



Università Politecnica delle Marche

Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria

Curriculum in Ingegneria Civile, Ambientale, Edile e Architettura

La riproducibilità digitale per un nuovo approccio alla documentazione e fruizione del Cultural Heritage.

Dottorando:
Renato Angeloni

Tutor:
Prof. Paolo Clini

Coordinatore curriculum:
Prof. Francesco Fatone

XXXIII ciclo

Indice

Introduzione.....	10
1. Per un nuovo Patrimonio Culturale digitale	14
2. Metodologie digitali applicate al Patrimonio Culturale	20
2.1 La documentazione digitale del Patrimonio Culturale	23
2.2.1 Tecniche image-based: la fotogrammetria digitale	28
2.2.2 Tecniche range-based: i sistemi di scansione 3D	42
2.2 La fruizione digitale del Patrimonio Culturale.....	51
2.2.1 La Realtà Aumentata	56
2.2.2 La Realtà Virtuale	60
2.2.3 La Realtà Mista	64
2.2.4 La Fabbricazione Digitale	67
3. Nuovi modelli di fruizione del Patrimonio Culturale	73

3.1	La ricostruzione virtuale per una fruizione “aumentata”. Le macchine di Leonardo da Vinci.	75
3.2	Dal rilievo integrato al racconto virtuale dello spazio. Il <i>Palazzo Ducale di Urbino</i> e lo <i>Studiolo del Duca</i>	98
3.3	La documentazione digitale per la tutela e valorizzazione del patrimonio ipogeo. Le Grotte di Palazzo Campana a Osimo.....	115
3.4	La documentazione digitale di spazi e opere per una visita virtuale dei luoghi della cultura. La Pinacoteca Civica di Ancona.....	135
	Conclusioni e sviluppi futuri.....	149
	Bibliografia	151
	Bibliografia tematica cronologica	172
	Sitografia.....	192
	Pubblicazioni.....	195

Indice delle figure

Figura 1 Tecniche di rilievo 3D disponibili, sensori e piattaforme in base alle dimensioni e alla complessità della scena (Nex & Remondino, 2014).....	24
Figura 2 Pipeline di elaborazione della nuvola di punti. Mentre l'uso di sensori attivi produce come output diretto dell'acquisizione una nuvola di punti, le tecniche image-based richiedono ulteriori elaborazioni intermedie del dato acquisito.	25
Figura 3 Comparazione tra il trend di popolarità e utilizzo tra metodi range-based e metodi image-based (Nex & Remondino, 2014).....	27
Figura 4 Raggio proiettante A'-A. Un unico fotogramma non permette di determinare in maniera univoca l'omologo del punto A' nello spazio oggetto.....	29
Figura 5 Intersezione dei due raggi proiettanti omologhi A'-A e A''-A, che consente l'individuazione del punto A nello spazio oggetto.	30

Figura 6 Schemi di ripresa fotografica panoramica cilindrica e sferica (De Luca, 2011).	32
Figura 7 Immagine panoramica sferica ottenuta dallo stitching di 8 immagini differenti. Acquisizioni eseguite con obiettivo fisheye a distanza focale fissa pari a 8mm.	33
Figura 8 Confronto tra la medesima immagine acquisita in formato raw (a sinistra) ed il risultato della sua postproduzione in formato jpg (a destra).....	35
Figura 9 Schema rappresentativo del sistema di presa fotografico e del significato di GSD (Nespeca, 2018).	36
Figura 10 Parametri di orientamento esterno tra sistemi di riferimento oggetto e immagine (Luhmann et al., 2011).	37
Figura 11 Reality-Virtuality Continuum (Milgram & Kishino, 1994).....	53
Figura 12 Diverse versioni di odometro, Codice Atlantico, f. 1r, 1500-1504 circa, Penna, inchiostro e inchiostro diluito, 195x261 mm, Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana.	78
Figura 13 Balestra gigante, Codice Atlantico, f.147v-a, 1485-1492 circa, Penna e inchiostro, incisioni in punta di stilo, 198x274 mm, Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana.	79
Figura 14 Prototipo virtuale 3D dell'odometro di Leonardo (al centro) e particolari della ruota f che fa cadere il ciottolo (in alto a sinistra) e della ruota n per la visualizzazione della distanza percorsa (in basso a destra).	86
Figura 15 Balestra gigante, Codice Atlantico, f.147v-b, 1485-1492 circa, Penna e inchiostro, incisioni in punta di stilo, 206x278 mm, Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana.	88
Figura 16 Prototipo virtuale della balestra gigante di Leonardo (in alto), particolare anteriore (in basso a sinistra) e del sistema di carica (in basso a destra).....	93

Figura 17 Modello, target, luci e arCamera all'interno dell'ambiente software Unity.	94
Figura 18 Visualizzazione del modello virtuale generato dall'applicazione. L'interazione con esso è resa possibile dal tocco delle dita sullo schermo e tramite un bottone che permette di attivarne il meccanismo.	95
Figura 19 Schermate applicazione LeonARdo: le macchine digitali.....	96
Figura 20 Pianta e sezione dello Studiolo del Duca.	102
Figura 21 A sinistra, confronto tra le acquisizioni fotografiche delle tarsie lignee senza e con filtro polarizzatore. A destra un'immagine del sistema di ripresa utilizzato. .	104
Figura 22 A sinistra, individuazione e dati delle stazioni laser scanner, a destra, individuazione degli scatti e progetto di presa fotografica di una parete.....	105
Figura 23 Mesh poligonale del soffitto a lacunari. A sinistra prima della decimazione (10 milioni di poligoni), a destra dopo (500 mila poligoni).	106
Figura 24 Mesh poligonale del soffitto a lacunari. A sinistra prima della decimazione (10 milioni di poligoni), a destra dopo (500 mila poligoni).	107
Figura 25 Mappe procedurali prodotte per la texturizzazione della pavimentazione.	108
Figura 26 Vista prospettica del livello delle tarsie lignee, modello texturizzato.	108
Figura 27 A sinistra, unwrapping della mappa base color relativa alla tavola di un dipinto e immagine del ritratto. A destra, la resa a seguito della renderizzazione. ..	109
Figura 28 Sezione prospettica e viste dello Studiolo del Duca, modello 3D renderizzato.	110
Figura 29 Illuminazione del modello virtuale: a sinistra luce point per l'illuminazione dei ritratti, a destra luce spot per l'illuminazione della pavimentazione.....	111
Figura 30 Fruizione di contenuti multimediali in ambiente VR. Schede descrittive e contenuti audio possono essere richiamati tramite i controller.	112

Figura 31 Osimo, Palazzo Campana. Vista della facciata principale.....	119
Figura 32 Planimetria delle Grotte di Palazzo Campana a Osimo. Individuazione nello sviluppo ad anello delle due gallerie caratterizzate dalla presenza di bassorilievi. .	120
Figura 33 Statue di figure inserite in nicchie a forma di conchiglie scavate nelle pareti della sala quadrata posta alla fine della prima galleria.....	121
Figura 34 Planimetria delle gallerie rilevate e sezione della galleria n.2, con indicazione delle stazioni di presa laser, dei target b/n e delle acquisizioni fotogrammetriche.	123
Figura 35 Acquisizione dei punti di controllo per georiferire i dati derivanti dalle scansioni laser.	124
Figura 36 Viste della nuvola di punti ottenuta dall'allineamento in Cyclone delle diverse scansioni effettuate.....	125
Figura 37 Rilievo fotogrammetrico del bassorilievo n.3 della galleria 2.	125
Figura 38 Dall'alto verso il basso. La nuvola di punti elaborata a partire dai dati delle scansioni laser. Una sezione longitudinale del modello mesh della galleria numero 2 e infine l'intero modello mesh della galleria numero 2.	126
Figura 39 Sezioni orizzontali a differenti quote delle due gallerie decorate con bassorilievi.	127
Figura 40 Sezioni verticali delle due gallerie decorate con bassorilievi.	128
Figura 41 Sezioni trasversali delle due gallerie decorate con bassorilievi.	128
Figura 42 Da sinistra, ortoimmagine del bassorilievo raffigurante il "Giudizio di Paride", modello mesh ottimizzato per la fresatura, riproduzione fisica finale a seguito del trattamento superficiale.....	130
Figura 43 Tour Virtuale delle Grotte Campana. Grazie a diversi hotspot è possibile passare da un'immagine panoramica alla successiva, simulando lo spostamento lungo le gallerie.	131

Figura 44 Visualizzazione di una delle gallerie, utilizzando un sistema HTC Vive per la realtà virtuale immersiva.	133
Figura 45 Nuvola di punti ottenuta da 133 scansioni laser terrestri dell'edificio che ospita la Pinacoteca Civica di Ancona.	139
Figura 46 Individuazione degli scatti di acquisizione per la copertura dell'edificio, progetto di presa e vista.....	140
Figura 47 Risultato dell'integrazione della nuvola di punti derivante dalle scansioni laser con quella delle coperture ottenuta per fotogrammetria aerea mediante drone	140
Figura 48 Sezione e pianta prospettica dell'edificio della Pinacoteca	141
Figura 49 Elaborazione fotogrammetrica della Pala Gozzi, prima opera datata del Tiziano.....	142
Figura 50 Integrazione della nuvola di punti dell'edificio con i modelli mesh delle opere. Vista della Pala Gozzi esposta nella Sala Zampetti	143
Figura 51 Schema concettuale che relaziona esperienza diretta del Patrimonio Culturale ed esperienza	145
Figura 52 Il tour virtuale fornisce informazioni sulle diverse sale e approfondimenti sulle singole opere	146
Figura 53 Utilizzo di visore per la realtà virtuale per un'esperienza immersiva delle sale e che permette di richiamare i modelli 3D delle opere in scala 1:1.	147

Indice delle tabelle

Tabella 1 Sintesi delle caratteristiche di funzionamento relative a Fotogrammetria (tecnica image-based) e Laser scanner (tecnica range-based) (M. Russo, Remondino, & Guidi, 2011)	26
Tabella 2 Sommario delle tecniche di fabbricazione per il CH. Le diverse soluzioni sono accompagnate da valutazioni qualitative basate sulla loro applicazione al CH (Scopigno, Cignoni, Pietroni, Callieri, & Dellepiane, 2017).....	68

Introduzione

Il presente lavoro di tesi ha avuto inizio nel 2018, *Anno Europeo del Patrimonio Culturale*, un'iniziativa volta a sensibilizzare all'importanza sociale ed economica di questa preziosa risorsa. Dalle indagini condotte in tale occasione, è emerso come la quasi totalità dei cittadini europei consideri fondamentale il Patrimonio Culturale (*Cultural Heritage*, CH) non solo a livello personale, ma anche per la propria comunità, regione, Paese e per l'Unione Europea nel suo insieme. Più di sette europei su dieci ritengono infatti che il CH produca un miglioramento nella qualità della loro vita e che gli Stati membri dovrebbero pertanto destinare maggiori risorse alla sua tutela.

Ma esattamente, che cosa è il nostro CH? Dai siti archeologici all'architettura contemporanea, dai castelli medievali alle tradizioni popolari, il CH europeo si configura come un complesso sistema di beni materiali ed immateriali, che insieme

costituiscono il cuore pulsante dell'identità collettiva e allo stesso tempo sono fonte insostituibile di creatività ed ispirazione per il futuro.

In un momento storico in cui tesori artistici sono minacciati e deliberatamente distrutti nelle zone di conflitto, l'*Anno europeo del Patrimonio Culturale* ha proposto sei obiettivi generali per la sua tutela: protezione, salvaguardia, riutilizzo, rafforzamento, valorizzazione e promozione; finalità oggi raggiungibili grazie al ricorso a soluzioni digitali sviluppate negli ultimi anni.

Partendo dai primi due obiettivi, protezione e salvaguardia, questi si fondano su una conoscenza approfondita del CH, aspetto che non può prescindere da una sua adeguata documentazione. Metodi e tecnologie innovative entrano in gioco *in primis* proprio nel supporto di tale operazione, offrendo la possibilità di creare esatte riproduzioni virtuali, integrabili con tutte le informazioni relative agli originali. Digitalizzare il CH permette così di svincolarlo dalla sua fisicità e farlo circolare contemporaneamente in più parti del mondo, consente di ricostruirlo dopo un evento catastrofico o di generarne processi di anastilosi virtuale, utili a visualizzarne la configurazione in epoche precedenti. Digitalizzare il CH significa anche tramandarlo alle future generazioni e renderne possibile una narrazione mediante forme di comunicazione innovative; è evidente quindi che anche altri tra gli obiettivi dichiarati, come valorizzazione e promozione, siano perseguibili mediante un processo di trasformazione digitale.

Lo studio condotto ha così previsto l'individuazione di una filiera di digitalizzazione del CH che, sfruttando diverse tecnologie disponibili, spaziasse in maniera lineare dall'acquisizione dei dati, finalizzata alla conoscenza del bene culturale, all'elaborazione di output per la sua valorizzazione e promozione. Tale metodo è stato dunque testato su diversi casi di studio, valutandone di volta in volta le specificità, pur ricercando soluzioni generalizzabili ad altri oggetti della medesima tipologia.

La prima parte di questo testo introduce il tema della digitalizzazione del CH, passando da aspetti teorici ai principali indirizzi, dettati da documenti nazionali ed internazionali. Nella seconda parte è invece affrontata la trattazione delle differenti tecniche di documentazione e di fruizione digitale dei modelli elaborati. Infine, nell'ultimo capitolo, sono riportate applicazioni pratiche elaborate nell'ambito di questo percorso di studi, ciascuna caratteristica per tipologia di bene culturale e filiera digitale applicata. Ogni esperienza ha preso in esame tanto la più opportuna soluzione per l'acquisizione e l'elaborazione di un *facsimile* digitale, quanto la più adatta modalità di fruizione, producendo come esito un'applicazione progettata in maniera da garantire all'utente finale un'efficace esperienza del bene culturale.

La realtà aumentata è stata applicata ai disegni delle macchine di Leonardo, per generare, direttamente dai fogli del *Codice Atlantico*, ricostruzioni virtuali elaborate secondo le indicazioni riportate nelle rappresentazioni e nei testi originali. Acquisizioni fotogrammetriche e laser scanner hanno permesso di sviluppare un'esperienza virtuale immersiva di uno dei più suggestivi luoghi del Rinascimento italiano: lo Studiolo di Federico da Montefeltro a Palazzo Ducale di Urbino. Il rilievo integrato degli ambienti ipogei di Palazzo Campana, finalizzato al monitoraggio delle sue fragili superfici in arenaria, ne ha permesso una ricostruzione virtuale e fisica in scala 1:1. Infine, la documentazione digitale della Pinacoteca Civica di Ancona, dell'edificio e della sua collezione, ha permesso un'analisi dello spazio espositivo e delle sue criticità, e costituito la base per una proposta di fruizione da remoto.

L'emergenza legata alla pandemia in atto è stata occasione per un'ulteriore dimostrazione del notevole valore del digitale per il raggiungimento degli obiettivi fissati con l'*Anno Europeo del Patrimonio Culturale 2018*. È infatti solo grazie a soluzioni digitali che alcune istituzioni museali hanno potuto continuare a garantire l'accesso ai loro luoghi della cultura, dimostrando, come mai prima d'ora, l'urgenza

di avviare in maniera sistematica il processo di trasformazione digitale del CH. In un ambito tanto attuale si inseriscono dunque le soluzioni proposte, presentando alcune innovazioni sia nella filiera di acquisizione dei dati che nella loro modalità di fruizione, con l'obiettivo di proporre delle applicazioni in grado di rendere il CH accessibile "dovunque e a chiunque", per un'esperienza più "evoluta", che non sia semplice replica di quella dell'opera originale.

1. Per un nuovo Patrimonio Culturale digitale

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

“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 digitali, 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. Il pensiero di Benjamin è quanto mai attuale anche negli aspetti legati alla riflessione del rapporto tra l'arte e le masse, e infatti, ancora oggi, tra le più sentite esigenze nell'ambito del CH troviamo quella del rafforzamento del legame tra patrimonio artistico e comunità. Un'esigenza che porta con sé la necessità di ripensare il rapporto tra quotidianità e CH, e che fa quindi nuovamente entrare in gioco i tanti strumenti digitali cui siamo costantemente connessi, quelle finestre privilegiate di accesso a contenuti di ogni tipo e potenzialmente in grado di trasformarsi anche in potenti mezzi di disseminazione culturale. Diversi sono i casi che dimostrano l'efficacia del richiamo delle nuove tecnologie al mondo del CH e la loro capacità di soddisfare quel desiderio di apprendimento, consapevole o inconsapevole, che trova radici in ognuno di noi. Gli strumenti digitali risultano infatti particolarmente attrattivi tanto per le giovani generazioni, ad essi più avvezze, quanto per quelle di età più avanzata, incuriosite dalle innovazioni tecnologiche e volenterose di colmare il gap nella familiarità con queste. Molti luoghi della Cultura sono però rimasti fermi ad una museologia tradizionale, impermeabile al cambiamento e finalizzata non tanto al visitatore, quanto a curatori ed altri operatori specializzati. Storici dell'arte ed archeologici dovrebbero invece potersi esprimere con nuovi linguaggi, che rendano possibile la creazione di ambienti digitali in grado di offrire al visitatore gli strumenti necessari al confronto con l'opera d'arte o con i reperti archeologici. Una digitalizzazione finalizzata dunque all'esaltazione del

rapporto tra il bene culturale e l'utente che ne fruisce, poiché senza questa premessa, concentrandosi solamente sulla soluzione tecnologica, non è di certo possibile avviare un percorso virtuoso di trasformazione nell'approccio al CH. Numerose esperienze che hanno fatto ricorso a soluzioni di questo tipo, hanno infatti dimostrato ricorrenti difetti. Nonostante tecnologie di altissimo livello e tecniche enfatiche di stordimento, potenzialmente utili ad innescare processi mnemonici, il loro racconto è risultato spesso debole, troppo concentrato sull'aneddoto biografico e carente in termini di accesso alla vera conoscenza dei contenuti culturali. Il panorama cognitivo legato agli ambienti digitali e le narrazioni complesse che possono collegarsi al CH dovrebbero strutturarsi su una costante evoluzione del racconto, un'aspettativa che nasce in maniera spontanea nel pubblico che si avvicina a tali soluzioni e che non può essere invece soddisfatta dai tradizionali allestimenti statici. È dunque quanto mai necessario sfruttare le potenzialità degli ambienti digitali per offrire questa evoluzione della narrazione, il cui successo è già stato dimostrato dalle prime esperienze di *gaming* o di utilizzo di fumetti di alta qualità per il racconto dei musei.

Una particolare attenzione va poi riposta negli sviluppi della rappresentazione digitale tridimensionale, in grado di offrire esperienze di ricostruzione ambientale di grande impatto, ma che non devono trascurare la rigosità scientifica. Le riproduzioni digitali, che si stanno via via affermando come nuovo standard per la registrazione delle forme e delle caratteristiche dei beni culturali e come strumento per assicurarne la trasmissione alle generazioni future, non possono infatti prescindere dal rispetto di principi che ne assicurino una visualizzazione intellettualmente e tecnicamente rigorosa. Lo sviluppo di tali soluzioni non può che partire dal rispetto dei concetti espressi nella "Carta di Londra"¹ (EPOCH, 2009), documento fondamentale che ha

¹ <http://www.londoncharter.org/>

dettato indirizzi metodologici di carattere generale, volti al raggiungimento di una certa conformità operativa da parte degli interessati alla ricerca e alla divulgazione del CH, tra contesti accademici, educativi, culturali, commerciali e turistici. 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 ed 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 & 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 Union, 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.

Affinché l'accesso al CH porti a cambiamenti sociali ed economici positivi e la tecnologia digitale possa realmente supportare ed accelerare tale cambiamento, è dunque necessario applicarla considerando alcuni valori fondamentali, che trovano

espressione in alcune linee guida per una digitalizzazione consapevole ed efficace del CH. Dando seguito a tali riflessioni, in Italia è stato ad esempio redatto il “Piano Triennale per la Digitalizzazione e l’Innovazione dei Musei” (Direzione generale Musei - MIBACT, 2019), che fornisce un quadro di riferimento per l’adozione di soluzioni digitali, considerate fondamentali per migliorare le capacità di gestione, tutela, esposizione, narrazione, accesso e fruizione del CH, ponendo i seguenti obiettivi:

1. Migliorare la capacità di tutti i musei aderenti al Sistema Museale Nazionale di gestire il Patrimonio, sia incrementando l’efficacia e l’efficienza dei processi di tutela (conservazione, sicurezza, catalogazione), sia stimolando nuovi percorsi di valorizzazione grazie alla creazione di modelli digitali in grado di rappresentare il bene, di facilitarne l’accesso e la distribuzione.
2. Migliorare la capacità dei musei di proporre il CH ai propri interlocutori, sia in termini di esposizione e narrazione delle opere, che in termini di commercializzazione di servizi correlati e aggiuntivi.
3. Rendere i musei spazi aperti di condivisione con i visitatori, gli studiosi, gli altri musei nazionali e internazionali, abilitando modalità innovative di scambio e di comunicazione.
4. Attivare nuove forme di accesso e fruizione dei dati relativi al patrimonio, mediate o abilitate da soluzioni tecnologiche.
5. Attivare azioni per stimolare le imprese ed il mondo produttivo privato ad offrire prodotti e servizi a valore aggiunto negli ambiti delineati dal Piano.

La digitalizzazione è così individuata come processo di trasformazione complesso, articolato e diffuso, che coinvolge il mondo dei beni culturali a 360° ed il cui focus è mantenuto sul miglioramento continuo delle modalità di funzionamento del museo (servizi interni) e delle potenzialità di fruizione offerte al visitatore (servizi agli ospiti).

Nel contesto di questo processo di digitalizzazione del CH, il successivo capitolo presenta ed approfondisce dunque alcuni dei metodi e degli strumenti utili al raggiungimento degli obiettivi prefissati.

