

# Architettura, Costruzione e Recupero del Patrimonio

*Ricerche*

3

## Direttore

GIANLUIGI MONDAINI  
Università Politecnica delle Marche

## Comitato scientifico

FABRIZIO IVAN APOLLONIO  
Università degli Studi di Bologna

PANAGIOTIS G. ASTERIS  
School of Pedagogical & Technological Education, Athens

VALTER CALDANA  
Università Presbiteriana Mackenzie di São Paulo, Brasil

PAOLO CLINI  
Università Politecnica delle Marche

PAOLO DESIDERI  
Università degli studi Roma Tre

MARCO D'ORAZIO  
Università Politecnica delle Marche

JAVIER NEILA GONZALES  
Universidad Politecnica de Madrid, Espan

STEFANO LENCI  
Università Politecnica delle Marche

FABIO MARIANO  
Università Politecnica delle Marche

RENATO MASIANI  
Università di Roma La Sapienza

ENRICO QUAGLIARINI  
Università Politecnica delle Marche



# Architettura, Costruzione e Recupero del Patrimonio

*Ricerche*

La collana ospita ricerche che indagano su quell'indispensabile equilibrio tra conoscenze teoriche e pratiche. L'architettura è elemento centrale con i suoi vari aspetti e contenuti: da quelli tecnologici e strutturali a quelli storici e urbani. Un'attenzione pluridisciplinare verso un progetto volto alla costruzione, al recupero e alla valorizzazione del patrimonio, che trova la sua sostanza, sia nella fase di elaborazione che in quella di documentazione, nell'innovazione tecnico-scientifica. L'obiettivo è la costruzione di un insieme di testi che diano un contributo scientifico alla formazione di quell'ingegnere, progettista e costruttore, capace di sintesi tra competenze tecniche e formali. Un costruttore è un operatore attento all'innovazione tecnologica, alla qualità dello spazio costruito e al contesto urbano e fisico-sociale in cui opera; è un coordinatore che attraverso capacità di problem solving è in grado di mettere in sinergia le discipline coinvolte nel processo produttivo dell'architettura, con particolare attenzione alle problematiche relative al restauro, alla rigenerazione e alla valorizzazione dell'esistente.

*Classificazione Decimale Dewey:*

**363.690285 (23.) SERVIZI PUBBLICI DI TUTELA DEI BENI CULTURALI. Elaborazione dei dati**

Renato Angeloni

# Rappresentazione digitale e realtà estesa

Soluzioni per la fruizione del patrimonio culturale

Prefazione di  
Paolo Clini





aracne

©

ISBN  
979-12-218-1580-1

PRIMA EDIZIONE  
**ROMA 31 OTTOBRE 2024**

11	Prefazione <b>Paolo Clini</b>
15	Introduzione
19	Capitolo I <b>Rappresentare il patrimonio culturale in digitale</b> 1.1. Metodi image-based. Dalla fotogrammetria alle ricostruzioni tramite intelligenza artificiale, 22 – 1.2. Metodi range-based. I sistemi di scansione a sensore attivo, 38
47	Capitolo II <b>Fruire il patrimonio culturale dalla realtà fisica a quella estesa</b> 2.1. Realtà Aumentata, 51 – 2.2. Realtà Mista, 53 – 2.3. Realtà Virtuale, 54
57	Capitolo III <b>Modelli. Esperienze digitali per il patrimonio culturale</b> 3.1. Svelare. Il Palazzo e lo Studiolo del Duca di Urbino, 57 – 3.2. Salvaguardare. Le Grotte di Palazzo Campana a Osimo, 75 – 3.3. Costruire. Le Macchine di Leonardo da Vinci, 96
111	Conclusioni
113	Bibliografia



*A mia moglie*



# Prefazione

di Paolo Clini

---

Fu Walter Benjamin, nel suo celebre saggio *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica*, a gettare le basi di una riflessione destinata a rivoluzionare il nostro rapporto con il Patrimonio Culturale. Sebbene conoscesse unicamente la fotografia, Benjamin intuì come la riproduzione tecnica delle opere d'arte avrebbe progressivamente abbattuto le barriere che limitavano la fruizione del sapere artistico e storico a pochi privilegiati. Quel che Benjamin non poteva prevedere è quanto la rivoluzione da lui intravista sarebbe stata amplificata dalle straordinarie potenzialità del digitale. Oggi, grazie a strumenti sempre più performanti siamo in grado di creare repliche digitali di opere d'arte e monumenti con un livello di precisione e realismo mai visto prima, quindi di offrirne grazie alle cosiddette "realtà estese" esperienze

di fruizione culturale profondamente immersive e democratiche.

