

Rilievo metrico con Scanner 3D e restituzione tridimensionale e bidimensionale al CAD

Il lavoro di rilievo, condotto durante le fasi di restauro, è stato eseguito nell'anno 2008 per la Soprintendenza del Friuli Venezia Giulia, con lo scopo di approfondire la conoscenza metrica del manufatto e di sviluppare possibili applicazioni per la preservazione dell'opera ai fini del controllo del degrado. Lo scopo dell'indagine è stato, inoltre, quello di documentare attraverso le recenti tecnologie informatiche il dato metrico e la consistenza del manufatto.

In particolare, il rilievo tridimensionale eseguito con lo scanner optometrico 3D dell'ara lapidea è stato indirizzato alla costruzione del modello digitale informatico avanzato, per la conoscenza di precisi dati geometrico-morfologici e strutturali, mentre la restituzione grafica bidimensionale è il risultato della derivazione iconica del primo, in proiezioni ortometriche. Quindi, partendo dall'esatta documentazione metrologica dello *status quo* dell'opera si è giunti alle applicazioni a fini multimediali, tuttora in corso di sviluppo.

L'ara non è monolitica, ma si presenta come un volume prismatico costituito da lastre assemblate, disposto orizzontalmente, contenuto in un ipotetico parallelepipedo limite di larghezza pari a mm 1477, mentre l'altezza e la profondità, rispettivamente di mm 909 e mm 965, pressappoco si equivalgono.

Il blocco scolpito non poggia direttamente a terra, ma l'attacco a pavimento è mediato da un basso zoccolo. Il volume è adorno di bassorilievi sui quattro fronti. Lungo il perimetro, sul margine superiore, sono presenti iscrizioni, mentre le rappresentazioni che si sviluppano sulle lastre, sono ricavate per una profondità, mediamente, di poco inferiore al quarto dello spessore stesso delle lastre stesse. Lo scanner impiegato ha garantito risultati accurati e completi attraverso una procedura non rischiosa e non invasiva, nel pieno rispetto dell'integrità del manufatto.

La tecnologia informatica nelle operazioni di rilevamento e restituzione dei dati

La sofisticata discrezionalità del metodo per rigenerare l'esistente attraverso il rilievo e la rappresentazione è andata di pari passo con i recenti progressi delle tecnologie informatiche e con l'ottimizzazione delle procedure. Inoltre, la disponibilità sempre maggiore di strumentazione e di applicativi CAD capaci di gestire numericamente la registrazione di uno spazio fisico e di riproporlo a livello grafico ha contribuito negli anni a fornire risposte sempre più mirate a problematiche che richiedono di trasformare la complessità reale in un modello geometrico digitale controllabile.

La determinazione di un oggetto reale morfologicamente complesso per la relativa rappresentazione informatizzata in modello numerico tridimensionale, avviene sempre attraverso l'individuazione sintetica della forma. Il modello virtuale ottenibile dall'oggetto reale può essere definito un 'sistema discreto' costruito con la restituzione di un numero elevato di punti d'appoggio, in genere con precisioni sub-millimetriche, individuati e misurati. Si perviene in tal modo a un risultato coerente, dal punto di vista quantitativo, con la forma e lo stato di conservazione del manufatto. Naturalmente, il modello elaborato presenterà analogie formali e proporzionali congruenti con quelle effettive dell'oggetto reale, in funzione del numero di punti campionati e della loro densità per unità di superficie.



FIG. 9. Cividale, Museo Cristiano. Altare di Ratchis (retro), dettaglio della fenestella: dopo la rimozione della grossolana stuccatura è stato realizzato un riempimento sotto livello che mantiene la traccia storica delle manomissioni.

Da diversi anni si è consolidato, nella pratica del rilevamento digitale dei beni artistici, l'uso di dispositivi commerciali del tipo scanner 3D triangolatori. Si tratta, prevalentemente, di sistemi di scansione per la restituzione matematica di elementi fisici basati sulla triangolazione *laser* a tempo di volo (il termine *laser* è l'acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)³⁰, oppure, sulla triangolazione attiva per proiezione di frange, per il rilievo di forme per effetto *Moirè* (tecnica che passa comunemente sotto il nome di "proiezione di luce strutturata"). Quest'ultima, sfrutta la proiezione di frange di luce incoerente, ovvero, quelle che l'oggetto da analizzare deforma secondo la propria morfologia. L'elaborazione delle immagini contenenti la deformazione delle frange permette di estrarre il dato morfologico dell'oggetto in formato digitale.