2. Metodologie digitali applicate al Patrimonio Culturale

La Digitalizzazione è comunemente definita come processo di conversione di grandezze analogiche in informazioni digitali (Istituto dell'Enciclopedia Italiana, 1996). Digitalizzare un suono, un'immagine o un testo significa trasformarli [...] in un segnale che può essere archiviato o modificato con un computer, conservato più a lungo, o trasmesso a distanza in modo più efficiente (Nosengo, 2005). Nel settore del Patrimonio Culturale (*Cultural Heritage*, CH) ciò si traduce nella possibilità di rendere fruibile su supporto digitale la rappresentazione di un certo bene culturale, a seguito di sue opportune misurazioni.

La crescente disponibilità di soluzioni tecnologiche digitali in grado di documentare in maniera sempre più rapida ed accurata la realtà, ha permesso infatti la definizione

di metodologie per l'esatta riproduzione tridimensionale di ambienti e oggetti (Lerma, Navarro, Cabrelles, & Villaverde, 2010a; Nuttens, De Maeyer, De Wulf, Goossens, & Stal, 2009; Remondino, 2011). Se però la tradizionale idea di copia è quella di duplicato dell'originale, un *facsimile* digitale offre esperienze che vanno oltre la fisicità dell'opera stessa, costituendo il punto di partenza per una comunicazione del CH in grado di sfruttare nuovi sistemi di visualizzazione e le loro molteplici potenzialità (Demetrescu, d'Annibale, Ferdani, & Fanini, 2020). Infatti, rispetto alle rappresentazioni tradizionali come disegni, dipinti o plastici, i modelli digitali permettono di adattare i contenuti a nuove interpretazioni e forniscono un'interattività in grado di avvicinare l'utente al bene culturale, rendendolo più democratico e popolare (P. Clini, Ruggeri, Angeloni, & Sasso, 2018; B. Jiménez Fernández-Palacios, Rizzi, & Remondino, 2015). Grazie a tali potenzialità, il *facsimile* digitale trova così numerosi ambiti di applicazione: dalla creazione di musei e biblioteche virtuali allo sviluppo di *serious game* (Lampis, 2020; Pescarin et al., 2020), fino alla diffusione di nuove pratiche come il restauro virtuale (Limoncelli & Scardozi, 2015); esperienze innovative in grado di rivoluzionare il lavoro dei curatori museali, supportandoli nel controllo e nel miglioramento dei percorsi espositivi (Lo Turco & Giovannini, 2020), o ancora quello degli archeologi, introducendo nuovi modi di collaborazione, di registrazione degli scavi e di ripristino dei reperti (Galeazzi, Moyes, & Aldenderfer, 2014; Gargaro, Cigola, Gallozzi, & Zordan, 2019; Merlo, Aliperta, & Montuori, 2017). Lo sviluppo di tali soluzioni è stato accompagnato da una loro rapida diffusione a livello globale, portando ad un riconoscimento dell'efficacia della digitalizzazione in numerosi processi culturali, anche in risposta a situazioni critiche. Un ruolo fondamentale è ad esempio quello giocato nella prevenzione della perdita e della dispersione del CH connesse a catastrofi naturali o eventi dolosi (Fangi, 2019). La disponibilità di un *facsimile* digitale rappresenta infatti in questi casi un significativo

strumento di tutela del bene culturale, rendendone possibile anche la ricostruzione (Arbace et al., 2013; Wilson, Rawlinson, Frost, & Hephher, 2018). Un'ulteriore sfida affrontata è poi quella della pandemia di Covid-19 (NEMO, 2020). Nonostante la chiusura forzata, grazie al digitale, diversi luoghi della cultura hanno potuto offrire soluzioni alternative di fruizione delle loro collezioni e dei loro spazi (Zuanni, 2020), proponendo l'innovativa visione che, laddove non sia possibile arrivare fisicamente ai luoghi della cultura, siano questi a doversi muovere grazie alla rete. Un tema, quello dell'accessibilità, che la digitalizzazione permette di declinare non solo rendendo fruibile il CH nell'impossibilità di una visita fisica, sia essa dovuta a chiusure o a forme di disabilità dell'utenza, ma anche permettendo di superare la mancanza di spazio fisico per esporre oggetti e storie, altrimenti dormienti in depositi o archivi (Giovannini, Lo Turco, & Mafri, 2019; Lo Turco et al., 2019).

Tante sono dunque le ragioni per cui la digitalizzazione del CH non può più essere considerata solo come una possibilità a disposizione di alcuni, si tratta ormai di una necessità primaria per un'efficace tutela del legame tra cultura e comunità, una soluzione per valorizzare il passato, comprendere il presente e progettare il futuro.

In questo scenario generale, il secondo capitolo di questa tesi analizza dunque i metodi e le forme più diffuse di documentazione e fruizione digitale, evidenziandone tanto le grandi potenzialità quanto alcuni limiti ancora da superare.

2.1 La documentazione digitale del Patrimonio Culturale

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, oggi, 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 rilevato. 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.

Sviluppate sulla base di differenti principi di funzionamento, numerosi sono oggi i metodi di documentazione digitale applicabili anche nel settore del CH, conoscendone le potenzialità ed i limiti, è possibile decidere di ricorrere alla più opportuna in relazione alle caratteristiche della scena da rilevare (Figura 1).

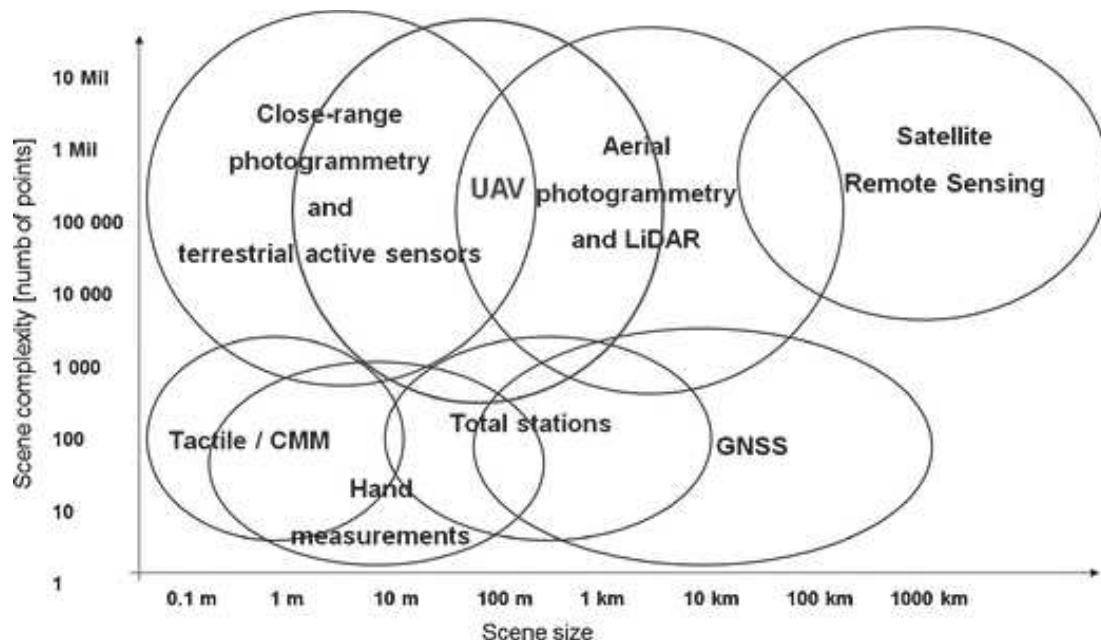


Figura 1 Tecniche di rilievo 3D disponibili, sensori e piattaforme in base alle dimensioni e alla complessità della scena (Nex & Remondino, 2014)

Una prima distinzione fondamentale è quella tra tecniche *image-based* e *range-based*. 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 ad infrarossi, e ne registrano il riflesso sulle superfici colpite (Guidi, Russo, & Beraldin, 2010). Per entrambe le soluzioni, il primo output è una nuvola di punti della scena indagata, ovvero una sua rappresentazione geometrica tridimensionale, costituita da elementi discreti. Tuttavia, mentre tramite tecniche *range-based* la nuvola di punti viene automaticamente elaborata a partire dal dato metrico acquisito, ricorrendo a

quelle *image-based* è necessario applicare alle immagini algoritmi matematici in grado di ricavarne informazioni tridimensionali. Inoltre, non derivando da misurazioni metriche, le nuvole di punti elaborate tramite tecniche *image-based* debbono essere ulteriormente scalate, ricorrendo ad almeno una misura nota (Figura 2).

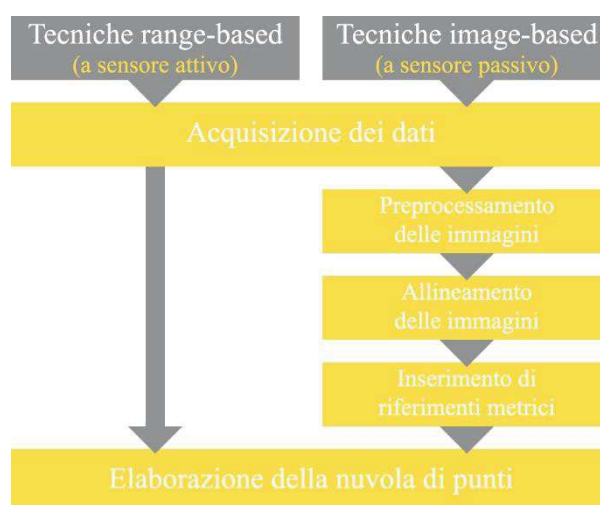


Figura 2 Pipeline di elaborazione della nuvola di punti. Mentre l'uso di sensori attivi produce come output diretto dell'acquisizione una nuvola di punti, le tecniche *image-based* richiedono ulteriori elaborazioni intermedie del dato acquisito.

L'elaborazione della medesima tipologia di output, seppur a seguito di processi differenti, rende però possibile l'integrazione dei risultati ottenuti tramite le due differenti tecniche. Una soluzione largamente applicata nell'ambito del CH (Magda Ramos & Remondino, 2015) che permette, come dimostrato in (Liang et al., 2018), di superare le specifiche problematiche legate alle caratteristiche dell'una e dell'altra tecnica (Tabella 1), per una completa documentazione digitale anche di scene particolarmente complesse e articolate.

Tabella 1 Sintesi delle caratteristiche di funzionamento relative a Fotogrammetria (tecnica *image-based*) e Laser scanner (tecnica *range-based*) (M. Russo, Remondino, & Guidi, 2011)

Caratteristiche	Fotogrammetria (<i>Image-Based Modeling</i>)	Laser scanner (<i>Range-Based Modeling</i>)
Costo strumentazione (HW e SW)	Contenuto	Elevato
Maneggevolezza	Ottima	Sufficiente
Tempi per l'acquisizione dei dati	Minori	Maggiori
Tempi per la modellazione	Maggiori	Minori
Informazioni 3D	Da derivare	Dirette
Dipendenza dalla distanza	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalle dimensioni	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dal materiale	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalla luce ambientale	Dipendente	In parte/del tutto Indipendente
Dipendenza dalla geometria	Abbastanza dipendente	Indipendente
Dipendenza dalla texture	Dipendente	Indipendente
Scala/metricità	Assente/da fornire	Implicita (1:1 con dato reale)
Volume dei dati	Dipende dalla risoluzione delle immagini e dal tipo di misure	Nuvola di punti densa
Modellazione dei dettagli fini	Buona/ottima	Ottima
Texture	Inclusa	Assente/bassa risoluzione
Rilievo di spigoli	Ottimo	Abbastanza problematico
Analisi quantitative/statistiche	Per ogni punto calcolato	Globale
Software open-source	Molto pochi	Molto pochi

La scelta tra le due differenti soluzioni è poi nel tempo dipesa anche dalla loro affidabilità, con le tecniche *range-based* che hanno trovato per lungo periodo un più diffuso utilizzo. Nell'ultimo decennio, i grandi passi in avanti compiuti nella definizione di algoritmi fotogrammetrici, hanno invece supportato la riscoperta e la conseguente diffusione delle tecniche *image-based* (Figura 3), favorite anche da alcuni vantaggi come il minor costo degli strumenti e la possibilità di elaborare *texture* dettagliate (Skarlatos & Kiparissi, 2012).

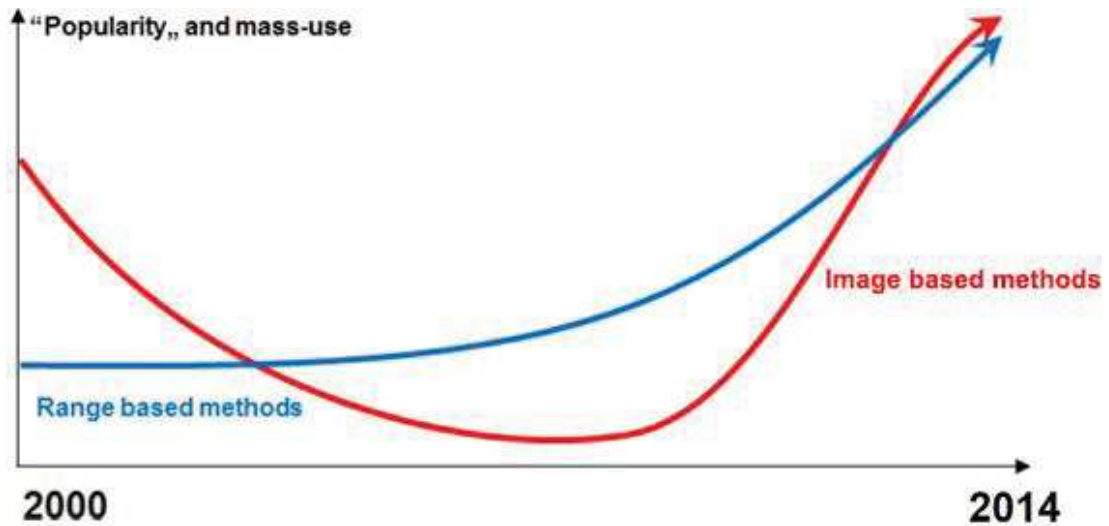


Figura 3 Comparazione tra il trend di popolarità e utilizzo tra metodi range-based e metodi image-based (Nex & Remondino, 2014).

Per un maggiore approfondimento, seguendo questa distinzione tra tecniche *image-based* e *range-based*, nei paragrafi successivi si riportano distintamente i principi teorici, e di acquisizione ed elaborazione dei dati, per i metodi di documentazione digitale applicati ai casi di studio presentati nell'ultimo capitolo, ovvero la fotogrammetria digitale e i sistemi di scansione laser.

2.2.1 Tecniche image-based: la fotogrammetria digitale

Le tecniche *image-based* consentono una ricostruzione tridimensionale *reality-based* a partire da immagini bidimensionali. Tra queste, nell'ambito del CH, la fotogrammetria è certamente quella che trova maggiore diffusione. Basata su principi e metodi della prospettiva, già elaborati in epoca rinascimentale, nasce e si sviluppa con l'avvento della fotografia. Al primo approccio pionieristico del XIX secolo, segue un'evoluzione strettamente legata agli avanzamenti tecnologici del Novecento. Tali sviluppi sono in particolare connessi dapprima alla fotogrammetria aerea, quindi alla diffusione dei calcolatori elettronici. Proprio il ricorso al computer nell'elaborazione fotogrammetrica ne sancisce il passaggio da un'impostazione analogica ad una analitica, rendendo possibile ottenere da una coppia stereoscopica di fotogrammi la relativa proiezione ortogonale, tramite lo sviluppo numerico di equazioni risolte dal calcolatore elettronico. Una rivoluzione completata con lo sviluppo della fotografia digitale che, grazie all'elaborazione di immagini in forma numerica, ha reso possibile il passaggio della fotogrammetria alla sua fase digitale, in cui tutte le operazioni sono svolte in maniera automatica tramite computer. Oggi, grazie al continuo affinamento nei di elaborazione delle immagini, la fotogrammetria garantisce il raggiungimento di risultati di ricostruzione tridimensionale paragonabili a quelli derivanti dall'applicazione di tecniche *range-based*, godendo però di una maggiore diffusione grazie all'utilizzo di strumentazioni ben più economiche.

Alla base del processo fotogrammetrico vi è la definizione di una relazione geometrica tra i punti dell'oggetto e la loro rappresentazione nelle immagini, ad ogni punto dell'oggetto tridimensionale (spazio oggetto) corrisponde infatti un punto omologo sul piano della fotografia (lastra). Al fine di determinare tale relazione una singola immagine non è però sufficiente, poiché, come si può osservare dalla (Figura 4), il punto A' sul piano della lastra con centro di presa O' non è soltanto l'omologo del punto A effettivamente appartenente all'oggetto, ma anche di tutti gli infiniti punti che si trovano sulla stessa retta.



Figura 4 Raggio proiettante $A'-A$. Un unico fotogramma non permette di determinare in maniera univoca l'omologo del punto A' nello spazio oggetto.

Per determinare la posizione tridimensionale di un punto nello spazio oggetto, è dunque necessaria l'intersezione di almeno due raggi proiettanti omologhi, appartenenti a immagini differenti (Figura 5).



Figura 5 Intersezione dei due raggi proiettanti omologhi $A'-A$ e $A''-A$, che consente l'individuazione del punto A nello spazio oggetto.

Sulla base di tale principio generale si è dunque definito un *workflow* per una corretta applicazione della tecnica fotogrammetrica in cui si possono distinguere tre fasi operative consequenziali:

1. Acquisizione: fase in cui viene effettuata la presa delle immagini;
2. Orientamento interno ed esterno: fase di individuazione dei parametri che consentono di stabilire la posizione nello spazio dei centri di presa e delle lastre al momento dell'acquisizione;
3. Restituzione: fase di ricostruzione dell'oggetto con tutte le sue caratteristiche morfologiche, colorimetriche e dimensionali.

La fase di acquisizione ha inizio con la progettazione delle operazioni di ripresa, momento in cui, sulla base delle caratteristiche dell'oggetto, della fotocamera

utilizzata, nonché del livello di dettaglio atteso, sono determinati numero e posizioni degli scatti da effettuare.

A livello operativo tale fase è influenzata dalla complessità geometrica e volumetrica del sito, manufatto od oggetto, e dalle condizioni di accessibilità, visibilità ed illuminazione dell'ambiente. Una prima considerazione a livello generale è quella che, per quanto possibile, distanza di acquisizione, posizione e orientamento della camera, e quantità di immagini siano pianificate in modo tale che l'oggetto venga ripreso nella sua interezza, occupando un'ampia porzione dell'immagine, per sfruttarne appieno la risoluzione e poterne estrarre così quante più informazioni possibili. Va detto che la complessità dell'acquisizione è poi soprattutto legata alla quantità di piani dominanti che compongono la scena da rilevare, e sulla base di questa debbono essere eseguite ulteriori valutazioni. Ad esempio, la presenza di diversi piani di profondità dell'oggetto porta a prediligere punti di vista obliqui rispetto ai piani principali, in modo da garantire l'acquisizione di un maggior numero di informazioni tridimensionali. In generale si può ricorrere a due tecniche principali: la ripresa ad assi convergenti e quella ad assi paralleli. Nel primo caso la distanza dall'oggetto si mantiene costante e gli scatti sono eseguiti girando attorno ad esso, mirando al suo baricentro con l'asse di mira a $30/45^\circ$ rispetto ai principali piani caratteristici dominanti. Ricorrendo ad un'acquisizione ad assi convergenti, rimane comunque consigliato eseguire anche scatti in modo parallelo al piano dominante, al fine di evitare la presenza di eventuali zone d'ombra tra due immagini convergenti consecutive e di garantire, per le successive elaborazioni, una migliore qualità della *texture*. La ripresa ad assi paralleli viene invece eseguita quando l'obiettivo finale è la restituzione di un elaborato bidimensionale, come una facciata, e non si ha la necessità di una precisa rappresentazione di tutti i piani di profondità degli elementi decorativi. Tale acquisizione permette infatti l'elaborazione di un'ortoimmagine del piano

acquisito, la cui risoluzione è funzione della distanza dall'oggetto in fase di presa e della sovrapposizione delle immagini, uno strumento particolarmente utile in diverse applicazioni, come ad esempio la mappatura del degrado.

Un'ulteriore tecnica ripresa è quella panoramica. Essa consiste nell'esecuzione da un unico punto di vista di più fotografie che saranno poi assemblate in un'unica immagine. A tal fine ogni scatto deve presentare un'adeguata sovrapposizione con quello precedente e la rotazione da uno scatto al successivo deve avvenire attorno al centro ottico (Figura 6).

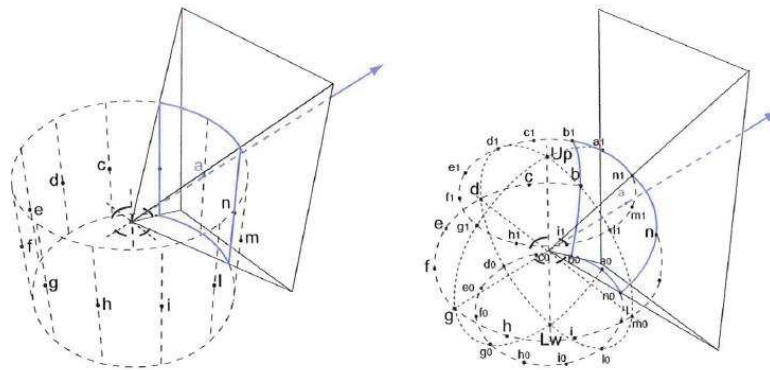


Figura 6 Schemi di ripresa fotografica panoramica cilindrica e sferica (De Luca, 2011).