La possibilità di creare modelli tridimensionali e interattivi di un bene storico-artistico, attraverso tecnologie come la realtà virtuale (VR), la realtà aumentata (AR) e la realtà mista (MR), ha aperto nuove frontiere nella fruizione del Patrimonio Culturale. Non si tratta più solo di conservare digitalmente un'opera, ma di ampliare le modalità con cui possiamo esplorarla, conoscerla e, in un certo senso, farne esperienza diretta, anche se fisicamente distante. In questo senso, le tecnologie dell'*Extended Reality* stanno ridefinendo il concetto stesso di esperienza culturale, poiché offrono ai visitatori un modo completamente nuovo di interagire con il passato.

Questa evoluzione porta con sé la questione cruciale dell'accessibilità al patrimonio culturale. In un mondo

in cui molte persone non possono permettersi di viaggiare o visitare fisicamente i musei e i siti storici, le repliche digitali si configurano come strumenti fondamentali per garantire una fruizione inclusiva e universale. Attraverso la digitalizzazione, le opere d'arte e i monumenti possono essere portati virtualmente in case, scuole e comunità di tutto il mondo. Non si tratta solo di una questione di comodità, ma di un diritto alla cultura che deve essere garantito a tutti, indipendentemente dalla loro posizione geografica, dalle loro possibilità economiche o dalle loro condizioni fisiche. Le repliche digitali permettono a chiunque di accedere a una vastità di conoscenze e di esperienze che, in assenza di queste tecnologie, rimarrebbero precluse.

Le tecnologie immersive hanno un potenziale straordinario perché per-

mettono di ricostruire virtualmente luoghi, monumenti e opere che altrimenti sarebbero irraggiungibili o, peggio ancora, perduti. Grazie alla realtà virtuale, è possibile, ad esempio, “entrare” in siti archeologici ormai distrutti o inaccessibili, come Pompei o l’antica Roma, e visitarli come erano nel loro periodo di massimo splendore. Non solo, la realtà aumentata consente di arricchire la fruizione di un’opera o di un sito storico sovrapponendo informazioni, ricostruzioni tridimensionali o animazioni che ne illustrano l’evoluzione nel tempo. Pensiamo, ad esempio, a un visitatore che, passeggiando per i Fori Imperiali, possa vedere sul proprio dispositivo mobile una ricostruzione 3D di come quelle rovine apparivano duemila anni fa, sovrapposta al panorama attuale. Questa sovrapposizione di passato e presente è una delle innovazioni più affascinanti offerte dall’*Extended Reality*, e permette di rendere viva la storia, arricchendo l’esperienza del visitatore con contenuti dinamici e interattivi.

Un altro aspetto cruciale è quello della *realtà mista* (MR), che combina elementi fisici e digitali in un’unica esperienza interattiva. Questa tecnologia consente infatti non solo di visualizzare contenuti virtuali sovrapposti alla realtà fisica, ma di interagire attivamente con essi, creando un dialogo continuo tra il mondo reale e quello virtuale. Ad esempio, in un contesto museale, il visitatore potrebbe vedere una statua fisica e, indossando un visore di realtà mista, esplorarne una versione digitale che ne mostri i dettagli nascosti, le ricostruzioni basate su dati archeologici o persino simulazioni del processo di creazione. Questa integrazione di realtà e virtualità apre nuove strade per l’interpretazione del patrimonio, fornendo un’esperienza multisensoriale e immersiva che può stimolare in modo significativo la curiosità e l’apprendimento.

La seconda parte del libro, *Fruire. Il Patrimonio Culturale dalla realtà fisica a quella estesa*, esplora in profondità le opportunità offerte da queste

tecnologie per ampliare la fruizione del Patrimonio Culturale. Il potenziale della realtà estesa non si limita solo alla visualizzazione passiva di contenuti digitali. Essa permette una vera e propria interazione con l’opera d’arte o il sito storico. Grazie alla *Extended Reality*, infatti, il visitatore può spostarsi all’interno di ricostruzioni virtuali, esplorare ambienti e dettagli che, nel mondo reale, potrebbero essere difficilmente accessibili, e persino manipolare oggetti virtuali per comprenderne la struttura e il funzionamento. Immaginiamo, ad esempio, la possibilità di smontare virtualmente una macchina di Leonardo da Vinci, esplorarne ogni componente, comprenderne il funzionamento, e poi rimontarla, il tutto restando immersi in un contesto storico ricreato fedelmente.