Il momento della gestione del dato è connotato da una nuova concezione del rilievo stesso che si dipana su due livelli: da un lato si elaborano con accuratezza mensurale ricostruzioni bidimensionali e tridimensionali che vedono oggettivamente sempre più l'operatore estraniarsi dall'interpretazione della forma, dall'altro, le applicazioni pratiche volte alla manipolazione multimediale e all'applicazione delle tecniche specialistiche, di conoscenza, di ricostruzione, di simulazione, ci



FIG. 10. Cividale, Museo Cristiano. Altare di Ratchis nella nuova collocazione museale, a restauro ultimato.

offrono rappresentazioni estremamente sofisticate e mai elaborate in precedenza nel campo dei Beni Culturali.

Di conseguenza, ciò che a nostri giorni caratterizza maggiormente la disciplina del rilievo nell'ambito degli interventi volti alla tutela del patrimonio artistico è il suo imporsi con una duplice valenza: come forma autonoma d'indagine e, per fini operativi, come supporto esplicito per le più ampie possibilità e livelli d'analisi.³¹

Nella consapevolezza che descrivere sinteticamente la portata di tale fenomeno senza delinearne adeguatamente gli aspetti tecnici connessi, omissi per i limiti imposti dalla trattazione, riduce gli effetti alle sole modalità applicative, si può asserire che con l'ausilio di tali sistemi di scansione si è progressivamente abbandonato il ricorso ad altri dispositivi di rilevamento, per esempio a contatto mediante tastatori digitali, potendo, nel più dei casi, eseguire per intero acquisizioni garanti delle massime prestazioni in termini di tolleranze dimensionali richieste per le applicazioni più sofisticate della *Reverse engineering*.³² Tuttavia, nell'operare *in loco* caso per caso, permangono i vincoli legati alla pratica, per forma e posizione dell'opera, nonché quelli relativi alle "condizioni al contorno", determinate dal contesto più o meno favorevole.

Sul mercato sono disponibili numerose proposte che si differenziano non soltanto per le dimensioni del campo di lavoro, ma anche per la precisione e la tipologia di

installazione. Se si eccettuano i casi di rilevamento di opere monumentali su scala architettonica, per le quali la pratica ordinaria propende perlopiù per il ricorso a sistemi integrati, basati sulla fotogrammetria e sull'ausilio di scanner laser 3D di estesa portata, con o senza prismi riflettenti, nell'ambito delle applicazioni su scala monumentale, da m 0.6 a m 25 circa, tali risposte ai problemi del rilievo di un'opera d'arte sono diventate oramai imprescindibili.

Ad oggi, i dispositivi ottici per la misurazione tridimensionale realizzati dall'azienda tedesca *Breuckmann (Industrielle Bildverarbeitung und Automation, GmbH)*, utilizzabili in questo ambito, sono quelli che la tecnologia informatica registra come tra i massimi sistemi sul mercato internazionale per l'accuratezza, la velocità e le elevate prestazioni.³³

Tali sistemi di scansione senza contatto si basano sulla interferometria *Moiré*. Gli scanner optometrici sono configurabili in modalità mono-camera o stereocamera, pertanto si possono agevolmente impiegare per l'acquisizione di oggetti di piccole e grandi dimensioni mantenendo una notevole precisione. In termini di flessibilità d'impiego, lo StereoSCAN 3D impiegato, grazie alla posizione asimmetrica delle fotocamere, può realizzare acquisizioni da differenti triangolazioni (10°, 20° e 30°), permettendo così di catturare, con elevata attendibilità metrica, anche le porzioni di manufatto difficilmente raggiungibili. L'interscambio degli obiettivi garantisce il passaggio rapido tra diversi settori di misurazione, mentre i moduli delle fotocamere possono essere montati facilmente in varie posizioni sulla base del sensore. Con tale possibilità, anche le piccole aree di misurazione possono essere realizzate senza cambiare il sensore di base.

In termini di precisione, due fotocamere digitali con 1,4 milioni di pixel ognuna, danno la garanzia di alta risoluzione e precisione. La struttura base in fibra di carbonio assicura un'ottima meccanica e la stabilità termica del sensore. Inoltre, ampia è la possibilità di implementare questo sistema su macchine di misura, robot, macchine a controllo numerico a cinque assi.