Per la corretta esecuzione di tale tecnica è necessario l'utilizzo di un treppiede dotato di testa panoramica, strumento in grado di garantire un adeguato controllo per questo tipo di acquisizione. Valutata la percentuale di sovrapposizione (P), necessaria per la fase di *stitching*, ovvero di unione dei singoli fotogrammi, il numero di scatti (N) che saranno necessari per l'elaborazione finale dipende dalla focale (f) utilizzata e dalla dimensione (w) del sensore. Questi due fattori determinano infatti l'angolo di campo visivo (α):

$$\alpha = 2 \times \arctan[(w/2)/f]$$

Di conseguenza, sulla base dell'angolo di ripresa atteso nell'immagine panoramica finale (β), solitamente 180° o 360° , si può definire il numero necessario di scatti (N):

$$N = \beta / [(P/100) \times \alpha]$$

Il valore percentuale di sovrapposizione (P) consigliato è generalmente indicato tra il 25% ed il 40%, ed è uno dei principali fattori da cui dipende la riuscita del processo di *stitching* dell'immagine panoramica. Laddove infatti non vi sia una sufficiente sovrapposizione il software impiegato in tale elaborazione potrebbe non essere in grado di trovare sufficienti punti comuni tra le immagini per eseguire la ricostruzione dell'immagine panoramica (Figura 7).



Figura 7 Immagine panoramica sferica ottenuta dallo stitching di 8 immagini differenti. Acquisizioni eseguite con obiettivo fisheye a distanza focale fissa pari a 8mm.

Oltre ad una corretta esecuzione della tecnica di ripresa scelta, per garantire l'efficacia del processo di documentazione tridimensionale dell'oggetto rilevato, è fondamentale la qualità delle immagini, fattore determinante per tutte le fasi successive di elaborazione fotogrammetrica. Pertanto è necessario che i singoli scatti:

- siano nitidi e ben definiti: da evitare ad esempio il micromosso causato da leggeri movimenti della fotocamera durante l'acquisizione, utilizzando pertanto nell'esecuzione degli scatti quanto più possibile un treppiede o comunque un tempo di ripresa molto breve;
- non presentino rumore fotografico: a tal fine l'utilizzo di valori di ISO alti è fortemente sconsigliato;
- siano a fuoco: l'oggetto da ricostruire deve essere completamente a fuoco e pertanto, in fase di progettazione dell'acquisizione vanno valutate la distanza dall'oggetto, l'apertura del diaframma e la distanza focale. Nel caso in cui, pur controllando tali parametri, non fosse possibile avere l'oggetto interamente a fuoco occorre ricorrere a specifiche tecniche di ripresa fotografica, come in (P. Clini, Frapiccini, Mengoni, Nespeca, & Ruggeri, 2016).

Un ulteriore possibile accorgimento, per una qualità ottimale, è quello di scattare in formato RAW. Questo metodo di memorizzazione dei dati descrittivi di un'immagine permette infatti di non avere perdita di qualità durante la registrazione. Tramite software specifici, questi file possono poi essere opportunamente corretti e successivamente memorizzati in formato JPG o TIFF (Figura 8).

La fase di presa risulta infine determinante per il grado finale di dettaglio della ricostruzione, vincolato alla distanza di presa dall'oggetto da rilevare, alla distanza focale con cui le immagini sono acquisite e alle caratteristiche del sensore della fotocamera. Già nella progettazione dell'acquisizione il grado di dettaglio finale deve essere dunque valutato tramite il calcolo del *Ground Sample Distance* (GSD), valore definito come la distanza tra il centro di due pixel consecutivi dell'immagine misurata sull'oggetto reale.

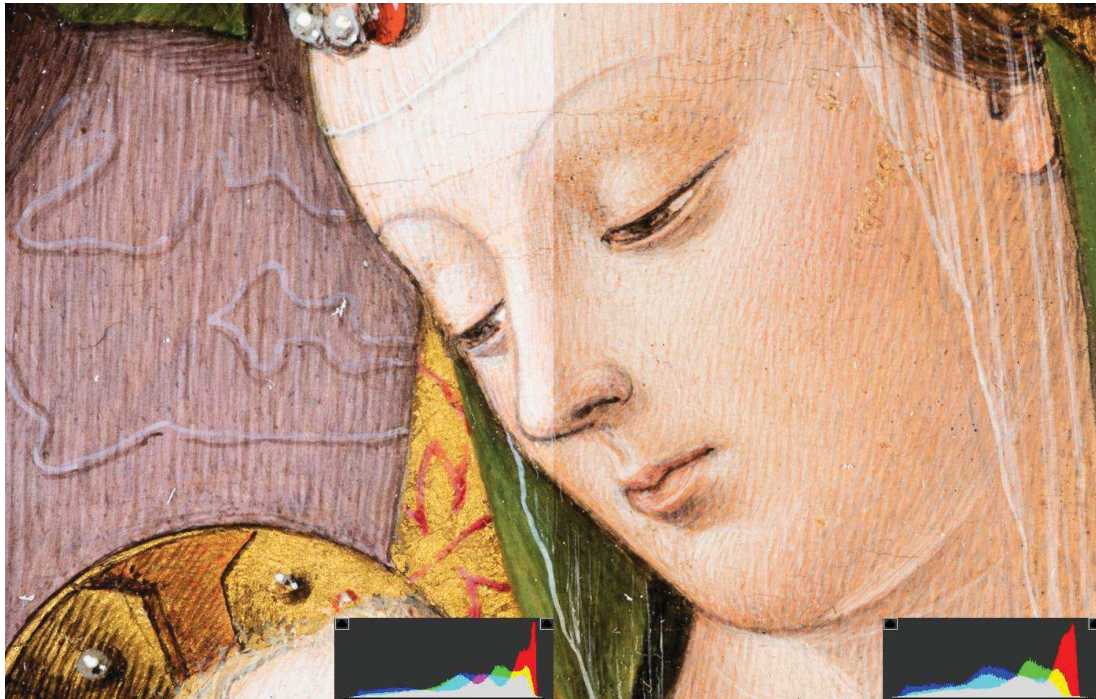


Figura 8 Confronto tra la medesima immagine acquisita in formato raw (a sinistra) ed il risultato della sua postproduzione in formato jpg (a destra).

Come rappresentato in (Figura 9), conoscendo la grandezza del sensore fotografico (w), la distanza focale (f) e la distanza dall'oggetto (D), si può ricavare con una semplice relazione geometrica la porzione di scena reale (W) che viene immortalata nel fotogramma (*footprint*). Note la dimensione del sensore (w) e il numero di pixel in esso contenuti (leggibili nei dati exif dell'immagine) può essere invece calcolata la grandezza di un singolo pixel come rapporto tra questi due valori. È così infine facilmente determinato il GSD che dipende dalla distanza di presa D , dalla distanza focale (f) e dalla grandezza del pixel (px):

$$GSD=(D \times px)/f$$

La relazione tra la scala finale e il GSD è espressa dal rapporto:

Denominatore di scala=GSD/errore di graficismo

dove l'errore di graficismo, così come tradizionalmente definito, è quello che si commette nel tracciare un particolare lineare con un segno grafico il più sottile possibile, tenuto conto dell'accuratezza visiva, e viene generalmente considerato pari a 0,2.

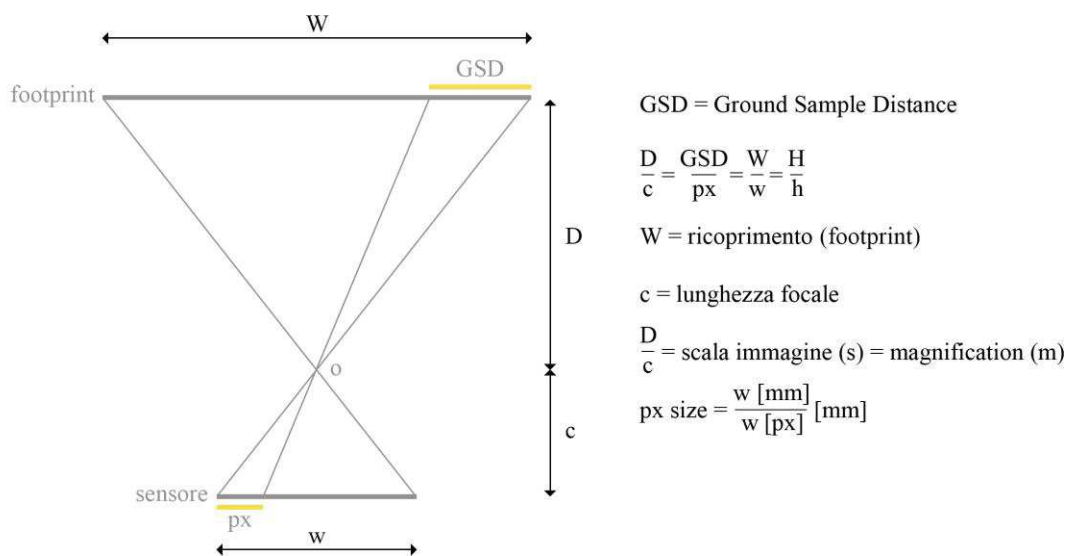


Figura 9 Schema rappresentativo del sistema di presa fotografica e del significato di GSD (Nespeca, 2018).

Correttamente conclusa la fase di acquisizione è possibile passare a quella di orientamento delle immagini acquisite. Essa costituisce il passaggio centrale nella ricostruzione dell'oggetto rilevato, determinando le posizioni nello spazio dei fotogrammi, necessarie per ottenere il modello tridimensionale finale. L'orientamento può essere distinto in interno ed esterno: il primo consente la ricostruzione dei fasci proiettivi per ciascuna immagine, il secondo ha come esito il loro ricollocamento nella posizione spaziale al momento della presa. La fotografia è infatti riconducibile ad una prospettiva centrale, in cui i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto ritratto con le loro corrispondenti immagini (stella proiettante) si intersecano in un punto O, detto

centro di presa. Vanno però tenute in considerazione le distorsioni che l'obiettivo fotografico introduce: le posizioni reali dei punti sulle immagini si discostano infatti leggermente da quelle prevedibili applicando lo schema ottico teorico; tali deformazioni sono infatti ridotte, ma non trascurabili. Esse dipendono dalla posizione dei punti rispetto all'asse ottico, tanto più sono distanti da questo tanto maggiore sarà l'alterazione. Utilizzando la medesima fotocamera con lo stesso obiettivo ed impostazioni per tutte le prese, tali deformazioni possono essere assunte costanti e quindi corrette con appositi diagrammi forniti dalla casa costruttrice della fotocamera nei certificati di calibrazione. Ricomposti i fasci proiettivi con l'operazione di orientamento interno, si passa all'orientamento esterno andando a determinare per ciascun fotogramma tanti parametri incogniti quanti sono i movimenti che definiscono la posizione di un corpo rigido nello spazio: 3 traslazioni e 3 rotazioni.

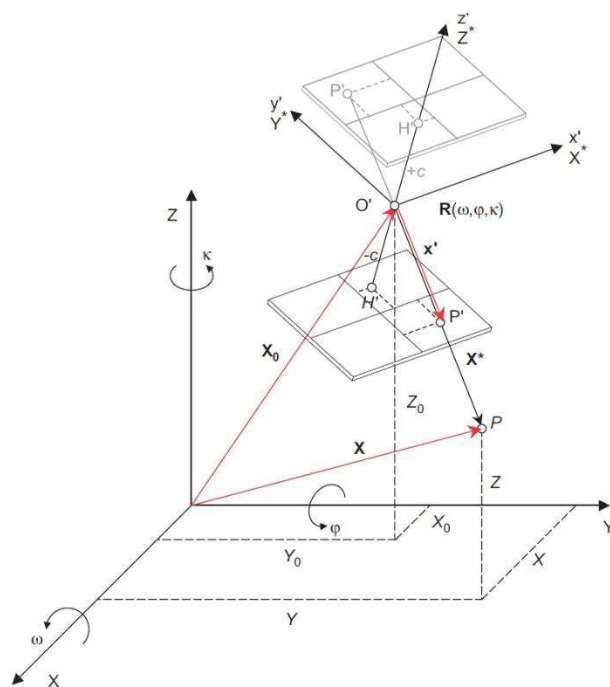


Figura 10 Parametri di orientamento esterno tra sistemi di riferimento oggetto e immagine (Luhmann et al., 2011).

In particolare, la posizione del centro di presa O' nel sistema $OXYZ$ è definita dal vettore X_0 , mentre le 3 rotazioni ω , φ e κ indicano gli angoli tra il sistema di coordinate immagine ed il sistema di coordinate oggetto (Figura 10).

La matrice che risulta dal prodotto delle singole matrici di rotazione moltiplicate in ordine inverso è:

$$R = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega}$$

La posizione di P' , proiezione del punto P su un fotogramma può essere ottenuta considerando le componenti di un vettore X , così definito:

$$X = X_0 + X^*$$

Il centro della prospettiva O' , il punto immagine P' ed il punto oggetto P giacciono sulla stessa retta, definita "retta di collinearità". Noti i parametri di orientamento interno ed esterno, le equazioni dei punti appartenenti ad una retta di collinearità sono:

$$X = X_0 + \lambda R x'$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

dove λ è un valore incognito che varia per ogni punto oggetto. Con una sola immagine, sarà definibile unicamente la distanza $O'P$ ma non la posizione spaziale di P . Conoscendo, invece, i parametri di orientamento interno ed esterno, otterremo un sistema di tre equazioni in quattro incognite. L'univoca determinazione della posizione spaziale di P è allora possibile quando la direzione $O'P$ interseca o un'altra retta di collinearità oppure un piano. Invertendo l'equazione precedente ed introducendo le coordinate del Punto Principale e i correttivi per le distorsioni radiali $\Delta x'$ si ottiene:

$$\overline{X' - X'_o - \Delta x'} = \frac{1}{\lambda} R^{-1} (\overline{X - X'_o})$$

$$\begin{bmatrix} x'_p - x'_o - \Delta x' \\ y'_p - y'_o - \Delta y' \\ c \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}$$

Trasportando i termini correttivi delle distorsioni radiali e le coordinate del Punto Principale, dividendo poi la prima e la seconda equazione per la terza si ottengono le equazioni di collinearità, che definiscono una relazione univoca tra il centro della prospettiva, il punto nello spazio immagine ed il punto nello spazio oggetto:

$$x'_p = x'_o - c \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{21}(Y - Y_o) + r_{31}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta x'$$

$$y'_p = y'_o - c \frac{r_{12}(X - X_o) + r_{22}(Y - Y_o) + r_{32}(Z - Z_o)}{r_{13}(X - X_o) + r_{23}(Y - Y_o) + r_{33}(Z - Z_o)} + \Delta y'$$

Con la soluzione delle equazioni di collinearità si passa quindi già nella fase di restituzione: i punti omologhi che sono stati individuati su almeno due fotogrammi vengono restituiti nello spazio tridimensionale. In passato manualmente individuati dall'operatore, oggi grazie ai progressi legati alla Computer Vision (CV) i punti omologhi sono determinati con potenti algoritmi che permettono di estrarne migliaia da ogni immagine, cosa impossibile da fare altrimenti.

Tra le tecniche fotogrammetriche rientra la *Structure from Motion* (SfM). Essa consente di orientare automaticamente un set di immagini e generare, attraverso l'applicazione di algoritmi *Multi-view stereo*, una nuvola di punti densa di quanto in esse raffigurato. Tale tecnica nasce dunque dalla convergenza di discipline differenti,

da una parte la CV, che ha come obiettivo l'automatismo nella generazione di modelli 3D, dall'altra invece la fotogrammetria, che si pone come finalità la documentazione misurabile dell'oggetto. La SfM è uno strumento sempre più potente e diffuso per la costruzione di modelli tridimensionali e questo è dovuto da un lato allo sviluppo di algoritmi di estrazione e triangolazione da immagini che ha portato ad un aumento della qualità dei risultati ottenibili e dall'altro ad un miglioramento della qualità e ad un abbassamento del costo delle fotocamere e dei loro metodi di calibrazione, così permettendo un utilizzo della modellazione fotogrammetrica ad un pubblico sempre più ampio. Fotocamere digitali dotate di sensori in grado di offrire risultati accettabili nell'acquisizione di immagini finalizzate ad un'elaborazione SfM, sono oggi piuttosto comuni ed economiche, in particolare se paragonate a strumenti necessari per il rilievo *range-based*, come scanner laser. La SfM si basa sugli stessi principi propri della fotogrammetria stereoscopica, permettendo di ottenere modelli 3D da immagini che abbiano porzioni sovrapposte. La geometria della scena, la posizione e l'orientamento della camera sono risolti in maniera automatica e simultanea, utilizzando una procedura iterativa basata sul riconoscimento e l'associazione di *features* comuni estratte automaticamente dalle immagini. L'orientamento interno viene eseguito in maniera automatica tramite la lettura dei dati exif delle immagini o tramite l'inserimento manuale dei parametri di calibrazione preventivamente eseguita. L'orientamento esterno si articola invece in tre fasi: *feature extraction*, *feature matching* e *bundle adjustment*. Il primo step è dunque l'identificazione delle *feature* delle singole foto che possono essere utilizzate nel determinare la corrispondenza tra immagini. A tal fine sono utilizzati i sistemi di riconoscimento dell'oggetto, tra i più popolari il SIFT (Scale Invariant Feature Transform) e il SURF (Speeded Up Robust Feature). Le *feature* estratte sono poi collegate alle omologhe trovate nelle altre immagini (*feature matching*). Questa fase opera una stima iniziale della posizione delle

camere e delle coordinate degli oggetti: tramite il legame epipolare le coordinate lastra sono trasformate in coordinate spazio. Infine, attraverso una procedura iterativa che utilizza minimizzazioni non lineari ai minimi quadrati (*bundle adjustment*), i risultati ottenuti sono ottimizzati riducendo l'errore di riproiezione di ciascun punto. A questo punto del processo il risultato è una nuvola di punti sparsa, che viene quindi trasformata in una nuvola densa, ricorrendo a processi automatici di *dense image matching*. Questi utilizzano algoritmi in grado di sfruttare la già determinata posizione delle camere come input, per la restituzione di un elevato numero di punti rappresentati nelle foto. Il modello così ottenuto riproduce le forme dell'originale, ma totale è l'assenza di informazioni metriche. Esso infatti non rispecchia le dimensioni dell'oggetto reale e si trova orientato in un sistema di coordinate relativo. La scala, la georeferenziazione e la quantificazione metrica dell'errore debbono quindi essere successivamente determinate tramite l'inserimento di *Ground Control Point* (GCP), punti riconoscibili nella scena e successivamente individuati sulle immagini, di cui siano note le coordinate assolute o relative.

A livello generale è dunque associata l'efficacia delle tecniche fotogrammetriche nell'elaborazione di ricostruzioni tridimensionali di oggetti reali. Vanno però evidenziati anche casi di applicazione in cui ciò non è verificato. In particolare, nella ricostruzione di manufatti trasparenti, riflettenti o lucidi, quali vetri, specchi o porcellane, il riconoscimento automatico di punti tra le diverse immagini non può avvenire, in quanto la loro rappresentazione dell'oggetto varia in relazione all'angolo tra la luce riflessa e la fotocamera. Tale problema è affrontato anche in uno dei casi di studio proposti, lo Studiolo del Duca presso Palazzo Ducale di Urbino, dove viene superato impiegando un filtro polarizzatore ed un sistema di illuminazione a luce polarizzata solidale allo spostamento della fotocamera.

2.2.2 Tecniche range-based: i sistemi di scansione 3D

I metodi *range-based* permettono l'acquisizione di misure riconoscendo tramite un sensore elettronico una luce differente da quella ambiente, che viene emessa dalla stessa strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati.

Nel presente paragrafo si analizzano tra questi sistemi quelli a scansione, che, emettendo in rapidissima sequenza degli impulsi luminosi, sono in grado di associare a ciascun punto colpito le rispettive coordinate geometriche tridimensionali. Il raggio emesso viaggia infatti fino ad incontrare una certa superficie, intercettandolo questa lo riflette indietro allo scanner, dove un sensore di ricezione permette di stabilire le coordinate spaziali del punto battuto. Come la fotogrammetria digitale, anche i sistemi di scansione sono dunque delle soluzioni che non prevedono di un contatto diretto con l'oggetto da rilevare e che, ripetendo per diversi punti la misurazione, ne ricostruiscono la geometria generando una nuvola di punti.

Tra gli stessi sistemi di scansione tridimensionale troviamo differenti soluzioni. Una prima distinzione può essere effettuata tra sistemi che utilizzano un singolo spot di luce, una lama di luce in movimento o un pattern di luce proiettato a risoluzioni differenti (M. Russo et al., 2011). Di conseguenza, numerose sono anche le tipologie di scanner disponibili sul mercato, una cui classificazione può essere eseguita sulla base del loro principio di misurazione della distanza, attuando una distinzione tra sistemi distanziometrici e sistemi a triangolazione.

I sistemi distanziometrici, detti LiDAR (Light Detection and Ranging), permettono di conoscere distanza ed angoli tra il sensore ed i punti colpiti dalla luce laser emessa, determinandone così le coordinate tridimensionali. La stima delle coordinate dei punti può avvenire con due procedimenti fondamentali: attraverso la misura diretta del tempo di volo o quella indiretta offerta dalla modulazione dell'intensità luminosa e dagli sfasamenti di segnale. Possiamo dunque individuare:

- Sistemi a tempo di volo (*Time of Flight*, ToF): basano la misura della distanza sulla misurazione del tempo di volo, ovvero dell'intervallo temporale che trascorre tra l'emissione del raggio laser e il suo ritorno al sensore a seguito della riflessione sulla superficie dell'oggetto rilevato. Conoscendo la velocità della luce emessa, moltiplicandola per la metà del tempo di volo, si ottiene la distanza dell'oggetto. Tale soluzione tecnica offre la possibilità di misurare con precisioni millimetriche anche elementi distanti fino a centinaia di metri; viene utilizzata principalmente per rilievi architettonici, topografici, di impianti industriali e di siti archeologici.
- Sistemi a differenza di fase (*Phase shift*): per la misurazione della distanza questa soluzione ricorre alla discriminazione di fase. In particolare, nota la fase dell'onda emessa, questa viene confrontata con quella ricevuta a seguito della riflessione sulla superficie dell'oggetto rilevato. Questa tipologia di scanner ha solitamente portata più limitata di quelle raggiungibili con sistemi a tempo di volo, offrendo però una più elevata velocità di scansione. Per questo motivo scanner a differenza di fase vengono utilizzati in applicazioni su piattaforme in movimento come treni o auto, congiuntamente ad altri sensori che consentano una georeferenziazione dei dati.