Queste nuove modalità di interazione rappresentano un cambiamento radicale anche per quanto riguarda l’educazione e la didattica del Patrimonio Culturale. Le tecnologie immersive offrono enormi possibilità

per l'insegnamento, permettendo agli studenti di fare esperienza diretta dei beni culturali, di esplorare la storia in modo pratico e coinvolgente, e di imparare non solo attraverso la lettura o l'ascolto, ma attraverso l'interazione diretta con i contenuti. Le applicazioni della realtà estesa nelle scuole, nelle università e nei musei permettono di superare le barriere cognitive tradizionali e di rendere il patrimonio più comprensibile e attraente per le nuove generazioni. Attraverso le repliche digitali, gli studenti possono esplorare le opere d'arte, i monumenti e i luoghi storici con un livello di dettaglio e interattività che stimola l'interesse e l'inchiesta, incoraggiandoli a diventare cittadini più informati e consapevoli.

In definitiva, *Rappresentazione Digitale e Realtà Estesa* non si limita a tracciare lo stato dell'arte delle tecnologie digitali applicate al Patrimonio Culturale, ma propone una visione di come queste tecnologie possano ridefinire il nostro rapporto con il passato. La digitalizzazione non è solo un processo tecnico,

ma un atto culturale che permette di rendere accessibile a tutti la bellezza e la storia delle nostre opere, superando le barriere fisiche e temporali. Le tecnologie dell'*Extended Reality* rappresentano il futuro della fruizione culturale, una nuova via per scoprire, comprendere e valorizzare il nostro patrimonio, rendendolo sempre più accessibile e, come auspicava Benjamin, realmente democratico.



L'Anno Europeo del Patrimonio Culturale 2018 ha rappresentato un momento cruciale per riflettere sull'importanza del patrimonio culturale e promuoverne il riconoscimento come risorsa essenziale, non solo dal punto di vista della memoria storica e dell'identità collettiva, ma anche per il suo potenziale economico e sociale. Grazie a questa iniziativa, si è avviato un dibattito ampio e inclusivo che ha coinvolto governi, istituzioni culturali e cittadini, mettendo in evidenza l'urgenza di nuove strategie di conservazione e fruizione che potessero integrarsi con i progressi della tecnologia digitale. Le indagini svolte nell'ambito dell'Anno Europeo del Patrimonio Culturale hanno dimostrato che la quasi totalità dei cittadini europei percepisce il patrimonio culturale come un elemento fondamentale non solo per la propria identità

personale, ma anche per la coesione sociale delle comunità locali, delle regioni, dei singoli Paesi e, in generale, dell'Unione Europea. Questo risultato ha evidenziato quanto sia diffusa la consapevolezza del ruolo centrale che il patrimonio culturale svolge nel miglioramento della qualità della vita: oltre sette europei su dieci ritengono che contribuisca direttamente al loro benessere e auspicano che gli Stati membri destinino maggiori risorse alla sua tutela e valorizzazione.

Tuttavia, dopo pochi anni, il contesto globale ci ricorda quanto il patrimonio culturale sia ancora vulnerabile, spesso minacciato da conflitti bellici, disastri naturali e attività umane che ne compromettono la conservazione. In Europa, così come in altre parti del mondo, molti tesori artistici e culturali sono stati intenzionalmente distrutti o gravemente danneggiati, sottolinean-

do l'urgenza di adottare una visione a lungo termine, in linea con gli obiettivi fissati nel 2018. Le azioni volte alla protezione, conservazione, riutilizzo, valorizzazione e promozione del patrimonio culturale non possono più essere rimandate. È fondamentale che il patrimonio continui a svolgere il suo ruolo di risorsa chiave per educare le generazioni future, sensibilizzare i cittadini alla storia comune e ai valori condivisi, e rafforzare il senso di appartenenza a un'identità europea comune.

In questo contesto, l'integrazione delle tecnologie digitali apre scenari completamente nuovi e altamente promettenti. Soluzioni innovative e all'avanguardia non solo consentono di aumentare l'impatto delle azioni di conservazione e valorizzazione, ma permettono di affrontare le sfide legate alla salvaguardia di beni che,