Il rilievo dell'ara di Ratchis

L'ara di Ratchis è stata rilevata a distanza con lo scanner ottico *Breuckmann* del tipo StereoSCAN 3D, del quale la *UNOCAD* di Altavilla Vicentina detiene la rappresentanza sul territorio nazionale.³⁴ L'applicazione pratica del rilevamento dell'opera longobarda, eseguito nel mese di aprile del 2008, ha rappresentato non soltanto un debutto assoluto in Italia, ma anche un primato per il settore dei beni artistici.

L'acquisizione della nuvola di punti a maglia millimetrica (gradiente tra due punti a intervalli di frazioni di millimetro), si è svolta in circa 20 ore negli ambienti del Museo del Duomo di Cividale del Friuli, prevalentemente in presenza di luce naturale attenuata o ridotta. Il principio di funzionamento è del tipo ad emissione di frange di luce e doppia triangolazione per la misurazione della distanza, con un *range* d'acquisizione in formato A3. Il lavoro è stato condotto ad una distanza media dal manufatto di cm 80, procedendo dal fronte rivolto all'ingresso al Museo, con direzione a 360° e verso antiorario.

La digitalizzazione è stata creata a 1,4 milioni 3D – coordinate per camera, per oltre sessanta singole riprese. L'acquisizione dei dati per ognuna di queste ultime è stata eseguita ad una velocità di circa 1 sec. cadauna.

Le peculiarità dello scanner della *Breuckmann* nel caso del rilievo dell'ara di Ratchis

si sono rivelate già in sede di acquisizione del modello, dove l'allineamento delle *3D scan shot* si è realizzato sul posto, in tempo reale, permettendo all'operatore di verificare preliminarmente l'ottimizzazione e l'accuratezza dei punti del modello matematico (*outliers and gross-errors*), contemporaneamente alla rimozione di quelli estranei perché in relazione alle condizioni al contorno. La nuvola di punti ottenuta per integrazione di scansioni in sequenza (*DDSM, Dense Digital Surface Model*) è stata utilizzata per la creazione automatica del modello poligonale costruito con un reticolo di base triangolare, ovvero, la superficie elementare. In seguito, sul modello digitalizzato è stato possibile intervenire utilizzando i tradizionali strumenti avanzati di *editing* dei triangoli. Il risultato è quello di un sistema unico tridimensionale, un modello dotato di caratteristiche univoche, fino alla completa restituzione del tutto, con la sola esclusione della superficie superiore estranea all'opera originale. L'*output* ottenuto partendo dalla nuvola di punti triangolata, è stato trasferito in ambiente *CAD (Computer Aided Design)* per la manipolazione del modello poligonale (*STL*), fino, ove necessario, alla derivazione di superfici *NURBS (B-spline Razionale Non Uniforme)*.³⁵

Le quattro lastre prese singolarmente e analizzate hanno, in sintesi, le caratteristiche di seguito illustrate (Tavv. 1-4). Per ognuna di esse si è ricavato un ipotetico volume attraverso la ricostruzione delle porzioni non accessibili. Eseguendo l'unione *booleana mesh* con le rispettive parti rilevate, si ha la possibilità di formulare una stima del volume e del peso proprio, per associazione del materiale impostato, in questo caso del tipo pietra Aurisina, impostando il peso specifico su cui è basato il calcolo del peso. L'analisi dello spessore permette di individuare insiemi di punti di maggiore elevazione, sui quali poggiare il piano di riferimento assoluto planare. Sezionando la lastra per gradienti prestabiliti, emerge in maniera progressiva il bassorilievo fino al punto di minimo, la cui distanza, normale al piano più prospiciente, determina la maggior profondità della rappresentazione. La lastra principale, la più adorna di figure e ampia, risulta essere quella più scavata in profondità.

La determinazione dei valori di riflettanza delle singole riprese è stata in parte effettuata tramite l'acquisizione dei dati di mappatura della cromia della pietra, a partire da immagini digitali e, in un secondo momento, mappando le stesse sul modello digitale tridimensionale.

La derivazione dal 3D di proiezioni ortometriche delle quinte frontali del modello matematico mantiene i parametri metrici e di coordinate del sistema unico tridimensionale (figg. 11-14). La derivazione bidimensionale è stata elaborata al tratto digitalizzando direttamente la nuvola di punti.