I sistemi a triangolazione (Guidi, Russo, Magrassi, & Bordegoni, 2010) si basano invece sul principio di misurazione proprio della fotogrammetria stereoscopica: il

punto viene rilevato come intersezione di due rette di direzione nota nello spazio. Si tratta di dispositivi in grado di offrire precisioni submillimetriche e adatti al rilievo a breve distanza di oggetti di dimensioni ridotte.

Sono inoltre disponibili sensori ottici attivi a luce strutturata (o a proiezione di frange), che utilizzano, in luogo dell'emettitore laser, un proiettore di luce strutturata mentre l'immagine della superficie investita da questo pattern luminoso è acquisita da una camera digitale, disassata di una *baseline* b .

Come anticipato, il risultato delle acquisizioni *range-based* è dunque una nuvola di punti, che ricostruisce la geometria della scena documentata e le cui caratteristiche dipendono anche dallo strumento e dalle sue impostazioni in fase di acquisizione. Le caratteristiche ottiche ed elettroniche del sistema utilizzato determinano infatti la qualità dell'output finale che può essere determinata sulla base di 3 parametri: risoluzione, incertezza e accuratezza. La loro stima permette di valutare il grado di incertezza delle coordinate spaziali rilevate, tenendo conto dei diversi fattori che entrano in gioco nelle fasi di acquisizione e processamento dei dati. Conoscere tali valori permette di definire la tracciabilità metrologica del processo e l'affidabilità della conseguente approssimazione discreta tridimensionale delle superfici rilevate. La risoluzione è il primo parametro considerato e può essere impostata prima di avviare la scansione in funzione del grado di dettaglio che si vuole raggiungere. Essa indica il minimo passo di campionamento possibile ed è dipendente dalle caratteristiche ottiche, meccaniche ed elettroniche dello strumento utilizzato. I due successivi parametri sono invece legati alle componenti di errore che sistematicamente o casualmente intervengono nella misurazione. L'accuratezza è dipendente dall'errore sistematico, ovvero determinato dalla differente condizione di funzionamento degli strumenti rispetto ad una condizione teorica ideale. Essa può essere aumentata minimizzando lo scarto medio rispetto al valore vero con un processo di taratura. La precisione è invece

legata all'errore casuale connesso a componenti aleatorie che intervengono nella misurazione e non è correggibile da processi di taratura. La stima del valore di incertezza della misura può avvenire a posteriori, applicando un'analisi statistica ad un insieme di misure omogenee. Tra le tante fonti di errore nell'acquisizione dati tramite sistemi a scansione troviamo: il segnale perso in rumore (*speckle*); la dimensione dello spot (*spot size*); lo spostamento della misura e il rumore (penetrazione del segnale); gli artefatti di misura (salti di spigoli e riflettanza).

Nell'ambito delle tecniche *range-based*, la scelta del miglior sistema di documentazione è condizionata dalle finalità del rilievo e dalle caratteristiche geometriche e dei materiali proprie del manufatto da rilevare. I sistemi a triangolazione permettono ad esempio di ottenere modelli digitali molto accurati, ma il loro utilizzo è limitato ad oggetti di piccole dimensioni. Questo perché il rapporto tra la *baseline* b e la distanza di presa (d) è fondamentale per stabilire la precisione delle misurazioni, ed il rapporto ottimale d/b è pari a 1, con precisioni decrescenti all'aumentare di tale valore. Le strumentazioni a tempo di volo e quelle a differenza di fase permettono invece la documentazione digitale dalla scala architettonica fino a quella del paesaggio. La complessità morfologica del manufatto da rilevare può rendere necessaria l'integrazione tra le diverse tecniche, al fine di ottenere una rappresentazione complessiva dell'oggetto e di dettaglio per quegli elementi che richiedano un maggiore approfondimento. Infatti, a prescindere dal tipo di sensore impiegato, il risultato dell'acquisizione è una nuvola di punti descrivente la geometria del manufatto indagato che può essere integrata con elaborazioni della medesima tipologia. Oltre al dato geometrico, a ciascun punto possono essere poi associate ulteriori informazioni come il valore di riflettanza, dato dal rapporto tra l'intensità del raggio ricevuto a seguito della riflessione sull'oggetto rilevato e quella avuta in origine al momento dell'emissione. Un'importante informazione che tali sistemi non sono

invece in grado di acquisire è quella radiometrica e pertanto, spesso, sensori fotografici sono integrati a quelli laser, al fine di associare a ciascun punto un valore RGB. Questa operazione, eseguibile anche con immagini acquisite mediante fotocamere esterne posizionate in modo da far collimare il loro centro ottico con quello del sensore laser, permette quindi di “colorare” la nuvola di punti, ottenendo un modello digitale visivamente rispondente a quello reale, facilitandone l’interpretazione per la successiva redazione di elaborati grafici. Si può dunque concludere assumendo che per ogni scansione, opportunamente integrata da un’immagine dell’oggetto o dell’area acquisita, tali sistemi producono una nuvola di punti che riporta informazioni geometriche e cromatiche dell’oggetto. I punti della nuvola sono definiti da coordinate spaziali (X,Y,Z), riferite ad uno spazio in cui l’origine è assunta dal centro del sensore laser, da un vettore normale (N_x, N_y, N_z), da un valore di riflettanza e da un dato RGB. Ogni punto è quindi descritto da un listato formato da dieci valori che può essere però integrato e arricchito dall’utente con altre informazioni (Nespeca, 2018).

La scelta del sensore è determinante invece per la tecnica di acquisizione, dove un’importante distinzione è quella tra sistemi che prevedano una modalità statica o dinamica. Nel primo caso, al fine di avere misurazioni adeguate alle fasi successive di elaborazione dei dati, è fondamentale progettare il rilievo facendo particolare attenzione ad aspetti quali: riduzione di zone d’ombra e occlusioni, buon angolo di acquisizione, buona sovrapposizione tra scansioni successive, risoluzione omogenea delle scansioni e visibilità dei target o delle *features* utili per l’allineamento delle diverse scansioni. Infatti, soprattutto per l’acquisizione di spazi architettonici complessi, ai fini di una completa acquisizione, spesso una singola scansione non risulta sufficiente, ed occorre pertanto unire nuvole di punti derivanti da più scansioni per ottenere un modello completo del manufatto rilevato. Le procedure di acquisizione dinamica sono quelle previste per i cosiddetti *Mobile Mapping System* (MMS), sistemi

basati sull'integrazione di una piattaforma mobile e di sensori di misura che ne restituiscono la posizione ed i dati metrici 2D/3D georeferenziati. Le tre principali componenti hardware di tali sistemi sono i sensori ottici, i sensori di navigazione e posizionamento (IMU/GNSS) ed un'unità di controllo e sincronizzazione. Nel campo delle applicazioni terrestri, i più recenti sistemi ricorrono alla tecnologia LiDAR, da cui il nome *Mobile Laser Scanner* (MLS). Ai fini della ricostruzione traiettoria seguita, per acquisizioni *outdoor* questi sono integrati con sensori GNSS e sono generalmente montati su autoveicoli, mentre per quelle *indoor*, montate su carrelli, si fa ricorso ad una piattaforma inerziale (*Inertial Navigation System* - IMU) e ad un algoritmo di *Simultaneous Localisation and Mapping* (SLAM). In questo secondo caso l'acquisizione è particolarmente problematica in particolare per ambienti stretti o in presenza di scale e salti di quota, al fine di superare tale criticità alcune di queste soluzioni prevedono che il sistema di scansione sia montato su zaini, e che quindi l'operatore rilevi il manufatto architettonico semplicemente camminando al suo interno. Tempi di acquisizione e modalità di mappatura degli ambienti sono dunque piuttosto variabili in funzione della soluzione scelta.

Il grande sviluppo tecnologico dei sistemi di scansione laser, dai primi modelli prodotti ad oggi, ha dunque enormemente potenziato la fase di acquisizione, rendendo oggi possibile effettuare un gran numero di scansioni, anche a risoluzione elevata, in tempi sempre più brevi. Ma mentre la fase di acquisizione diviene sempre più speditiva, questo aumento di dati rilevati, comporta un incremento di risorse e tempi per l'elaborazione dei dati. Questo tema è affrontato in (Paolo Clini, Quattrini, Nespeca, Carolis, & Ruggeri, 2015) dove viene messa a punto una filiera di rilievo che mira da una parte a ridurre i tempi di acquisizione dei dati, dall'altra a rendere più oggettive e accurate le valutazioni sullo stato di fatto e garantire una documentazione esaustiva anche del patrimonio diffuso.

L'elaborazione dei dati che segue la campagna di acquisizione, ha come fase cruciale l'allineamento delle nuvole di punti ottenute dalle diverse scansioni effettuate. Ognuna di esse infatti è riferita ad un sistema di riferimento strumentale con orientamento ignoto e ha sei gradi di libertà nello spazio. Ogni nuvola di punti richiede dunque una roto-traslazione a sei parametri per consentire l'unione delle diverse singole scansioni. Tre sono le principali procedure che consentono di eseguire tale operazione:

- Allineamento con CMM: i laser scanner 3D più complessi possono essere integrati con apparati CMM (*Coordinate Measurement Machine*). Questi sono costituiti da una sonda di misura collegata a meccanismi che permettono di calcolare i suoi spostamenti nello spazio. Sostituendo alla sonda una testa laser, la nuvola di punti ottenuta nel sistema di riferimento strumentale può essere successivamente orientata grazie alle informazioni fornite dall'apparato CMM. Queste strumentazioni permettono di acquisire oggetti limitati nelle dimensioni, facendo però ricorso a CMM *wireless* possono essere utilizzate anche per oggetti di dimensioni maggiori. Tra questi, i più evoluti fanno ricorso a CMM laser (*laser tracker*) accoppiati a scanner laser, si tratta però di soluzioni estremamente costose;
- Allineamento tramite target: può essere eseguito ricorrendo a diverse soluzioni, ad esempio mediante *target* artificiali inseriti nella scena rilevata, o tramite sue *feature* naturali. I *target* possono essere di diverso tipo: sfere, immagini in bianco e nero o catarinfrangenti, su supporti cartacei, adesivi, o posizionati su aste e treppiedi. È sufficiente un minimo di tre *target* in comune tra due differenti scansioni perché queste possano essere tra loro allineate. Le *feature* sono invece delle caratteristiche proprie degli elementi rilevati che possono essere visivamente riconosciute e quindi manualmente identificate da un operatore. I *target* invece, se battuti in campagna, possono essere

automaticamente riconosciuti nell'ambiente software di registrazione. Ne deriva una maggiore accuratezza garantita in qualsiasi condizione, supponendo che essi siano stati adeguatamente distribuiti all'interno della scena;

- Allineamento con algoritmi semi-automatici: basati sulla ridondanza dei dati, tali algoritmi sfruttano la forma stessa dell'oggetto come riferimento da far corrispondere nelle diverse prese. Questa procedura richiede una sufficiente sovrapposizione tra le aree acquisite: devono essere in prima battuta identificati manualmente 3 punti comuni, a partire dai quali viene effettuato un allineamento preliminare (*coarse registration*), seguito da un affinamento automatico della registrazione (*fine registration*). Con il primo passaggio viene calcolata la matrice di rototraslazione fra i sistemi di riferimento di ciascuna scansione, il successivo, tramite algoritmi automatici che operano iterativamente, minimizza la distanza tra i punti corrispondenti più vicini. Tra gli algoritmi il più diffuso è l'ICP (*Iterative Closest Point*), implementato nella maggior parte dei software commerciali. Le sue varianti più diffuse sono il metodo "punto-punto" e quello "punto-piano". Nel primo caso per ogni punto della nuvola vengono ricercati i punti contenuti all'interno di una sfera di raggio convenzionalmente doppio alla distanza media dei punti della nuvola. Tra tutti i punti così individuati il più vicino viene scelto come corrispondente. L'approccio "punto-piano" minimizza invece le distanze tra i punti di una nuvola ed i piani di *best-fit* passanti per i punti dell'altra nuvola. In particolare, la funzione che viene scritta in questo caso è definita dalla distanza tra il punto nella prima nuvola ed il piano tangente al suo corrispondente nella seconda, nella direzione normale al primo. Rispetto al metodo precedente, in questo caso il processo di convergenza verso la distanza minima è più veloce, potendo interagire su uno spazio bidimensionale. Nel caso di sovrapposizione di

superfici quasi piate o di una curvatura quasi uniforme è rimane però preferibile l'utilizzo del primo metodo.

La scelta dell'approccio di allineamento è fortemente dipendente dalla tipologia di strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati. Nel caso dei sistemi a triangolazione, si è soliti ricorrere all'utilizzo di approcci che sfruttano algoritmi ICP. Nei sistemi a Tempo di Volo, invece, in alternativa agli approcci ICP può essere utilizzato anche il riconoscimento semi-automatico di target. Questi sistemi, riuscendo ad acquisire scene molto ampie, consentono infatti di documentare anche aree estese e complesse con un numero piuttosto limitato di acquisizioni. L'utilizzo dell'ICP è in questo caso da limitare ai casi in cui non possa essere fatto uso di target. In diversi casi e, soprattutto, nel caso in cui si ritenga necessario riferire il rilievo ad un sistema convenzionale, le coordinate dei target acquisiti possono anche essere rilevate con strumentazioni topografiche.

2.2 La fruizione digitale del Patrimonio Culturale

Le tecnologie digitali permettono oggi una fruizione del CH tramite modalità interattive basate sulla sua riproduzione virtuale o fisica, sfruttando soluzioni innovative già diffuse in altri settori quali la realtà aumentata (*Augmented Reality*, AR), la realtà mista (*Mixed Reality*, MR), la realtà virtuale (*Virtual Reality*, VR) e la fabbricazione digitale (*Digital Fabrication*, DF). Grazie a tali mezzi, è in atto un mutamento nella relazione tra pubblico e bene culturale che, tramite nuove forme di fruizione consapevole, ne sta potenziando la funzione di strumento di conoscenza, in grado di contribuire allo sviluppo cognitivo e sociale dell'utente. Il ricorso alle tecnologie digitali nella comunicazione del CH, con la conseguente realizzazione di soluzioni espositive dal carattere fortemente interattivo, permette infatti di passare, da una fruizione meramente contemplativa di prodotti culturali intesi come oggetti passivi, a modalità di fruizione in cui gli stessi oggetti culturali trasmettono e generano conoscenza in modo attivo e dinamico, realizzando il concetto di *smart cultural object* definito in (Gaiani, Apollonio, & Martini, 2015). Si realizza un nuovo rapporto tra l'opera d'arte e chi ne fruisce, che arriva a superare la presenza dell'opera stessa e la sua semplice osservazione materiale, e che ne permette di conoscere i contenuti, le tecniche realizzative, il significato espressivo ed estetico. Ciò permette la completa realizzazione dell'opera d'arte da un punto di vista formativo, completando l'atto

comunicativo in essa implicito, come auspicato per il patrimonio culturale museale in (Antinucci, 2014).

L'uso di soluzioni digitali permette quindi di offrire approfondimenti interattivi, ad esempio, grazie ad applicazioni *mobile*, sviluppate dalle principali istituzioni museali, è oggi possibile una fruizione digitale delle loro collezioni che accompagna la visita fisica o ne propone una da remoto. Sfruttando approcci intuitivi e strumenti di uso comune, come *smartphone* e *tablet*, è così possibile scoprire storia e significati dei capolavori conservati in un museo o effettuare da casa una visita virtuale delle sue sale, secondo una tendenza consolidata ormai a livello globale.

Numerosi studi dimostrano come l'uso del digitale attraverso i nuovi media migliori il modo in cui viene vissuta la cultura: un vantaggio in termini di quantità, incremento del numero di persone che possono avere accesso alla conoscenza, e qualità, miglioramento dei contenuti culturali veicolati. Soluzioni tecnologiche avanzate come AR, MR, VR e DF possono così essere utilizzate nel campo del CH al fine di offrirne una fruizione calibrata sulla tipologia di utenza e garantirne l'accessibilità, in ogni momento ed in ogni luogo, anche laddove l'accesso fisico ne fosse precluso.

Il *Reality-Virtuality Continuum* (Milgram & Kishino, 1994), descrivendo l'intervallo che intercorre tra ambienti reali e virtuali (Figura 11), permette proprio di comprendere come queste diverse soluzioni rendano possibile una modulazione nel passaggio dal reale al virtuale, che può essere così declinato in ragione dell'esperienza del CH che si intende offrire.

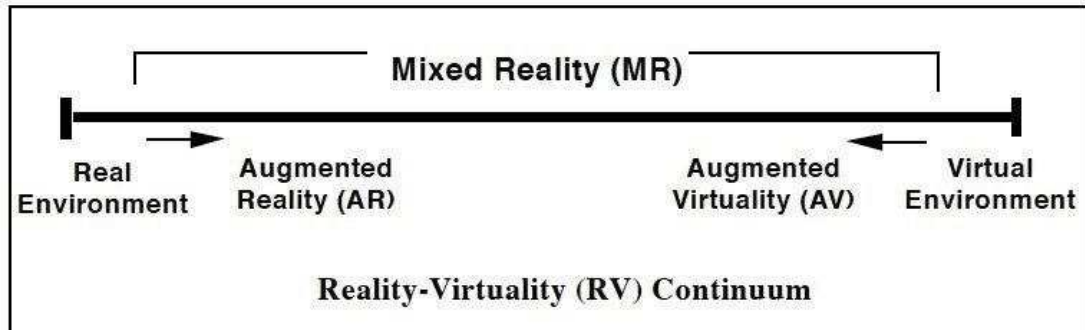


Figura 11 Reality-Virtuality Continuum (Milgram & Kishino, 1994).

A tal fine possono essere dunque individuate per ciascuna soluzione i seguenti aspetti caratterizzanti la fruizione finale:

- AR: miglioramento della percezione e comprensione del mondo reale, sovrapponendo a questo informazioni virtuali;
- MR: combinazione di ambienti reali e virtuali generando possibilità di interazione tra i due diversi livelli;
- VR: generazione di ambienti virtuali con cui è possibile interagire, escludendo invece ogni possibilità di percezione e interazione con il mondo reale.

Concettualmente, anche le tecniche di DF possono essere inserite in questo quadro generale. Permettendo di generare oggetti reali sulla base di riproduzioni digitali, esse offrono infatti un'esperienza fisica che nasce però dalla virtualizzazione del manufatto originale.

L'applicazione di queste diverse soluzioni al CH offre dunque indiscusse possibilità di arricchimento nell'esperienza del bene culturale. Occorre però farne un utilizzo che eviti di rendere protagonista lo strumento tecnologico a discapito del contenuto veicolato, che deve invece rimanere al centro del processo di fruizione. È infatti solo così che il digitale può permettere di risolvere problematiche proprie della fruizione tradizionale, proponendo modalità innovative, più inclusive e formative (Pierdicca,

Malinverni, Frontoni, Colosi, & Orazi, 2016). Se in passato era diffusa una certa diffidenza nell'applicazione di soluzioni tecnologiche al CH, dovuta a dubbi sull'accessibilità a tali mezzi soprattutto da parte di generazioni ancora non proprio a loro agio nell'uso di strumenti digitali, negli ultimi anni quei luoghi della cultura che hanno aperto le porte alle nuove tecnologie sono stati in grado di attirare un maggior numero di visitatori, venendo riconosciuti come più interessanti di quelli che hanno invece deciso di mantenere una fruizione tradizionale (Gerval & Le Ru, 2015). In particolare è dimostrato che offrire esperienze del CH ricorrendo alla creazione di ambienti in grado di reagire all'interazione umana, adattandovisi in maniera dinamica e supportando diverse soluzioni tecnologiche, renda il percorso di visita più attraente (Manovich, 2006). I sistemi digitali hanno dimostrato a tal proposito la loro efficacia, consentendo la navigazione e l'interazione con il CH tramite differenti modalità mirate ad una certa varietà di scopi. Nel campo dell'archeologia, ad esempio, il problema della disseminazione del CH è spesso legato alla comunicazione di beni gravemente danneggiati o perduti. Le tecnologie digitali in questo caso possono così servire a mostrare ciò che è nascosto al di sotto del suolo o per "aumentare" un ambiente con ricostruzioni virtuali del patrimonio perduto (Paolo Clini, Quattrini, Frontoni, Pierdicca, & Nespeca, 2017).

In ragione della possibile varietà di utilizzo a cui il mezzo digitale si presta, in (Bekele, Pierdicca, Frontoni, Malinverni, & Gain, 2018) viene effettuata una classificazione di alcuni ambiti di applicazione al CH:

- *Educational*: ambito che mira all'apprendimento da parte degli utenti degli aspetti più didattici legati al CH;
- *Exhibition enhancement*: ambito finalizzato a migliorare l'esperienza dei visitatori nella visita fisica ai luoghi della cultura;

- *Exploration*: ambito del supporto a professionisti nella visualizzazione e nello studio del CH per scoprire, interpretare e acquisire nuove conoscenze;
- *Reconstruction*: ambito della visualizzazione e interazione con il CH pensato anche per non esperti del settore;
- *Virtual museum*: ambito della simulazione del collezioni e degli allestimenti museali in forme digitali.

Alcuni di questi ambiti si sovrappongono, ad esempio, un'applicazione di ricostruzione può avere uno scopo didattico, fornendo contenuti formativi all'utente, o, allo stesso modo, un museo virtuale potrebbe essere implementato all'interno di un museo fisico, valorizzandone così gli spazi espositivi. Nei seguenti paragrafi sono dunque approfondite le diverse possibili soluzioni tecnologiche, esaminandole in relazione alle applicazioni avute nei diversi ambiti individuati.