altrimenti, rischierebbero di essere persi per sempre. La protezione e la salvaguardia del patrimonio culturale sono strettamente legate a una conoscenza approfondita dei beni stessi, basata su una documentazione accurata. Le tecnologie digitali offrono un supporto inestimabile in questo senso, consentendo la creazione di copie digitali dettagliate e arricchite da informazioni e dati eterogenei relativi agli oggetti fisici. Questo processo di digitalizzazione consente di svincolare il patrimonio culturale dalla sua dimensione fisica, rendendolo accessibile in più parti del mondo simultaneamente. Inoltre, rende possibile la ricostruzione virtuale di opere danneggiate o distrutte a seguito di catastrofi, oppure l'uso dell'anastilosi virtuale per visualizzare la configurazione originaria di monumenti e opere architettoniche in epoche precedenti. La digitalizzazione rappresenta inoltre un'opportunità fondamentale per tramandare il patrimonio culturale alle generazioni future. Attraverso questo processo, esso può essere infatti

preservato in forma digitale, abilitando forme di narrazione e comunicazione innovative, grazie all'uso di tecnologie avanzate come la realtà estesa, arricchendo così l'esperienza dell'utente tramite nuovi modi di interagire con il patrimonio culturale e di esplorarlo, anche a distanza. Queste tecnologie risultano dunque fondamentali non solo per la promozione e la valorizzazione del patrimonio, ma anche per la sua diffusione e accessibilità, ampliando il pubblico e rendendo la fruizione culturale più inclusiva e immersiva.

Il presente volume si colloca all'interno di questo dibattito, con l'obiettivo di esplorare e presentare diverse metodologie che sfruttano le tecnologie digitali per documentare, replicare e valorizzare il patrimonio culturale, trasferendolo dal mondo fisico a quello digitale e virtuale. Nella prima parte del testo viene introdotto il tema della digitalizzazione del patrimonio culturale, analizzando dapprima gli aspetti teorici, poi i principali orientamenti forniti da documenti nazionali

e internazionali, e infine una rassegna delle tecnologie e delle tecniche di digitalizzazione oggi disponibili. Questa sezione fornisce una panoramica delle più avanzate metodologie di acquisizione digitale, sottolineando l'importanza di una documentazione accurata per garantire la riproduzione fedele e dettagliata dei beni culturali. La seconda parte del testo si concentra sulla fruizione digitale del patrimonio culturale attraverso le tecnologie di realtà estesa, evidenziando come i diversi livelli di virtualità – dalla realtà aumentata alla realtà virtuale – possano influire sull'interazione tra il patrimonio culturale e gli utenti. Viene discusso come l'applicazione di queste tecnologie possa migliorare l'accessibilità e l'esperienza di apprendimento per i visitatori, offrendo una maggiore interazione e immersione nei contenuti culturali. Infine, nell'ultimo capitolo, sono presentati alcuni esempi di rappresentazione digitale di beni culturali finalizzata alla loro fruizione. Ogni esperienza parte da una valutazione della più opportuna

soluzione per l'acquisizione e l'elaborazione di una replica digitale del bene considerato, quanto della sua più adatta modalità di fruizione. Questi esempi includono l'uso della realtà aumentata per ricostruire virtualmente le macchine di Leonardo da Vinci direttamente dai disegni del Codice Atlantico, permettendo agli utenti di esplorare modelli interattivi basati sui progetti originali dell'artista; la ricostruzione digitale dello Studiolo di Federico da Montefeltro nel Palazzo Ducale di Urbino, che ha consentito la creazione di un'esperienza virtuale immersiva in uno dei luoghi più iconici del Rinascimento italiano; infine, la digitalizzazione degli ambienti ipogei di Palazzo Campana, dove un rilievo integrato ha reso possibile la ricostruzione virtuale delle fragili superfici in arenaria, rendendo nuovamente accessibili le sue gallerie decorate a bassorilievi.



## Rappresentare il patrimonio culturale in digitale

---

Grazie all'immediatezza con cui consentono di raggiungere un vasto pubblico e all'infinita disponibilità di contenuti multimediali quali video, immagini e modelli tridimensionali, le tecnologie digitali sono divenute il mezzo privilegiato per la trasmissione di informazioni.

Come l'acqua, il gas o la corrente elettrica, entrano grazie a uno sforzo quasi nullo, provenendo da lontano, nelle nostre abitazioni per rispondere ai nostri bisogni, così saremo approvvigionati di immagini e di sequenze di suoni, che si manifestano a un piccolo gesto, quasi un segno, e poi subito ci lasciano.

Con queste parole Paul Valéry anticipava la situazione attuale, presagendo una società in cui l'opera d'arte avrebbe raggiunto la conquista dell'ubiquità. (Valéry, 2003) sarebbe poi stato ripreso qualche anno dopo da Walter

Benjamin nel suo (Benjamin, 2013), le cui riflessioni sulla riproducibilità tecnica dell'opera d'arte trovano pieno compimento nelle attuali soluzioni di rappresentazione digitale, che permettono di annullare la distanza tra l'opera d'arte e chi ne fruisce, offrendo la possibilità di riprodurre oggetti lontani nello spazio e nel tempo, persino quelli non più esistenti.

