. 222-226.
- R. Scopigno, 2005, *Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale*. Laser Scanner e GPS: Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali, 4, pp. 41-68.
- C. Cassani, 2008, *Strumenti per una nuova tecnologia per il rilevamento architettonico ed archeologico*, in "Il cantiere della conoscenza, Metodologie e strumenti per la conservazione ed il restauro", a cura di R. A. Genovese, Arte Tipografica Editrice, pp. 155-167.

NOTE

1. Presso la sede di Cusercoli (FC) del CAILab vengono organizzati periodicamente incontri scientifici e cantieri-scuola per la preparazione teorica e pratica di allievi delle due Facoltà e della Scuola di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio della Sapienza Università di Roma.
2. In particolare si tratta di indagini ultrasoniche e radiografiche eseguite da Carlo Lugnani Doria della ditta RCL - Ricerca Controlli Lavori.
3. La parte iniziale di questo progetto di ricerca è stata resa possibile anche grazie alla grande disponibilità del Prof. M. Balzani, Direttore del DIAPReM, in termini sia di personale che di mezzi.
4. Di fatto il sistema effettua misure polari (due angoli e una distanza), che vengono poi trasformate in coordinate cartesiane.
5. Nel resto del paragrafo il sistema di inseguimento Laser Tracker si intende sempre accoppiato con la videocamera digitale T-Cam.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano in modo particolare:

Avv. Pier Giuseppe Dolcini (Presidente delle Fondazione Cassa dei Risparmi di Forlì), Dr. Gianfranco Brunelli (Coordinatore generale della Mostra su Canova), Dr.ssa Luciana Prati (Dirigente Pinacoteca Civica, Servizi Pinacoteca e Musei, Comune di Forlì), Prof. Marcello Balzani (Responsabile Scientifico e Direttore del DIAPReM, Università di Ferrara), Ing. Cesare Cassani, Dr. Anthony Vianna (Leica Geosystems/Hexagon Metrology), Dr. Renato Figini, Sig. Daniele Molina (Konica Minolta Sensing Europe B.V. Italy Branch Office).

ABSTRACT

Canova's Ebe: digital model and application developments - 1st part - In this paper the main aspects of a complex research project, performed by the CAILab and V-lab laboratories of the Second Engineering Faculty of the Bologna University, are described. This project is being developed exploiting some different laser scanning technologies, with the goal to obtain a 3D survey of the sculpture called Ebe of Antonio Canova that is conserved in Forlì.

AUTORI

FRANCESCA DE CRESCENZO

MASSIMILIANO FANTINI

FRANCO PERSIANI

VALENTINA VIRGILLI

II FACOLTÀ DI INGEGNERIA, CAILAB, UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

NICOLA SANTOPUOLI

FACOLTÀ DI ARCHITETTURA VALLE GIULIA, SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA

LEONARDO SECCIA

SECCIA@CIRAM.UNIBO.IT

II FACOLTÀ DI INGEGNERIA, CAILAB E CIRAM, UNIVERSITÀ DI BOLOGNA