2.2.1 La Realtà Aumentata

In (R. T. Azuma, 1997) viene fornita la seguente definizione di realtà aumentata (*Augmented Reality*, AR): “sistema che combina contenuti reali e virtuali, fornisce un ambiente interattivo in tempo reale e registra in 3D”. L’AR completa le realtà senza sostituirsi completamente a questa (Milgram & Kishino, 1994), migliorando la nostra visione del mondo reale aggiungendovi informazioni virtuali generate al computer (Casella & Coelho, 2013). In (R. Azuma et al., 2001) sono individuate per i sistemi AR le seguenti tipiche caratteristiche: (i) combinano oggetti reali e virtuali, (ii) funzionano in tempo reale e (iii) consentono l’interazione tra utenti e oggetti virtuali (Liarokapis, 2007).

La possibilità più rilevante offerta da tale tecnologia è dunque quella di offrire una percezione combinata di oggetti reali e virtuali, tramite una visualizzazione che avviene in tempo reale. Lo sviluppo di soluzioni AR è sempre più diffuso e veicolato da applicazioni per dispositivi *mobile* di uso comune, come *smartphone* o *tablet*, o da altre soluzioni legate all’uso di specifici occhiali, in grado di offrire una sensazione di maggiore naturalezza e immersione riducendo la percezione dello strumento tecnologico.

I campi di applicazione in cui l’AR è stata sperimentata sono numerosi: nel settore dell’istruzione (Yuen, Yaoyuneyong, & Johnson, 2017), in medicina (Haouchine, Dequidt, Berger, & Cotin, 2013), nella manutenzione e riparazione (Henderson &

Feiner, 2011), nel design urbano (Wagner et al., 2009), fino al controllo del traffico aereo (Reisman & Brown, 2006). In tali ambiti l'esperienza AR ha prodotto un maggiore coinvolgimento, una maggiore attenzione verso i compiti e una migliore capacità di apprendimento (Shelton & Hedley, 2004). Alcune esperienze mostrano chiaramente il potenziale dell'AR anche nel generare esperienze di visita interattive, capaci, in particolare nell'ambito museale, di incrementare il livello di apprendimento del visitatore (Moorhouse, tom Dieck, & Jung, 2019; Yoon, Elinich, Wang, Steinmeier, & Tucker, 2012). L'AR è stata applicata per arricchire l'esperienza di singoli oggetti, quali dipinti o manufatti (Quattrini, Pierdicca, Frontoni, & Clini, 2015), così come di interi luoghi della cultura, da musei a siti archeologici (Dragoni, Quattrini, Sernani, & Ruggeri, 2019). Esempi di particolare successo sono le guide turistiche basate sull'AR, in grado di fornire esperienze intuitive e coinvolgenti per turisti, guidandoli nella visita ai diversi siti, arricchendone l'esperienza tramite la sovrimposizione di diversi contenuti digitali (Julier et al., 2016; tom Dieck & Jung, 2018).

Non mancano però anche alcuni limiti nel ricorso a soluzioni AR. Se da un lato infatti la possibilità di ricorrere a *smartphone* o *tablet*, strumenti ormai di uso comune, ha permesso una larga diffusione dell'AR, dall'altro, l'uso di *device* per la visualizzazione dei contenuti digitali, genera un elemento di disturbo, inserendosi in maniera invasiva tra l'utente e l'oggetto reale. L'avvento di tecnologie indossabili sta permettendo di passare a soluzioni d'interazione più naturali in grado di permettere all'utente di sperimentare il CH in maniera più appagante e senza la distrazione generata dai *device* più tradizionali (Litvak & Kuflik, 2020). Anche l'interfaccia prevista per tali applicazioni dovrebbe essere ridotta al minimo, offrendo così all'utente la possibilità di concentrarsi solamente su quanto osservato. Nell'ambito specifico del CH, un settore in cui l'utenza è estremamente diversificata, prioritaria deve essere poi la

facilità di utilizzo di tali strumenti, anch'essa principalmente determinata dalle caratteristiche dell'interfaccia.

Nello sviluppo di una soluzione di AR è fondamentale, già in fase di progettazione, valutare quale tipologia di tecnologia utilizzare. Una prima classificazione fondamentale riguarda il metodo di riconoscimento e *tracking* del dispositivo utilizzato rispetto al contenuto digitale da visualizzare, le due possibilità sono i metodi *marker-based* e quello *location-based*. I primi utilizzano la fotocamera del dispositivo, sfruttandola per il riconoscimento di caratteristiche della scena inquadrata ai fini del corretto inserimento in essa dei contenuti digitali, e possono essere distinti nelle soluzioni *feature-based* e *model-based*. La prima si basa sul riconoscimento di immagini ed ha come concetto base quello di trovare una corrispondenza tra le caratteristiche dell'immagine 2D utilizzata come *target* e le sue coordinate 3D nel mondo reale: la fotocamera del dispositivo rileva determinati pattern o marker del *target* e, conseguentemente, il *device* utilizzato vi sovrappone il contenuto digitale. La disposizione del contenuto digitale dipende quindi dalla posizione del *target* associato. La soluzione *location-based*, utilizza invece rilevatori di posizione quali GPS, accelerometri e bussole digitali, per stabilire la posizione del *device* e visualizzare i contenuti digitali. Si tratta di soluzioni che generalmente offrono una precisione ridotta, nell'ordine del metro, e pertanto nell'ambito del CH sono generalmente utilizzate per contenuti a scala architettonica o paesaggistica, come ad esempio la visualizzazione di ricostruzioni virtuali di edifici non più esistenti.

Per lo sviluppo software di applicazioni di AR sono disponibili numerosi kit di sviluppo (*Software Development Kit*, SDK), differenziabili per tipologia di licenza, *tracking*, contenuti e piattaforme supportate. Una soluzione recente, supportata da alcuni di questi SDK, è la SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Essa si basa su un algoritmo in grado, attraverso la fotocamera del *device* utilizzato, di

mappare l'ambiente in cui si trova l'utente e tracciarne i movimenti. Questo permette di registrare la posizione di diversi oggetti presenti nello spazio reale e posizionare i contenuti virtuali dove necessario mentre l'utente si sposta al suo interno. L'ambiente reale, con le sue caratteristiche, diviene esso stesso il *target* riconosciuto dall'applicazione, con la possibilità di utilizzo anche in ambienti chiusi dove ad esempio il GPS non è disponibile.

Con specifico riferimento alle soluzioni sperimentate in questo lavoro di tesi, nell'ultimo capitolo viene descritta un'esperienza di sviluppo di un'applicazione di AR per i disegni del Codice Atlantico di Leonardo Da Vinci. Tra i diversi SDK disponibili, per questo caso di studio, si è deciso di ricorrere per il riconoscimento dei target immagine al *Vuforia AR SDK*² integrandolo nel *game engine Unity 3D*³.

² <https://developer.vuforia.com/>

³ <https://unity.com/>

2.2.2 La Realtà Virtuale

La Realtà Virtuale (*Virtual Reality*, VR) è stata definita come tecnologia complessa che crea un ambiente digitale in cui gli utenti sono immersi e con cui questi possono interagire (Carrozzino, Evangelista, Brondi, Tecchia, & Bergamasco, 2014). Una definizione generale che fa dunque rientrare nell'ambito della VR un gran numero di tecnologie differenti, tutte in grado di generare ambienti digitali, offrendo però diversi gradi di immersione ed interazione. Tra le soluzioni più semplici troviamo ad esempio quelle costituite da sistemi in cui l'ambiente digitale viene visualizzato su monitor, offrendo un grado di immersività molto basso, che non permette di raggiungere i massimi livelli di coinvolgimento possibili grazie alla VR, ma che a loro vantaggio presuppongono un ricorso a *device* spesso più economici e di utilizzo immediato. Ad un livello intermedio troviamo invece le soluzioni semi-immersive, queste prevedono l'utilizzo di sistemi di proiezioni, come ad esempio nei CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*, CAVE), o di monitor curvi, e sono realizzate solitamente in modo da coinvolgere contemporaneamente più utenti, aspetto che le rende molto efficaci in ambito museale, in particolare per quei contesti dove siano previsti grandi flussi di visitatori. Infine, per esperienze di completa immersione nell'ambiente digitale, è possibile ricorrere a specifici visori (*Head-Mounted-Displays*, HMD), tramite i quali gli utenti sono totalmente coinvolti nella scena simulata.

Vari sono anche i livelli di interazione previsti dalle diverse soluzioni di VR, tutte accumulate dall'utilizzo di dispositivi in grado di trasmettere le intenzioni dell'utente agli elementi della VR in cui si trova immerso. Se la modalità d'interazione più diffusa rimane certamente quella che prevede *joystick* tramite cui attivare predeterminate interazioni, la disponibilità di dispositivi in grado di trasmettere le intenzioni dell'utente senza che questo debba indossare o toccare alcun *device*, sta portando alla diffusione di modalità più naturali, che prevedono unicamente l'uso delle mani. Una soluzione oggi implementata anche in dispositivi VR di fascia media, la cui crescita dal punto di vista delle prestazioni è stata accompagnata negli ultimi anni da prezzi di acquisto sempre più accessibili.

Sulla base di tali considerazioni, la scelta della soluzione tecnologica, e quindi del dispositivo più adatto per applicazioni di VR, può essere dunque effettuata sulla base di questi stessi parametri generali: livello di immersione nell'ambiente virtuale e possibilità d'interazione con esso, che a loro volta dovranno essere valutati sulla base delle caratteristiche dell'utente finale e della tipologia dei contenuti da rendere fruibili. Nello specifico ambito del CH il ricorso alle diverse soluzioni di VR offre molteplici opportunità. I luoghi della cultura sono infatti in grado di attrarre un vasto pubblico grazie ai grandi capolavori delle loro collezioni permanenti ed all'organizzazione di mostre evento, ma non offrono con i loro spazi fisici quella scalabilità offerta dagli ambienti virtuali, dove la creazione e la fruizione di contenuti può avvenire in maniera più fluida e con costi maggiormente contenuti. La VR può così offrire la possibilità a persone che fisicamente si trovino in ogni angolo del mondo di esplorare nuovi luoghi della cultura, in grado di garantire un'esperienza dinamica e personalizzabile del CH, permettendo una narrazione innovativa caratterizzata dalla possibilità di sovrapposizione di differenti strati tematici.

In tal senso, può esser fatto riferimento ad alcune esperienze sviluppate in diversi ambiti del CH. Il Museo Virtuale della Via Flaminia Antica (Maurizio Forte, 2007) costituisce ad esempio una soluzione di fruizione in VR che permette un accesso ed un'interazione multiutente all'interno dell'ambiente della Villa Livia, virtualmente ricostruita sia nelle sue condizioni attuali che in quelle originali (Maurizio Forte, Pescarin, Pietroni, & Rufa, 2006). Un'esperienza che ha permesso di validare il ricorso alla VR nella fruizione del CH e da cui è emerso come questa aumenti le aspettative della fruizione e, combinando uno *storytelling* virtuale con la ricostruzione del bene culturale, produca un alto grado di memorizzazione dei contenuti da parte dell'utente (M Forte, Pescarin, & Pujol Tost, 2006). Tale specifica soluzione ha inoltre dimostrato come lo sviluppo di contenuti virtuali permetta aggiornamenti successivi, in grado di implementare le esperienze proposte con nuove letture (Pietroni, Forlani, & Rufa, 2015). (Ferdani, Fanini, Piccioli, Carboni, & Vigliarolo, 2020) e (Bozzelli et al., 2019) costituiscono altri esempi di VR applicata al CH in cui è dimostrata l'efficacia delle ricostruzioni virtuali nei processi cognitivi, anche in associazioni a dinamiche proprie del mondo del *gaming*. Tali soluzioni, pur nella loro diversità tecnologica, risultano infatti coerenti nell'intento di offrire un mezzo utile ad una migliore comprensione del CH, dimostrando che l'innovazione proposta dalla VR incuriosisce e supporta l'utente alla scoperta del contenuto culturale veicolato, che rimane però assoluto protagonista dell'esperienza di fruizione.

In relazione a tale contesto, nell'ambito di questo lavoro di tesi si è deciso di applicare ai casi di studio presentati delle soluzioni VR in grado di offrire esperienze completamente immersive, ricorrendo all'utilizzo di visori HMD, e di garantire un'interazione con l'ambiente virtuale tramite *joystick*. Lo sviluppo delle applicazioni VR è stato realizzato tramite la *game engine Unity 3D*, software che ha consentito la

gestione dei modelli 3D, precedentemente elaborati tramite processi *reality-based*, la loro renderizzazione e animazione, nonché la codifica delle possibili interazioni utente.

2.2.3 La Realtà Mista

La Realtà Mista (*Mixed Reality*, MR) prevede la coesistenza di contenuti reali e virtuali che in tempo reale interagiscono tra loro. La MR unisce dunque aspetti propri dell'AR e della VR, collegando informazioni digitali e fisiche, aumentando il mondo reale e offrendo un'interazione che corrisponde alle azioni dell'utente nello spazio fisico (Zikas et al., 2016). Pertanto un'esperienza di MR inserisce chi ne fruisce in un ambiente reale-virtuale, il contenuto virtuale non è però semplicemente sovrapposto all'ambiente reale come per l'AR, ma interagisce con esso, abbattendo il confine tra i due ambiti.

I dispositivi che permettono esperienze di MR possono appartenere a due differenti categorie: quella dei dispositivi olografici, occhiali traslucidi che consentono di vedere l'ambiente circostante e al contempo visualizzare i contenuti virtuali tramite ologrammi, e quella dei dispositivi immersivi, visori dotati di display che bloccano la visione diretta del mondo reale, utilizzando per la sua visualizzazione delle telecamere integrate. Entrambe le tipologie di *device* possono ricorrere a sistemi di tracciamento *marker-based* o *markerless* per determinare la posizione dell'utente e degli oggetti virtuali nella scena e abilitare l'interazione tra di essi. Tra i vari dispositivi, quello che ha sicuramente riscosso il maggior successo è l'*Hololens*⁴, largamente utilizzato anche

⁴ <https://www.microsoft.com/it-it/hololens/hardware>

nel settore del CH. In (Rahaman, Champion, & Bekele, 2019) viene ad esempio definito un *workflow* per la fruizione di beni culturali proprio mediante *Hololens* che, partendo dalla generazione di modelli 3D tramite fotogrammetria, arriva a sviluppare possibilità di visualizzazione e interazione in MR. Sempre ricorrendo al medesimo *device*, (Bekele, 2019) presenta un'esperienza che consente di fruire di differenti contenuti culturali nell'ambito di musei o altri siti culturali mediante mappe navigabili ed interattive. Non mancano però soluzioni differenti: in (Benko, Ishak, & Feiner, 2004) utilizzando un sistema immersivo, dotato di HMD e tavolo di proiezioni, si permette all'utente tramite input vocali, tattili e *gestures*, di organizzare, visualizzare e combinare le informazioni 2D disponibili su uno scavo quali disegni, immagini e note, con modelli 3D texturizzati derivanti da scansioni laser di reperti e del sito stesso; in (Okura, Kanbara, & Yokoya, 2015) si propone un'applicazione MR in cui gli edifici perduti di un sito Patrimonio UNESCO in Giappone vengono sovrapposti a scene reali virtualizzate usando immagini aeree sferiche; in (Santos, Acri, Gierlinger, Schmedt, & Stork, 2010), ricorrendo alle tecnologie di base per lo sviluppo di applicazioni di MR in spazi aperti, si presenta un nuovo sistema di visualizzazione ed un *framework* adattato per l'architettura ed il CH finalizzato alla riproduzione foto realistica dei contenuti.

Pur non mancando delle criticità nelle soluzioni presentate, dalla ridotta complessità dei modelli visualizzabili alle difficoltà di utilizzo dei dispositivi in ambienti esposti alla luce diurna, tali esperienze dimostrano l'efficacia della MR nella fruizione del CH grazie alla sua capacità di contestualizzare in maniera interattiva contenuti virtuali in specifici ambienti reali. Come espresso in (Fogliaroni, 2018), il superamento delle problematiche presentate permetterebbe un uso ancora più efficace in operazioni quali il supporto alle fasi di scavo nei siti archeologici, la generazione di ricostruzioni

virtuali a partire dai resti di strutture storiche o ancora la visualizzazione di *time-lapse* per simulare le variazioni occorse ad un certo paesaggio culturale nel corso della storia.

2.2.4 La Fabbricazione Digitale

La fabbricazione digitale (*Digital Fabrication*, DF) è definita come processo in grado di creare riproduzioni tangibili di modelli digitali. Se l'industria manifatturiera ne è storicamente il principale campo di applicazione, la DF ha dimostrato di essere efficace anche in molti altri contesti come quello del CH, ambito ideale in particolare per testare la flessibilità e la qualità di tali tecnologie.

L'approccio tradizionale nella riproduzione tangibile di beni culturali richiede la produzione di stampi in gomma a partire dalle opere originali, che sono poi utilizzati per la successiva produzione di copie in gesso o in resina. Un processo manuale che necessita di tempi lunghi di realizzazione, fortemente influenzato dalla complessità della forma dell'oggetto da riprodurre, e che implica inoltre che la riproduzione debba essere obbligatoriamente una copia esatta in scala 1:1. La DF offre in primis una maggiore flessibilità: la rappresentazione digitale può essere modificata prima di essere riprodotta come oggetto fisico, può quindi essere scalata o editata nella forma, o ne possono essere stampate solo determinate porzioni. Questo aspetto permette di migliorare notevolmente le informazioni fornite dalla riproduzione tangibile di un certo bene culturale, rendendola funzionale in diversi processi.

Analizzando i diversi metodi della DF (Tabella 2), questi possono essere distinti in sottrattivi e additivi, i primi hanno trovato largo uso in applicazioni industriali già a

partire dalla fine degli anni '80, mentre i secondi hanno avuto una diffusione più lenta, affermandosi solamente negli ultimi anni.

Tabella 2 Sommario delle tecniche di fabbricazione per il CH. Le diverse soluzioni sono accompagnate da valutazioni qualitative basate sulla loro applicazione al CH (Scopigno, Cignoni, Pietroni, Callieri, & Dellepiane, 2017).

Tecniche	Costo	Facilità di utilizzo	Libertà geometrica	Adeguatezza dei materiali per il CH	Precisione	Dimensioni
<i>Tecniche sottrattive</i>						
fresa CNC 2.5D	basso/medio	basso	bassa	alta	alta	da mm a m
fresa CNC a 6 assi	alto	molto basso	media	alta	alta	da mm a m
<i>Tecniche additive</i>						
FDM	molto basso/medio	media/alta	media	bassa	media/alta	da cm a dm
LOM	medio	media	bassa	media	media	da cm a dm
Gypsum Binding	medio	media	molto alta	media/alta	media/alta	da cm a dm
Metal Sintering	molto alto	bassa	molto alta	media	media/alta	da mm a cm
Plastic Sintering	molto alto	media	molto alta	media	media/alta	da mm a dm
Fotopolimerizzazione	alto	media/alta	media	bassa	alta/molto alta	da mm a dm

La definizione di metodo “sottrattivo” deriva dalla modalità con cui l’oggetto viene realizzato, ovvero scolpendo un blocco di materiale, utilizzando generalmente una fresa a controllo numerico. Tra i principali vantaggi di tale soluzione troviamo la possibilità di utilizzare numerose tipologie di materiali come il legno, la pietra o il metallo. Non mancano però anche limitazioni, in particolare nella movimentazione della punta dei macchinari, non sempre in grado di eseguire tutti i movimenti necessari per la riproduzione del modello digitale. Tale metodo trova così uso principalmente nella riproduzione di bassorilievi, infatti, seppur esistano macchine CNC a 6-assi in grado di offrire la possibilità di ruotare attorno all’oggetto riprodotto, i limiti alla movimentazione della punta e le complessità della progettazione del percorso che questa deve seguire, hanno limitato la loro diffusione nel settore del CH.

I metodi “additivi” si basano invece su diversi tipi di tecnologie che hanno visto negli ultimi anni una notevole riduzione dei costi, sia in termini di macchinari che di materiali necessari nei loro processi. Tra queste le principali sono:

- FDM (*Fused Deposition Modelling*) prevede la fusione di un filamento di plastica fatto passare attraverso un estrusore, che lo deposita su di un piatto, riproducendo strato dopo strato la forma geometrica voluta. Tale soluzione richiede dunque macchinari semplici, il cui funzionamento si avvicina a quello di una comune stampante 2D. Il loro prezzo è dunque contenuto, con soluzioni che vanno da poche centinaia a qualche migliaio di euro. La qualità dei risultati finali è molto variabile, in quanto influenzabili da diversi parametri. Il materiale plastico utilizzato, nella maggior parte dei casi ABS o PLA, tende a dare un'apparenza artificiale all'oggetto stampato. Inoltre, in relazione al tipo di macchinario utilizzato, i diversi strati di materiale depositato che costituiscono la struttura dell'oggetto possono risultare visibili. Una soluzione a queste due problematiche è quella di levigare la superficie e quindi pitturarla, migliorando così il risultato finale ma rendendo l'intero processo meno automatico.

Per quanto riguarda l'aspetto visivo, alcuni dispositivi FDM più avanzati permettono di utilizzare per lo stesso oggetto diversi materiali, offrendo la possibilità di avere quindi un oggetto di diversi colori, limitandosi però generalmente a soli due.