Inoltre, si sono elaborate restituzioni foto-realistiche e animazioni 3D ai fini della documentazione multimediale, con l'illustrazione dei dati del lavoro svolto, allo scopo di predisporre uno strumento aggiuntivo, utile a chiunque abbia la necessità d'interagire con il manufatto svincolato dal contesto.

Con gli sviluppi possibili si possono realizzare rapidamente attraverso la modellazione CAD 3D le porzioni di manufatto mancanti o fortemente degradate, replicare le stesse o il tutto mediante l'utilizzo di macchine utensili a controllo numerico multiasse, ricostruire per intero prototipi concettuali e ipotesi di studio deducibili da pochi dati CAD 3D.



I



II



III



IV

Volume mmc 64013316*
 Profondità [z] mm 84.6*
 Altezza [y] mm 903.9
 Larghezza [x] mm 867.8
 Area sup. ril. mmq 1022804
 Peso Sp. (val. tab. 2.521 Kg/mc*)
 Peso proprio Kg 161.3 ca.
 Prof. max bassorilievo mm 20.3

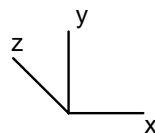
[I] Z= 1.0 mm (Z=0.0 mm)

[II] Z= 6.25 mm

[III] Z= 12.50 mm

[IV] Z= 18.75 mm

*valori indicativi



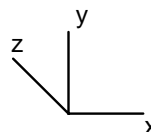
TAV. 1. Cividale, Museo Cristiano. Altare di Ratchis, bassorilievo raffigurante l'Adorazione dei Magi. La restituzione foto-realistica dell'ara è ottenuta per mezzo delle immagini digitali acquisite durante le operazioni di rilievo. Al di sotto, arretrando il riferimento assoluto planare secondo gradienti prestabiliti lungo l'asse delle [z], costruito sulle porzioni più elevate, la lastra emerge fino ad indicare i punti di massima profondità del bassorilievo. A fianco sono precisati i parametri dimensionali della lastra e la stima del peso proprio.



Volume mmc 66939230*
Profondità [z] mm 86.2*
Altezza [y] mm 903.0
Larghezza [x] mm 883.1
Area sup. ril. mmq1031171
Peso Sp. (val. tab. 2.521 Kg/mc*)
Peso proprio Kg 168,7 ca.
Prof. max bassorilievo mm 20.8

[I] Z= 1.3 mm (Z=0.0 mm)
[II] Z= 6.25 mm
[III] Z= 12.50 mm
[IV] Z= 18.75 mm

*valori indicativi



TAV. 2. Cividale, Museo Cristiano. Altare di Ratchis, bassorilievo raffigurante la *Visitazione*. La restituzione foto-realistica dell'ara è ottenuta per mezzo delle immagini digitali acquisite durante le operazioni di rilievo. Al di sotto, arretrando il riferimento assoluto planare secondo gradienti prestabiliti lungo l'asse delle [z], costruito sulle porzioni più elevate, la lastra emerge fino ad indicare i punti di massima profondità del bassorilievo. A fianco sono precisati i parametri dimensionali della lastra e la stima del peso proprio.



Volume mmc 76883715*
 Profondità [z] mm 69.7*
 Altezza [y] mm 837.4
 Larghezza [x] mm 1339.3

Area sup. ril. mmq 1370881
 Peso Sp. (val. tab. 2.521 Kg/mc*)
 Peso proprio Kg 193.8 ca.
 Prof. max bassorilievo mm 18.9

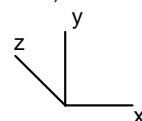
[I] Z= 1.3 mm (Z=0.0 mm)

[II] Z= 6.25 mm

[III] Z= 12.50 mm

[IV] Z= 18.75 mm

*valori indicativi



TAV. 3. Cividale, Museo Cristiano. Altare di Ratchis, bassorilievo raffigurante la lastra posteriore dell'ara. La restituzione foto-realistica dell'ara è ottenuta per mezzo delle immagini digitali acquisite durante le operazioni di rilievo. Al di sotto, arretrando il riferimento assoluto planare secondo gradienti prestabiliti lungo l'asse delle [z], costruito sulle porzioni più elevate, la lastra emerge fino ad indicare i punti di massima profondità del bassorilievo. A fianco sono precisati i parametri dimensionali della lastra e la stima del peso proprio.