La replica digitale si sta così affermando quale nuovo standard per la rappresentazione di un bene culturale e come strumento in grado di assicurarne la trasmissione alle generazioni future e favorirne nuove forme di visualizzazione (Apollonio et al., 2021). In quest'ottica il suo rigore scientifico ne diviene l'aspetto chiave, così come delineato anche nella "Carta di Londra" (EPOCH, 2009). Punto centrale della Carta è il principio relativo alla Documentazione (Principio

4): esso cerca di contenere la spinta epistemologica della visualizzazione digitale attraverso l'organizzazione della documentazione utilizzata per arrivare alla visualizzazione, l'esplicitazione del procedimento attuato (paradata), l'individuazione chiara delle ragioni che sorreggono le ipotesi alla base della visualizzazione e, infine, l'adeguatezza dei documenti agli standard e alle ontologie di ciascuna comunità di soggetti. Le potenzialità della "Carta di Londra" sono state immediatamente recepite nel campo dell'Archeologia con la redazione della "Carta di Siviglia" (Lopez-Menchero and Grande, 2011) con i suoi otto principi: interdisciplinarietà, finalità, complementarità, autenticità, rigore storico, efficienza, trasparenza scientifica, formazione e valutazione. Essa ha così ulteriormente approfondito i temi espressi nella Carta di Londra,

dettandone linee guida di attuazione specifiche.

L'attenzione alla qualità dei contenuti culturali proposti tramite soluzioni digitali è dunque un aspetto fondamentale. La sua importanza è stata recepita anche dall'Unione Europea nelle strategie per il potenziamento della trasformazione digitale promosse per il quinquennio 2020-2025 (European Commission: Directorate-General for Communications Networks, 2020). Una delle tre priorità individuate è infatti proprio quella del miglioramento dei dati digitali, essendo ormai evidente come la scarsa qualità dei contenuti e dei metadati ad essi associati influisca in maniera fortemente negativa sull'accesso, sulla visibilità e sul riutilizzo dei contenuti digitali (Storeide et al., 2023).

Processi di elaborazione di repliche digitali di elevata qualità sono oggi resi possibili da diverse soluzioni tecnologiche che permettono di documentare in maniera sempre più rapida e accurata la realtà, ponendosi alla base dello sviluppo di metodologie per una

rappresentazione di ambienti e oggetti di qualità sempre maggiore (Münster et al., 2024). Infatti, se un tempo il rilevamento metrico era basato su di un numero ridotto di misurazioni e per garantire un buon grado di accuratezza si richiedevano tempi lunghi e particolare abilità dell'operatore, grazie alle nuove tecniche di documentazione digitale, le sue modalità sono state completamente rivoluzionate. I nuovi strumenti digitali permettono infatti di effettuare in tempi brevissimi un elevato numero di misurazioni, non rendendo più necessaria la selezione da parte dell'operatore dei punti utili alla restituzione grafica dell'oggetto indagato. Una maggiore efficienza, sia nella quantità che nella qualità dei dati acquisiti, che ha rapidamente portato le nuove soluzioni digitali a soppiantare le tradizionali tecniche di rilevamento metrico.

Sviluppati sulla base di differenti principi di funzionamento, numerosi sono i metodi di documentazione digitale applicabili anche nel settore del patrimonio culturale, conoscendone

le potenzialità ed i limiti, è possibile decidere di ricorrere alla più opportuna in relazione alle caratteristiche del bene da rilevare. Nonostante le recenti innovazioni apportate dal ricorso all'Intelligenza Artificiale (IA) (Kerbl et al., 2023; Mildenhall et al., 2021), la distinzione fondamentale rimane quella tra tecniche *image-based* e *range-based* (Remondino and Rizzi, 2010). Entrambe non prevedono il contatto diretto con l'oggetto da documentare, configurandosi come soluzioni non invasive che sfruttano strumenti ottici per renderne possibile una rappresentazione digitale tridimensionale. Le differenze nei processi e nei risultati derivano quindi dalla strumentazione utilizzata: le tecniche *image-based* ricorrono infatti a sensori passivi, in grado di registrare l'energia elettromagnetica emessa dagli oggetti presenti nella scena, mentre le tecniche *range-based* impiegano sensori attivi, che emettono energia elettromagnetica, come raggi laser o a infrarossi, e ne registrano il riflesso sulle superfici colpite. Per entrambe le soluzioni, la