Dal punto di vista geometrico, questa modalità di DF, non permette la realizzazione di elementi particolarmente aggettanti senza la realizzazione di supporti aggiuntivi che vengono stampati insieme all'oggetto. Tali elementi vengono automaticamente generati dal software che gestisce la stampa 3D, offrendo all'utente la possibilità di ottimizzarne in maniera manuale alcuni

parametri. La principale problematica legata a tale soluzione è la loro rimozione, ovviata da alcuni macchinari più avanzati ricorrendo a plastiche solubili in acqua per eliminare il processo di rimozione dei supporti, particolarmente complicato soprattutto per oggetti di forme complesse;

- LOM (*Laminated Object Manufacturing*) prevede la realizzazione di manufatti mediante l'impiego di fogli in carta, plastica o metallo, che vengono tagliati, sovrapposti ed incollati. Alla fine del processo l'oggetto realizzato si trova all'interno dei fogli utilizzati per la sua produzione e occorre pertanto rimuoverne le parti di scarto. L'intero processo implica così diversi limiti nella restituzione delle geometrie del modello realizzato, caratterizzandosi però anche per costi di realizzazione molto contenuti;
- GMB (*Granular Materials Binding*) si basa sull'utilizzo di materiali in polvere che strato per strato vengono uniformemente depositati su una piattaforma in grado di abbassarsi per permettere il deposito del livello successivo e aggregati mediante una testa mobile dedicata. Una soluzione comune è quella dell'utilizzo di polvere di gesso e di un legante liquido depositato in posizioni preimpostate utilizzando la testa di una stampante a getto d'inchiostro. Questo approccio è l'unico a permettere di aggiungere il colore al processo di stampa, seppur con limitazioni nelle sfumature e nel grado di saturazione dei colori. Altre soluzioni, ricorrendo a questa medesima tecnologia, prevedono l'utilizzo di resine in gel e di un agente polimerizzatore in grado di solidificarle, oppure la solidificazione di polveri plastiche o metalliche tramite luce laser (*Selective Laser Sintering*, SLS). Avendo le realizzazioni in polvere di gesso la parvenza di oggetti in pietra, esse risultano particolarmente adatte in diverse applicazioni per il CH rispetto a quelle realizzate con altri materiali, una soluzione però che si configura anche tra le più costose sul mercato;

- Fotopolimerizzazione permette la polimerizzazione selettiva di una resina liquida tramite luce UV. Il processo viene eseguito strato per strato, partendo dal fondo, con la resina solidificata che viene via via sollevata mediante una piattaforma mobile. L'utilizzo di tale tecnologia permette di avere un'elevata precisione e una discreta rapidità di esecuzione grazie a macchinari un tempo tra i più costosi, oggi disponibili a prezzi più contenuti.

Le tecniche presentate possono essere applicate al CH con differenti scopi. La DF offre in primis una soluzione per la realizzazione di copie di opere d'arte, evitando processi tradizionali che prevedano la realizzazione di calchi, che possono danneggiare le parti più fragili dell'opera originale. La copia può essere effettuata in modo da risultare esattamente identica all'originale (Balzani et al., 2004; Tucci & Bonora, 2007) o ad una scala differente (Laycock et al., 2012; Pitzalis, Cignoni, Menu, & Aitken, 2008). Le riproduzioni ottenute tramite DF possono essere impiegate con varie finalità. Sono ad esempio strumenti utili per favorire la fruizione del CH da parte di persone con disabilità visive (Reichinger, Neumüller, Rist, Maierhofer, & Purgathofer, 2012), anche per generare un'interazione con opere bidimensionali, quali dipinti o fotografie, adatta alle loro esigenze (Reichinger, Maierhofer, & Purgathofer, 2011). Le repliche possono poi sostituire l'originale in maniera temporanea o definitiva, come ad esempio in caso di prestito o necessità di restauro dell'opera. La DF offre poi la possibilità di realizzare soluzioni su misura per l'imballaggio delle opere, del loro trasporto, conservazione ed esposizione di manufatti particolarmente fragili (Bright, 2012; Sá et al., 2012; Sánchez-Belenguer, Vendrell-Vidal, Sanchez-Lopez, Díaz-Marín, & Aura-Castro, 2015). Un'ulteriore fine nell'applicazione della DF nel settore del CH è quello di permettere a tutti i visitatori di vedere, toccare e provare gli oggetti. Una soluzione estremamente efficace a fini didattici per valorizzare la visita museale (Knapp, Wolff, & Lipson, 2008). Le repliche realizzate mediante DF possono essere inoltre integrate

con sensori per generare nuove interazioni con i visitatori (D'Agnano, Balletti, Guerra, & Vernier, 2015; Landau, Wiener, Naghshineh, Giusti, & Wiener, 2005). La DF può inoltre supportare il restauro, molte opere d'arte presentano ad esempio delle parti mancanti e la loro integrazione mediante soluzioni di DF può favorirne la lettura da parte del pubblico che ne fruisce (Antlej et al., 2012). Tecniche di DF possono essere anche impiegate per generare supporti necessari nell'assemblaggio di frammenti di opere d'arte come quelle danneggiate da catastrofi naturali come eventi sismici (Arbace et al., 2013). In questo quadro s'inserisce anche una sperimentazione nell'applicazione della DF al CH condotta nell'ambito del presente lavoro di tesi, con il ricorso al taglio CNC 2.5D per la riproduzione in scala 1:1 dei bassorilievi delle Grotte di Osimo, una soluzione per rendere fruibile un patrimonio sotterraneo estremamente fragile ed altrimenti inaccessibile.

3. Nuovi modelli di fruizione del Patrimonio Culturale

Dopo aver introdotto nei precedenti capitoli le modalità di documentazione e fruizione digitale del CH proposte dalle più recenti produzioni scientifiche, si presentano ora gli esiti della loro applicazione a casi di studio affrontati nell'ambito di questo percorso formativo. In considerazione dei limiti e delle potenzialità di tali metodi, si sono di volta in volta valutati quelli maggiormente adatti alle peculiarità del bene culturale indagato, proponendone, ove efficace, l'integrazione. La stessa scelta dei casi di studio è stata infatti mirata a stressare le diverse tecniche di documentazione digitale, prevedendo dei salti di scala, da quella architettonica a quella del bene mobile, e selezionando casi limite per caratteristiche fisiche e condizioni di ripresa. Le proposte di fruizione sono state invece calibrate sui contenuti culturali veicolati, selezionando

le più funzionali a restituire un'esperienza in grado di migliorare il rapporto tra il CH e l'utente finale.

Dallo studio dei disegni del *Codice Atlantico*, si sono elaborati modelli digitali tridimensionali di alcune macchine leonardiane. La loro fruizione è stata quindi resa possibile mediante un'applicazione di AR, generando direttamente dalle rappresentazioni originali le loro versioni virtuali, così creando un rapporto diretto tra l'opera fisica e la sua narrazione digitale. Lo Studiolo del Duca Federico da Montefeltro, a Palazzo Ducale di Urbino, è stato invece riprodotto virtualmente grazie all'integrazione di acquisizioni fotogrammetriche e TLS. Partendo da tale modello digitale, ne è stata sviluppata un'esperienza immersiva interattiva che, arricchita da diversi contenuti multimediali, svela al visitatore le innumerevoli allegorie nascoste nelle raffigurazioni presenti sulle sue pareti. Le grotte di Palazzo Campana a Osimo, anch'esse documentate integrando fotogrammetria e TLS, sono state invece riprodotte, non solo virtualmente ma anche fisicamente, offrendo così possibilità alternative di fruizione di uno spazio da tempo chiuso al pubblico per preservarne il delicato stato di conservazione. Infine la Pinacoteca Civica di Ancona, le sue sale e la sua collezione sono state digitalizzate tentando di attivare un dialogo museologia-tecnologia, che ha saputo offrire tra i suoi esiti anche un'efficace soluzione di visita da remoto, utile in particolare nei periodi di chiusura forzata come quello vissuto a seguito della pandemia oggi in atto.

3.1 La ricostruzione virtuale per una fruizione

“aumentata”. Le macchine di Leonardo da Vinci.

Come dimostrato in (Younes et al., 2017), sfruttando soluzioni di AR così come di VR, la rappresentazione digitale costituisce un'efficace mezzo per fruire di manufatti non più esistenti. Allo stesso modo essa può divenire mezzo di divulgazione per invenzioni forse mai realizzate, vissute nelle menti dei grandi geni del passato che ne ebbero l'intuizione. Il caso di studio qui affrontato è quello delle complesse macchine leonardiane, di cui numerosi modelli fisici sono stati realizzati nel corso dei secoli, ricostruzioni però caratterizzate da limiti nella loro fruizione che possono essere superati dalle loro versioni digitali, le quali permettono di riprodurre in modo critico l'esatta configurazione e simularne il funzionamento. Trasformare le rappresentazioni delle macchine di Leonardo in questa nuova forma offre infatti la possibilità di creare nuove modalità di comunicazione, mediando e favorendo la conoscenza e la fruizione, di contenuti altrimenti di difficile lettura per un pubblico di non esperti. Questo genera nuove opportunità anche nell'ideare percorsi museali e di conoscenza della meccanica leonardiana, accrescendone in maniera esponenziale la disseminazione attraverso la riproducibilità delle soluzioni digitali. Il 2019, anno del cinquecentenario leonardiano, ha rappresentato una sorta di punto zero in questo percorso di digitalizzazione. Si è infatti assistito, in tutte le grandi mostre e progetti scientifici di studio e divulgazione,

al largo uso di nuove tecnologie, aprendo di fatto anche un nuovo e preciso ambito disciplinare e scientifico che riguarda specificatamente le capacità di integrare i sempre più evoluti *device* di visualizzazione digitale con le molteplici elaborazioni possibili dei modelli virtuali. Le curatele scientifiche di questi eventi hanno quindi dovuto riguardare anche precise scelte rispetto alle tecnologie di visualizzazione e alle conseguenti modalità di fruizione, partendo da valutazioni su come tali soluzioni vadano ad incidere sulle esperienze culturali dei visitatori. Naturalmente alla base di questi processi resta la rigerosità scientifica che deve supportare la ricostruzioni digitali. Anzi, considerando proprio i gradi di dettaglio che possono essere raggiunti dalla rappresentazione digitale, tale rigerosità deve essere ancor più accompagnata da profondissimi gradi di conoscenza delle opere originali, richiedendo così un approccio interdisciplinare, che porta a comporre conoscenze diverse nell'organizzazione di tali mostre. Nel caso specifico dei disegni di Leonardo c'è poi un altro aspetto che ne valorizza la lettura tramite una riproduzione digitale tridimensionale, ovvero la straordinaria abilità disegnativa dell'artista nel rappresentare in pochi millimetri quadrati di carta dettagli che spesso sfuggono in una visione ad occhio nudo. Questo vale in particolare proprio per il disegno delle macchine in cui i dettagli assumono un ruolo rilevante ai fini della loro comprensione e ricostruzione. La rappresentazione digitale permette così di superare i limiti delle scale dei supporti cartacei consentendo sempre di disegnare le ricostruzioni in scala 1:1, permettendo di visualizzare tridimensionalmente fino al più minuscolo dei dettagli.

In questo contesto si inserisce l'applicazione qui presentata, sviluppata nell'ambito della mostra *“Leonardo e Vitruvio: oltre il cerchio e il quadrato. Alla ricerca dell'armonia. I leggendari disegni del Codice Atlantico”* tenutasi a Fano e finalizzata ad esplorare il legame tra Leonardo e Vitruvio, forse l'autore dell'antichità più vicino al genio toscano almeno come espressione di una sapienza multiforme ed

enciclopedica. Un legame che non si esaurisce nel tema dell'*Uomo vitruviano* ma che trova ancor più profonde radici nell'ambito della meccanica e della misurazione. Due discipline a cui Vitruvio dedica ben due libri del *De Architectura*, dando di fatto l'avvio alla storia della Meccanica. In particolare, nel libro X egli descrive la realizzazione di baliste e la costruzione di un odometro: macchine a cui Leonardo dedica grandi attenzioni e che ci raccontano di un rapporto con Vitruvio efficace e profondo, evidenziato proprio nei fogli del *Codice Atlantico* esposti nella mostra di Fano. La narrazione di queste macchine di Leonardo e del suo rapporto con Vitruvio può così essere narrato in maniera esemplare creando un format ripetibile, proprio nella filiera che, dallo studio e dall'interpretazione dei disegni, porta alla loro ricostruzione tridimensionale, a nuove comprensioni del disegno stesso e dell'idea leonardiana e al suo utilizzo grazie a molteplici possibilità concesse da visioni virtuali. Un Leonardo "digitale" che non è una copia del Leonardo "analogico" ma una sua nuova forma di conoscenza, lettura, interpretazione e comunicazione. Viene dunque illustrata tale filiera di documentazione, analisi e fruizione digitale delle macchine di Leonardo applicata a due dei disegni del *Codice Atlantico* in mostra a Fano, l'odometro f. 1r in (Figura 12) e la balestra gigante f.147v-a in (Figura 13).

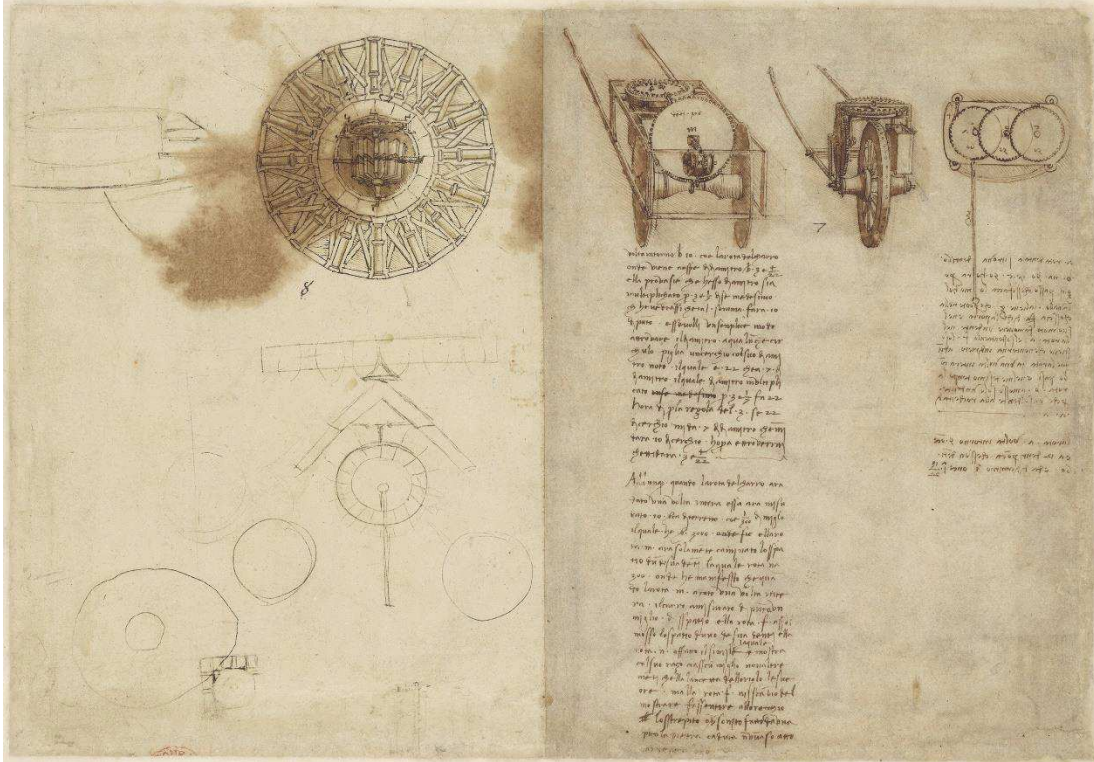


Figura 12 Diverse versioni di odometro, Codice Atlantico, f. 1r, 1500-1504 circa, Penna, inchiostro e inchiostro diluito, 195x261 mm, Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana.

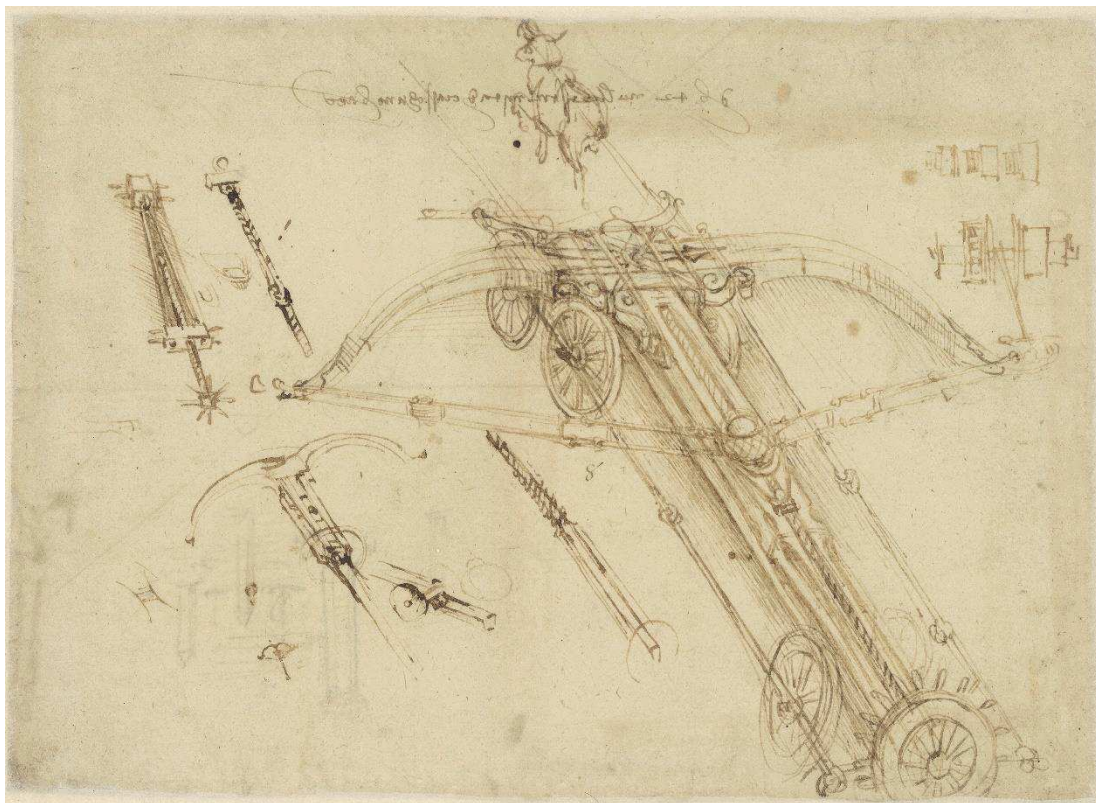


Figura 13 Balestra gigante, Codice Atlantico, f.147v-a, 1485-1492 circa, Penna e inchiostro, incisioni in punta di stilo, 198x274 mm, Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana.

L'odometro.

L'odometro è una macchina che ha lo scopo di misurare la distanza percorsa su terra ferma o in mare. La sua invenzione viene attribuita ad Archimede di Siracusa (287-212 a.C.), ma le prime descrizioni di tale strumento sono pervenute ai nostri giorni tramite i manoscritti del *De Architectura* di Marco Vitruvio Pollione (80-15 a.C. circa). In realtà questo strumento è stato studiato da molti autori nel corso della storia: Erone d'Alessandria (I secolo d.C.?) descrisse un odometro messo in moto dalla rotazione di una ruota di un carro e Leon Battista Alberti, a metà del Quattrocento, studiò questo strumento nel trattato *Ludi rerum mathematicarum*. Tra il 1500 e il 1504 anche Leonardo da Vinci si interessò alla progettazione dell'odometro e ne disegnò una versione nel foglio 1 del *Codice Atlantico* conservato oggi nella Veneranda Biblioteca Ambrosiana di Milano.

Vitruvio descrive due versioni dell'odometro nel nono capitolo del libro X del *De Architectura*: una dedicata alla misurazione delle distanze marine e l'altra adatta alle distanze terrestri. Quest'ultima è azionata da una delle due ruote posteriori di una carrozza a quattro ruote, Vitruvio ne descrive come segue l'ingranaggio e il meccanismo di conteggio della distanza: 1. *Passiamo ora ad analizzare un altro congegno che oltre a rivelarsi molto utile denota anche il grande ingegno dei nostri predecessori; esso consente di misurare in miglia le distanze percorse sia viaggiando a bordo di carrozze che di navi. Ecco di che cosa si tratta. Le ruote della carrozza devono avere ciascuna un diametro di quattro piedi [e divise in sestanti] cosicché, indicando con un contrassegno il punto in cui esse iniziano a girare avanzando sul fondo stradale, dopo aver compiuto un giro completo, si sia percorsa esattamente una distanza di dodici piedi e mezzo.* 2. *Presi questi accorgimenti occorre applicare internamente al mozzo della ruota un tamburo munito di un unico dente che sporga dalla sua superficie circolare. Più su, nella cassa della carrozza, bisogna fissare*

saldamente una scatola con un tamburo mobile disposto a coltello e montato su di un asse. Questo deve avere dei denti distribuiti regolarmente e in numero di quattrocento a ingranare con quelli del tamburo sottostante. Inoltre nel tamburo superiore deve essere fissato un altro dente che sporga di lato più degli altri. 3. Ancora più sopra vi sarà un'altra scatola con un terzo tamburo pure esso dentato e disposto orizzontalmente, che vada ad ingranare con il dente fissato sul lato del secondo tamburo. In questo terzo tamburo vanno praticati tanti fori quante si pensa possano essere le miglia percorribili in un giorno. Non importa che il calcolo sia approssimativo. In ciascuno di questi fori va poi messo un sassolino rotondo e nella scatola che contiene questo tamburo va praticata un'apertura con un piccolo condotto attraverso il quale i sassolini introdotti nei fori del tamburo andranno a cadere uno alla volta in un contenitore di bronzo collocato in basso nella cassa del carro. 4. La ruota, muovendosi, farà girare il tamburo inferiore il quale a sua volta ad ogni giro di ruota trasmetterà col suo piccolo dente il movimento ai denti superiori del tamburo, col risultato che quando il primo tamburo avrà fatto quattrocento giri il secondo ne avrà compiuto uno soltanto e il dente sporgente, fissato sul suo lato, avrà fatto avanzare un solo dente del terzo tamburo disposto orizzontalmente. Quindi se a quattrocento giri del tamburo inferiore ne corrisponde uno solo completo di quello superiore la distanza coperta sarà di cinquemila piedi, cioè mille passi. Perciò ogni sasso che andrà a cadere nel contenitore indicherà col rumore prodotto dalla sua caduta ogni miglio percorso. E il numero complessivo dei sassolini che verranno raccolti indicherà quante miglia si sono percorse in una giornata.

Lo studio di Leonardo sulla macchina di Vitruvio portò alle soluzioni rappresentate nel foglio 1r del *Codice Atlantico* (Figura 12). Possiamo notare la presenza di tre disegni: partendo dalla considerazione che Leonardo era mancino, si può presumere che realizzò per primo il disegno a destra, a seguire quello centrale e infine quello

posto a sinistra. Leggendo la descrizione lasciataci da Leonardo si deduce che il primo disegno illustra un congegno atto a segnalare il compimento di una certa distanza, mentre il secondo e il terzo disegno rappresentano effettivamente due odometri. Il primo odometro (quello centrale) rispecchia fedelmente la descrizione presentata da Vitruvio nel *De Architectura* e non vengono aggiunti commenti. Nel secondo odometro, invece, Leonardo si discosta dal progetto di Vitruvio e ne commenta le principali dimensioni e il funzionamento: *“Volta intorno braccia 10, cioè la rota del carro, onde viene a essere di diametro braccia 3 e $\frac{4}{22}$. E la prova si è che esso diametro sia moltiplicato per 3 e $\frac{1}{7}$ di sé medesimo, e vedrassi che tal somma farà 10 di punto”*. *“Addunque, quando la rota del carro arà dato una volta intera, essa avrà misurato 10 sistbraccia di terreno, cioè di $\frac{1}{300}$ di miglio il quale è braccia 3000, e la rota m arà solamente camminato lo spazio d’un de’sua denti, la quale rota n’ha 300, onde è manifesto che quando la rota m ha dato una volta intera, il carro ha misurato di punto 1 miglio di spazio, e la rota f ha sol mosso lo spazio d’uno de’ sua denti, e la rota n ha fatto il simile, la quale mostra col suo razzo ciascun miglio, non altrimenti che la lancetta dell’orologio le sue ore. Ma la rota f, n’iscambio del mostrare, fa sentire all’orecchio lo strepito over sonito fatto da una piccola pietra caduta ‘n un vaso atto a ricever sono”*.

Analisi comparativa degli odometri di Vitruvio e di Leonardo.

Prima di illustrare il confronto tra le scelte progettuali di Vitruvio e di Leonardo, è bene ricordare le unità di misura utilizzate in epoche storiche così distanti tra loro come quelle in cui essi sono vissuti. Vitruvio chiaramente usa le unità di misura dell’antica Roma: il piede, corrispondente a 296,4 mm; il passo doppio, che è lungo 5 piedi ovvero 1,482 m; il miglio, composto da 1000 passi (la parola miglio deriva infatti proprio dal latino *milia passuum*), che era quindi pari a 1482 m. Leonardo, pur avendo vissuto in diversi luoghi, ha probabilmente usato le unità di misura del circondario di Firenze per

la progettazione dell'odometro; ciò può essere dedotto sia dai commenti presenti nel foglio 1r dove è disegnato l'odometro, sia perché questo risale proprio al periodo in cui Leonardo era ritornato a Firenze. In quel periodo 1 miglio corrispondeva a 3000 braccia, e 1 braccio a 583,6 mm; pertanto 1 miglio misurava 1750,8 m. Confrontando gli scritti di Vitruvio e di Leonardo si nota che entrambi hanno scelto lo stesso procedimento concettuale per la progettazione funzionale dell'odometro: dapprima è definita la dimensione della ruota del carro, poi vengono scelte le caratteristiche della trasmissione e infine è descritto il sistema atto a conteggiare le miglia percorse.

Una differenza significativa fra i due lavori risiede nel valore utilizzato per la costante π , che rappresenta il rapporto tra una circonferenza e il suo diametro, in particolare con riferimento ai calcoli per la determinazione del diametro della ruota del carro. Tale costante, come noto, è un numero irrazionale, cioè costituito da infinite cifre decimali che non si ripetono, le prime delle quali sono: 3,14159...; ovviamente la precisione dello strumento di misura realizzato dipende in maniera importante dal valore utilizzato nei calcoli di progetto per tale costante. Secondo Vitruvio la ruota del carro deve avere un diametro di 4 piedi e una circonferenza di 12,5 piedi per cui è stato evidentemente utilizzato un valore $\pi = 3,125$ mentre Leonardo utilizza il valore $\pi = (3+1/7) = 3,142857$, più vicino al valore reale. Le approssimazioni fatte implicano che l'odometro di Vitruvio commetterebbe un errore di 2654,8 piedi (pari a 786,89 m) nella misurazione di 100 miglia romane (con un errore di circa 0,5%) mentre quello di Leonardo, più preciso, sovrastimerebbe la distanza di 120 braccia (equivalenti a 70 m) ogni 100 miglia fiorentine (con un errore inferiore a un decimo del precedente).

Le ruote dell'odometro di Vitruvio, come detto, hanno un diametro di 4 piedi (circa 1,2 m) che corrispondono grossolanamente a una circonferenza di 12,5 piedi, per cui sono necessari 400 giri delle stesse per misurare la distanza di 1 miglio: Vitruvio ha "ridotto" i 400 giri di rotazione delle ruote in una sola rotazione di un albero

utilizzando l'accoppiamento tra una ruota dentata con singolo dente e una ruota dentata con 400 denti. Tuttavia ciò comporta necessariamente che il diametro della ruota dentata sia 400 volte più grande del diametro della ruota con un solo dente: un ingranaggio così fatto sarebbe stato di difficile realizzazione per le elevate dimensioni e quindi i pesi degli organi costituenti il sistema. (Sleeswyk, 1981) suggerisce la possibilità che Vitruvio con la terminologia "*tamburo munito di un unico dente che sporga dalla sua superficie circolare*" si riferisse a una vite senza fine: se ciò fosse corretto e dimensioni del sistema sarebbero molto più compatte semplificandone la realizzazione. Leonardo, invece, ha deciso di ottenere le 3000 braccia del miglio fiorentino attraverso 300 giri delle ruote del carro: infatti la ruota dell'odometro ha un diametro di braccia (circa 1,86 m) e quindi la circonferenza misura $(3+4/22) \cdot (3+1/7) = 10$ braccia. Leonardo ha scelto di ridurre i 300 giri della ruota del carro necessari a percorrere 1 miglio attraverso una vite senza fine ad un principio accoppiata a una ruota dentata con 300 denti. Ipotizzando un dente a pioli il cui raggio vale circa 3 mm si ottiene un diametro della ruota m di 1,2 m, che conduce a un'altezza complessiva dell'odometro di circa 2,2 m. Infine entrambi gli odometri sono dotati di uno stesso sistema che permette il rilascio di un sasso dopo il compimento di 1 miglio. L'albero longitudinale è collegato con una ruota f posta in testa alla macchina; l'estremità dell'albero presenta un dente che si accoppia con una serie di pioli fissati circonferenzialmente sulla ruota: ad ogni rotazione completa dell'albero, che corrisponde alla distanza di 1 miglio, il dente fa avanzare la ruota di un piolo. Sulla ruota in corrispondenza ad ogni piolo è presente un foro che ospita un sassolino mentre la faccia inferiore della ruota è in contatto con un contenitore che presenta anch'esso un foro: in questo modo ad ogni miglio percorso un sassolino cade nel contenitore, consentendo di misurare il numero di miglia percorse nell'arco della giornata.

L'odometro di Leonardo presenta un'ulteriore ruota dentata n , come si può vedere dal disegno che, azionata dallo stesso albero che movimenta la ruota f , compie il medesimo numero di giri di quest'ultima e fornisce così un riscontro visivo del tragitto percorso.

Prototipo virtuale dell'odometro di Leonardo.

In base alle informazioni presenti nel *Codice atlantico* e a quanto descritto nel paragrafo precedente si è proceduto alla realizzazione del prototipo virtuale dell'odometro di Leonardo, di seguito vengono descritte le principali scelte effettuate e le caratteristiche risultanti di questa macchina.

Come già detto, la ruota del carro ha un diametro di 1,86 m, mentre in base a considerazioni strutturali si è scelto un diametro per la vite senza fine solidale all'albero di 140 mm e un diametro della ruota m di 1,2 m: ciò comporta un'altezza massima dell'odometro di 2,2 m. La sua larghezza è prevalentemente determinata dall'ingombro della ruota m : considerando uno spessore delle ruote del carro poste a terra di 100 mm, si ottiene una larghezza complessiva della macchina di 1,4 m. La lunghezza dell'odometro è dettata principalmente dal diametro della ruota a terra, dal diametro della ruota f e dalla lunghezza dei supporti per il traino. Il diametro della ruota f dipende dal numero di miglia che si vogliono misurare senza ricaricare l'odometro durante il viaggio; perciò ipotizzando 40 sedi per l'inserimento di 40 sassolini si può stimare un diametro della ruota f di 1 m. Infine, si è supposto che i supporti per il traino abbiano una lunghezza di 1 m. Tenendo conto dei parametri indicati si ottiene una lunghezza complessiva di 4,2 m. Qualche considerazione deve essere fatta sull'alloggiamento della ruota n . Innanzitutto si osserva che l'albero di trasmissione, che è azionato dalla ruota m e movimenta sia la ruota f che la n , deve avere due appoggi. Il primo appoggio dell'albero si suppone sia posto dietro la ruota m per la presenza di una sbarra del telaio proprio dietro di essa, mentre per il secondo occorre formulare un'ipotesi. Osservando il disegno si può notare che il secondo

appoggio dell'albero è ricavato da un foro in una sbarra del telaio; qui sono presenti però anche delle "staffe" che collegano a telaio la ruota n . Tale configurazione non permetterebbe al sistema di funzionare così come è rappresentato poiché sarebbe impedito l'ingranamento tra vite senza fine e ruota dentata; perciò al fine di non discostarsi troppo dalla soluzione ideata da Leonardo si è deciso di ricavare il secondo appoggio dell'albero sulla sbarra del telaio e di aggiungere una staffa con un'opportuna geometria così che questa faccia da cuscinetto alla ruota n e la colleghi a telaio. Dalle considerazioni fatte si è realizzato il prototipo virtuale mostrato in (Figura 14).

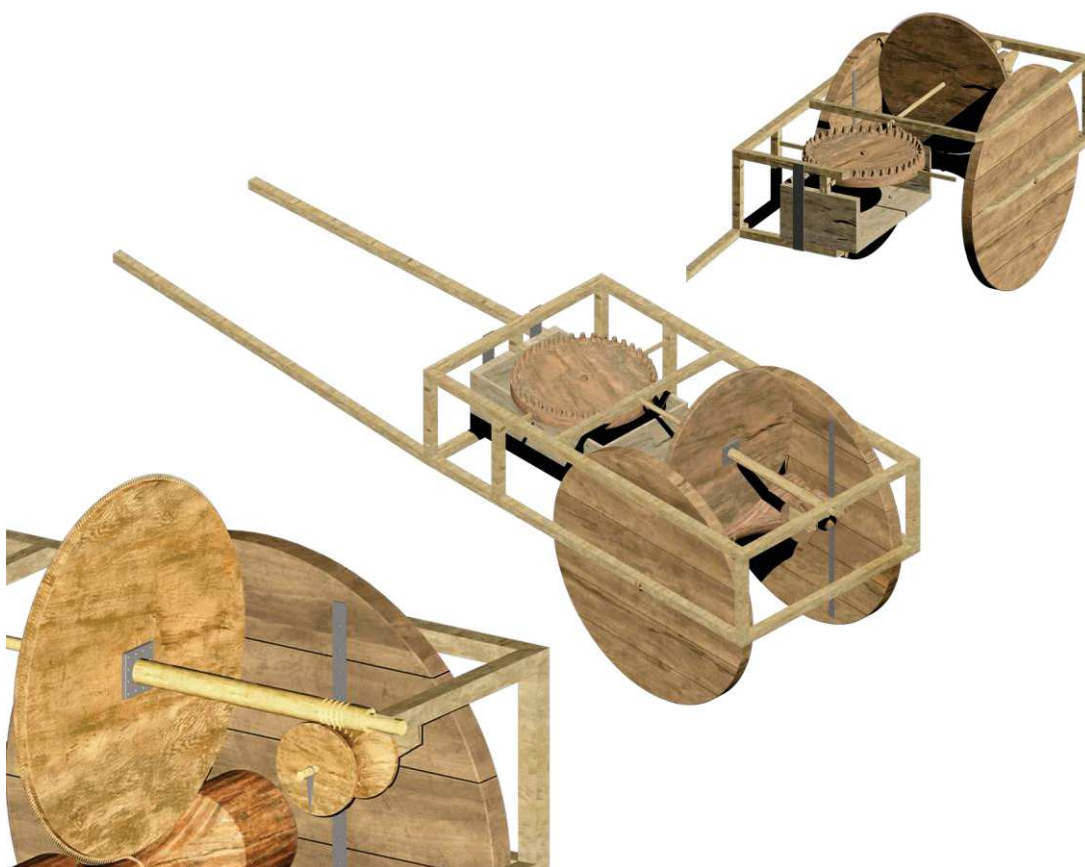


Figura 14 Prototipo virtuale 3D dell'odometro di Leonardo (al centro) e particolari della ruota f che fa cadere il ciottolo (in alto a sinistra) e della ruota n per la visualizzazione della distanza percorsa (in basso a destra).

La grande balestra.

La *balestra* è un'arma da lancio di origini molto antiche, concepita indipendentemente in Grecia e in Cina per aumentare la potenza e la gittata possedute dall'arco. Successivamente i greci idearono la balista, che imprime la velocità iniziale al proietto tramite una molla torsionale realizzata mettendo in trazione funi avvolte su due cilindri.

Vitruvio nel *De Architectura* descrive un brillante schema di massima per la progettazione della balista, basandosi sulle conoscenze apprese dai suoi maestri e dalle sue esperienze personali: in questo modo, in caso di guerra imminente, anche chi non possedeva conoscenze fisico-matematiche relative al problema sarebbe stato in grado di costruire velocemente questa macchina.

Tra il 1485 e il 1492 anche Leonardo da Vinci si avvicina a questo problema come testimoniano i fogli 149a e 147v del *Codice Atlantico*: essi descrivono due balestre giganti che differiscono leggermente per il sistema di tensionamento dell'arco e riportano anche alcuni particolari della trasmissione. Leonardo non ha mai realizzato un prototipo fisico di tali balestre: oggi però esistono diverse riproduzioni in scala 1:1 della balestra gigante riportata nel foglio 149a, una delle quali conservata nel Museo Nazionale della Scienza e Tecnologia Leonardo Da Vinci di Milano. Il paragrafo seguente esamina nel dettaglio la balestra riportata da Leonardo nel foglio 147v: successivamente alla sua descrizione saranno evidenziate qualitativamente le maggiori differenze rispetto alla balestra 149a di Leonardo ed alla Balista di Vitruvio; infine saranno descritti i passi seguiti per la realizzazione del modello virtuale.

Dall'analisi del disegno di Leonardo si può capire come il grande scienziato avesse concepito il funzionamento della balestra; questa può essere macroscopicamente suddivisa in tre sottosistemi: l'arco, il sistema di carica e il sistema di sgancio. L'arco è costituito da un fascio di due lamine di lunghezza diversa a sezione variabile: tale

scelta permette di sfruttare in maniera ottimale il materiale riducendo al contempo il peso del sistema. I dettagli delle foglie dell'arco raffigurati in (Figura 15) mostrano che queste, nella parte iniziale, sono sagomate in modo tale da impedire scorrimenti trasversali alla direzione di carica. Inoltre sono anche visibili i tiranti che hanno la funzione di tenere compresse le due foglie; lo stesso scopo, probabilmente, aveva il particolare a forma di "S", visibile nella parte in alto a destra della stessa figura, accoppiato a uno analogo nella parte anteriore delle foglie tramite una fune tesa.

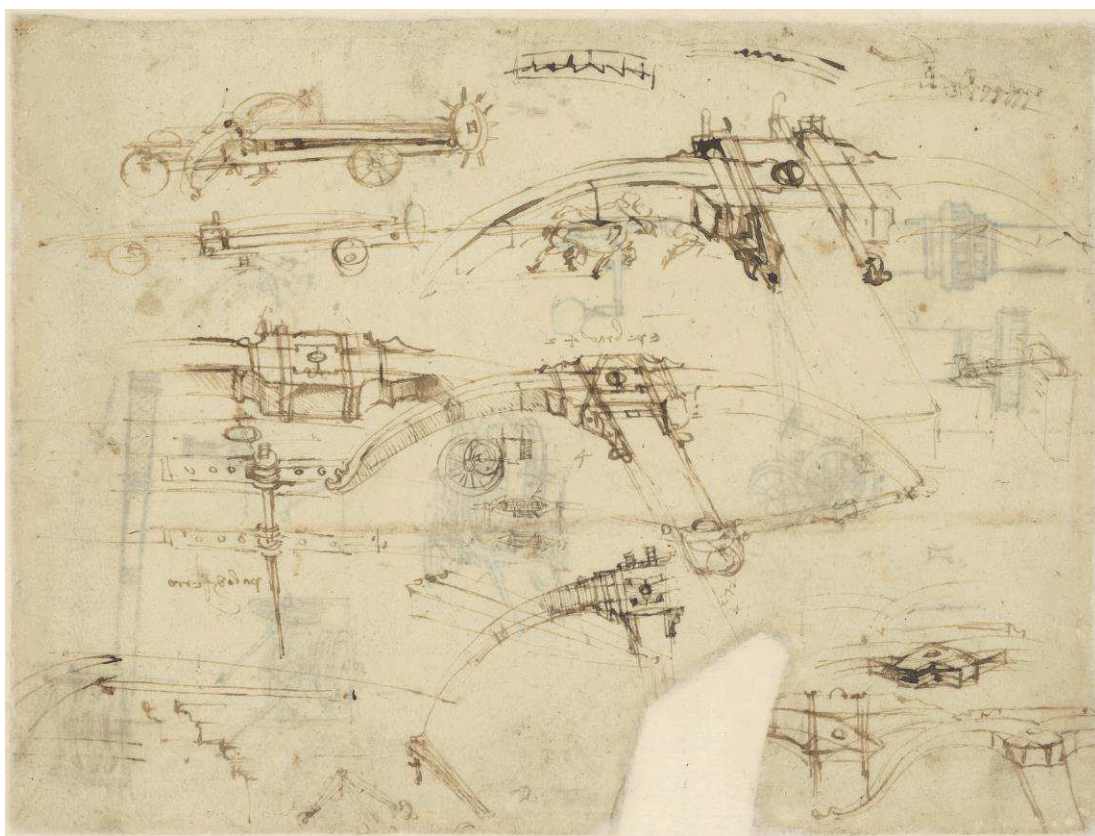


Figura 15 Balestra gigante, Codice Atlantico, f.147v-b, 1485-1492 circa, Penna e inchiostro, incisioni in punta di stilo, 206x278 mm, Milano, Veneranda Biblioteca Ambrosiana.

Osservando lo schizzo del particolare della molla, disegnato separatamente, si può notare la presenza di una trave passante sotto le foglie della balestra (il dettaglio di tale

particolare è rappresentato con chiarezza sul lato sinistro delle molle) il cui scopo potrebbe essere quello di sostenere la parte centrale delle foglie, di peso rilevante. Per lo stesso motivo la balestra viene posizionata tra gli appoggi dei due assi anteriori. Il sistema di carica è caratterizzato da un principio di funzionamento assai efficace e molto utilizzato anche ai nostri giorni per la movimentazione di assi lineari, soprattutto per l'azionamento delle macchine automatiche. Una grande ruota dotata di maniglie viene fatta ruotare da una o più persone; essa è calettata sull'albero di una vite senza fine la cui rotazione causa la traslazione di una chiocciola; questa è collegata a un meccanismo di sgancio che tende una fune, deformando le foglie della balestra. La chiocciola e la vite senza fine formano un sistema chiave nella macchina di Leonardo in quanto trasformano il moto di rotazione della ruota di comando nel moto di traslazione del meccanismo di sgancio. Al fine di spiegare il principio di funzionamento, si consideri di dover avvitare un dado su una vite: se la vite è bloccata si nota che in corrispondenza a una rotazione completa del dado questo trasla di una quantità pari al passo. Se invece si fa ruotare la vite intorno al proprio asse, lasciando libero il dado, questo ovviamente ruota rigidamente insieme alla vite; ma se al dado viene impedita la rotazione, per esempio vincolandolo a scorrere su una guida, questo inizia a traslare lungo l'asse della vite stessa. Quanto appena descritto è il principio sfruttato da Leonardo per convertire il moto di rotazione della vite senza fine nel moto di traslazione del sistema di sgancio: sicuramente quest'ultimo, anche se non risulta visibile dal disegno, prevede la presenza di supporti cavi filettati internamente con la funzione prima descritta per il dado. Invece il disegno mostra chiaramente il sistema utilizzato per bloccare la rotazione della chiocciola che porta il meccanismo di sgancio: si possono notare tre tavole rettangolari che passano nel sistema di sgancio e vanno a infilarsi all'interno delle cavità ricavate nel corpo della balestra così da creare il vincolo di forma desiderato. L'osservazione dei particolari posti in alto suggerisce che

la vite senza fine non animi solo il movimento del sistema di sgancio ma anche quello di una seconda chiocciola, posizionata a valle. Tale elemento potrebbe essere stato introdotto da Leonardo al fine di poter contare su un ulteriore appoggio per la vite senza fine, che risulta lunga circa 16-17 m, così da ridurre la freccia generata dalla forza peso. L'ultimo sottosistema di questa macchina è il sistema di sgancio: le corde imprigionate dalla noce vengono messe in tensione dalla traslazione di quest'ultimo e quindi finiscono per deformare le foglie della balestra, così da trasformare il lavoro delle persone che ruotano il volante di comando in energia potenziale di deformazione della fune (e in parte dell'arco). Tale sistema non viene rappresentato nel disegno del foglio 147v, per cui nella realizzazione del modello della balestra si è fatto riferimento a quanto documentato nel foglio 149a, che propone due schemi alternativi: il meccanismo di sgancio può essere azionato manualmente tramite una leva oppure tramite percussione di un martello.

Le balestre di Leonardo e quella di Vitruvio.

Vale la pena fare qualche considerazione comparativa tra la balestra appena descritta e quella più nota del foglio 149a. A parte le notevoli differenze dal punto di vista estetico, nella parte terminale delle due balestre sono interessanti le diverse soluzioni funzionali per la realizzazione dell'arco e del sistema di trasmissione.

La molla a balestra del foglio 149a è costituita da tre foglie invece delle due presenti nel foglio 147v; inoltre nel foglio 149a Leonardo riporta meno dettagli sia su come tenere compresse le foglie della balestra sia sul sostenimento del relativo peso. Inoltre si nota la redistribuzione degli assi delle ruote, i quali sembrano essere equispaziati rispetto alla disposizione presentata nel foglio 147v. Passando al sistema di carica, entrambi i progetti sono basati sull'utilizzo del meccanismo chiocciola-vite senza fine per trasformare il moto circolare in moto traslatorio: tuttavia nel disegno del foglio 149a non è presente il cuscinetto mobile rappresentato nel foglio 147v, il che rende

tale sistema meno funzionale a causa delle elevate frecce a cui sarebbe sottoposta la vite a causa della sua lunghezza. Inoltre, la trasmissione illustrata nel foglio 149a presenta un ulteriore stadio di riduzione costituito da una coppia vite senza fine-ruota dentata, che a scapito di una maggiore complessità consente una notevole riduzione della coppia da applicare in ingresso al sistema. Infine, può risultare interessante mettere in rilievo le differenze tra quanto descritto da Vitruvio nel *De Architectura* e le macchine illustrate da Leonardo nel *Codice Atlantico*. Innanzitutto Vitruvio delinea il progetto di una balista, una macchina da lancio leggermente diversa dalla balestra in quanto la velocità del proietto deriva dalla conversione dell'energia elastica torsionale di due matasse di funi. Inoltre lo scopo dei due inventori è sicuramente diverso: mentre Leonardo intende descrivere solo funzionalmente una macchina da guerra di grandi dimensioni, Vitruvio vuole fornire delle linee guida di progetto che consentano di costruire rapidamente macchine da guerra di diverse dimensioni: egli è un antesignano della progettazione modulare in quanto descrive quantitativamente il progetto dell'intera macchina in base al diametro degli elementi elastici, da scegliere in funzione della massa del proietto.

Prototipo virtuale della balestra di Leonardo.

Al fine di realizzare il prototipo virtuale della balestra di Leonardo, si sono utilizzati i pochi dati scritti nel *Codice atlantico* e si sono adottate alcune ipotesi basate sugli elementi rappresentati nel foglio 147v.

L'elemento chiave per apprezzare la dimensione della macchina è la lunghezza dell'arco, che viene specificata in "*braccia 42*": considerando che un braccio fiorentino corrisponde a 0,5836 m, si ottiene una lunghezza di 24 m; una semplice proporzione consente di valutare la lunghezza complessiva della macchina in 22 m. L'altezza della macchina, invece, può essere stimata in circa 1,5 m in base alle dimensioni del cavallo, disegnato nell'atto di trainare la balestra; le proporzioni del

disegno, infine, suggeriscono che le ruote abbiano un diametro di circa 1,8 m. La ruota utilizzata per azionare il meccanismo di carica ha dimensioni leggermente inferiori alle ruote della macchina, per cui si è assunto un diametro di 1,6 m. Tutte le altre dimensioni sono state ricavate in modo da essere proporzionate al meglio con il disegno realizzato da Leonardo. Infine, come già detto, il foglio 147v non riporta in modo chiaro il sistema di sgancio, perciò nel prototipo realizzato si è preso in considerazione quello la cui noce è azionata tramite un manovellismo disegnato nel foglio 149a. Da quanto detto si è ottenuto il prototipo virtuale in (Figura 16).

Immaginando che le parti della balestra fossero costruite in legno d'olmo, si ottiene una massa complessiva di 8,5 tonnellate. Oltre ai dati sull'ingombro complessivo, è anche possibile stimare le prestazioni della macchina, dopo aver fatto qualche assunzione sui dati mancanti.

La base di partenza per i calcoli seguenti sono le caratteristiche della fune, dal momento che è essa stessa ad accumulare la maggior parte dell'energia potenziale di deformazione: si assume una fune del diametro di 40 mm sottoposta ad una deformazione massima del 6%. Volendo giustificare la lunghezza del corpo della balestra si ipotizza che, quando la fune è tesa ma non deformata, la noce si trovi a circa 12 m dalla balestra mentre la sua corsa, corrispondente alla massima deformazione della fune, è pari a circa 3 m. Considerando che la vite senza fine abbia un passo di 18 mm, la corsa della noce comporta una rotazione di circa 110 giri; tenendo conto del basso rendimento degli accoppiamenti ($\sim 0,25$) occorre applicare una forza tangenziale di circa 2 t alla ruota di comando. La balestra in queste condizioni immagazzina un'energia di 350 kJ, il che permette di lanciare un masso di 150 kg con una velocità di circa 250 km/h; se la balestra viene posizionata sul terreno con un angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale di 12° , si ottiene una gittata utile di quasi 200 m. Questi conti, seppure approssimativi, mettono in evidenza una lunghezza eccessiva

della vite di carica e soprattutto la necessità di esercitare forze elevatissime per caricare il sistema, anche in corrispondenza di un numero di giri molto elevato della ruota di comando; anche un diverso dimensionamento del sistema di carica non consente di modificare la situazione: forse Leonardo stesso ha intuito queste difficoltà perché la balestra disegnata nel foglio 149 presenta un ulteriore rapporto di riduzione, capace di risolvere il problema.

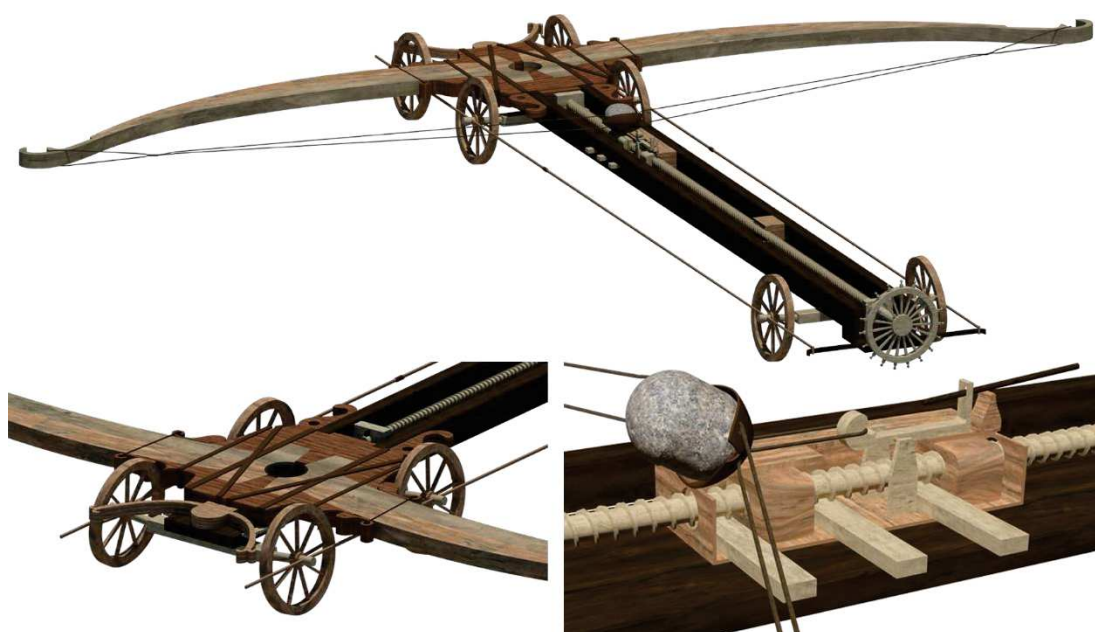


Figura 16 Prototipo virtuale della balestra gigante di Leonardo (in alto), particolare anteriore (in basso a sinistra) e del sistema di carica (in basso a destra).

Lo sviluppo di un'applicazione di AR per le macchine di Leonardo.

Al fine di divulgare lo studio esposto nei precedenti paragrafi, offrendo una rigorosa interpretazione delle raffigurazioni presenti nei disegni di Leonardo e proponendone il confronto con le soluzioni riportate da Vitruvio nel suo *De Architectura*, è stata sviluppata un'applicazione di AR basata sui prototipi virtuali elaborati. La realizzazione di una tale soluzione per le macchine leonardiane, opere che esprimono forse il più alto livello dell'inventiva del genere umano, mira a rendere comprensibili

tali disegni anche ad un pubblico di non esperti, mettendo in relazione le rappresentazioni originali con la loro rielaborazione digitale e sfruttarne il potenziale comunicativo. A livello informatico l'applicazione è stata sviluppata per piattaforma *Android* facendo uso del *game engine* di sviluppo *Unity 3D*, mentre al fine del riconoscimento del *target* è stata utilizzata la piattaforma *Vuforia*. Su tale portale può essere infatti caricata l'immagine che si vuole utilizzare come *target*, questa viene quindi analizzata e ne vengono individuate le principali *feature* che saranno poi riconosciute dall'applicazione stessa. Validata la qualità dell'immagine si procede al *download* del *dataset*, all'interno del quale si trovano tutti gli elementi necessari al riconoscimento del *target*. A questo punto possono essere importati in ambiente *Unity 3D* tutti gli elementi necessari allo sviluppo dell'applicazione: l'*image-target* e il *dataset* di *Vuforia*, l'*arCamera* che simula la camera del dispositivo che sarà utilizzato dall'utente finale, i modelli delle macchine con relativi materiali ed infine un sistema di illuminazione e ombre per rendere più realistica la visualizzazione (Figura 17).

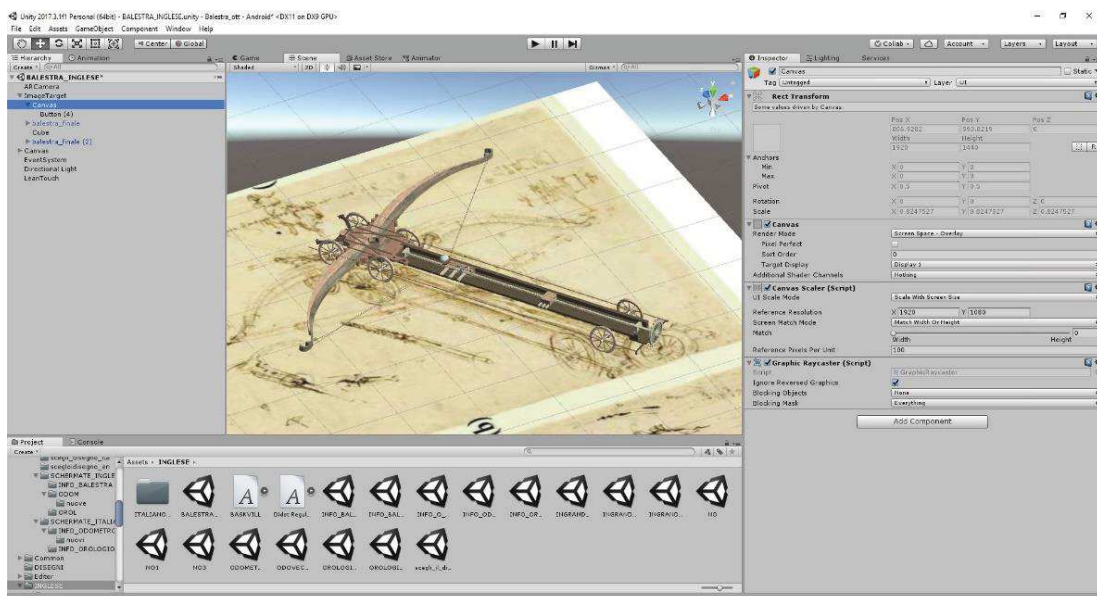


Figura 17 Modello, target, luci e arCamera all'interno dell'ambiente software Unity.

Inseriti i modelli alla giusta scala e nella posizione corretta rispetto ai target è possibile generare l'applicazione e testarla sul dispositivo predisposto al suo utilizzo, in questo caso *smartphone* e *tablet*. L'interfaccia dell'applicazione consente la visualizzazione del modello digitale in maniera semplice ed immediata. L'utente, una volta avviata l'applicazione, inquadrando con la fotocamera del dispositivo utilizzato uno dei disegni, vedrà generarsi sullo schermo il modello virtuale della macchina proprio in corrispondenza della sua rappresentazione sul foglio. Una volta visualizzato il modello, questo potrà essere indagato in maniera del tutto svincolata dal disegno, ne potranno essere osservate le singole componenti e ne potrà essere simulato il reale funzionamento (Figura 18).



Figura 18 Visualizzazione del modello virtuale generato dall'applicazione. L'interazione con esso è resa possibile dal tocco delle dita sullo schermo e tramite un bottone che permette di attivarne il meccanismo.

Inoltre sarà possibile accedere ad una sezione relativa all'analisi delle scelte operate da Leonardo dal punto di vista meccanico, anche in comparazione con quelle precedentemente effettuate da Vitruvio. Cliccando sul disegno originale è poi possibile esplorarne i dettagli grazie ad un'immagine ad alta risoluzione. In (Figura 19) si riportano tutte le principali schermate dell'applicazione.

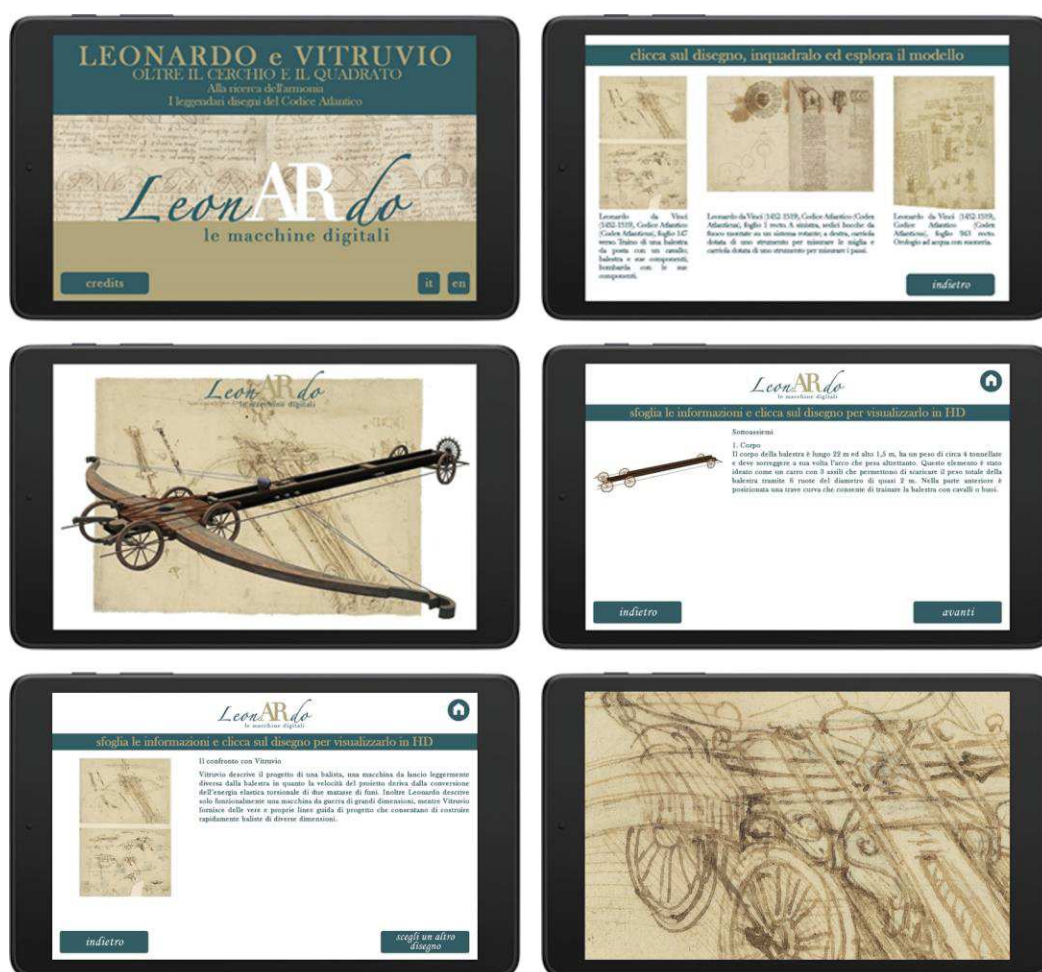


Figura 19 Schermata di avvio dell'applicazione (1), scelta la lingua, è possibile selezionare uno dei disegni (2), inquadrato il modello digitale della macchina sarà generato sullo schermo del device (3), è quindi possibile approfondirne il funzionamento richiamando delle schede che ne descrivono i sottosistemi (4). Un'ulteriore scheda (5) illustra poi il confronto tra il disegno leonardiano e il medesimo progetto nella versione vitruviana. Cliccando sul disegno è infine possibile coglierne i dettagli esplorando un'immagine ad alta risoluzione (6).

L'efficacia di questa esperienza, condotta nell'ambito della mostra di Fano, dimostra quanto sia auspicabile estendere nelle medesime modalità tale studio all'intero repertorio delle macchine di Leonardo, e costituire così un patrimonio digitale della meccanica leonardiana che sfrutti le possibilità concesse dalle moderne tecnologie per nuove forme di indagine, di fruizione e di narrazione. Un approccio digitale in grado di sciogliere i nodi legati alle difficoltà nella comprensione dei disegni e all'articolato passaggio dal momento dell'ideazione a quello della rappresentazione, potendo aggiungervi anche quello del funzionamento tramite la sua simulazione virtuale. La possibilità di esplorare i meccanismi leonardiani riproducendoli in scala reale ha inoltre permesso un confronto più diretto con la fonte primaria vitruviana mettendone "meccanicamente" in evidenza analogie e reinterpretazioni. Con l'uso del digitale si sono definite metodiche e buone pratiche tecnologiche per il passaggio dal modello cognitivo a quello comunicativo, generando modalità di interazione che hanno reso fruibile e comprensibile il disegno di una macchina pensata dinamicamente ma che il disegno limita naturalmente in una sua forma parziale e statica. La soluzione di AR, realizzata nella filiera descritta, ha invece restituito quei disegni nella forma del pensiero dell'artista ricreando quel fascino e quella suggestione che permettono di penetrare con sempre maggiore attenzione e precisione la mente del più grande genio della nostra storia.

3.2 Dal rilievo integrato al racconto virtuale dello spazio. Il *Palazzo Ducale di Urbino* e lo *Studiolo del Duca*.

Nell'ambito del CH si afferma da anni la necessità di una digitalizzazione scientifica diffusa dei singoli oggetti così come dei luoghi della cultura che li ospitano. Digitalizzare, nei suoi tre significati fondamentali di documentare, comprendere e comunicare, costituisce la spina dorsale di un processo di trasformazione del CH, che lo consegna a nuova e duratura vita. L'elaborazione del *facsimile* digitale, quale nuovo strumento al servizio del bene culturale, permette al CH di conquistare l'ubiquità intuita da Valéry già nel 1928 (Valéry, 2003), consentendone la fruizione a distanza, la libera circolazione contemporanea e in più parti del mondo, e democratizzando di fatto l'opera d'arte, garantendone l'accesso anche laddove ne sia negata la dimensione fisica. Da questi assunti teorici-metodologici muove l'intero progetto di ricerca CIVITAS (Paolo Clini, Quattrini, Bonvini, et al., 2020; Paolo Clini, Quattrini, Nespeca, Angeloni, & Mammoli, 2020) che sta conducendo una campagna di digitalizzazione della Galleria Nazionale delle Marche e dell'edificio che la ospita: il Palazzo Ducale di Urbino. All'interno del progetto, il caso di studio sviluppato nel presente paragrafo è la fruizione in VR dello Studiolo del Duca, una delle più

importanti testimonianze del Rinascimento italiano. L'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di dimostrare come il *facsimile* funga da leva principale di un nuovo umanesimo digitale, qui con particolare riguardo agli spazi storici e alla loro percezione. Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi operative: l'acquisizione mediante scansioni laser e fotografiche dell'ambiente dello Studiolo, l'elaborazione digitale tridimensionale del suo *facsimile* digitale ed il conseguente sviluppo di un'applicazione di VR per la sua fruizione. Oltre alla semplice visualizzazione, sono state sviluppate interazioni che permettono di apprendere in modo nuovo e coinvolgente, richiamando diversi contenuti multimediali: testi, immagini e audio, per offrire al visitatore un'esperienza che aumenti il livello di comprensione e di interesse per lo spazio storico visitato.

Il dibattito sui musei virtuali è acceso da anni e numerosi sono gli studi nel settore scientifico del disegno che hanno contribuito alla formazione e allo sviluppo del concetto di museo virtuale (Huffman, Giordano, & Bruzelius, 2017; Ippoliti, Meschini, Moscati, & Rossi, 2012): significative possibilità risiedono nei tour virtuali (Calisi et al., 2016; Paolo Clini & Quattrini, 2011a), nei database on line che contribuiscono a navigazioni in remoto (Brusaporci, Centofanti, & Maiezza, 2017; Gaiani et al., 2007; Parrinello, Picchio, & Bercigli, 2016; Quattrini, Frappicini, & Nespeca, 2018) e nelle applicazioni di AR, MR e VR (Bolognesi & Aiello, 2020; Marraffa & Fatta, 2020; Meschini, Rossi, Petrucci, & Sicuranza, 2017; Sdegno, Cochelli, Riavis, & Veneziano, 2018). Non mancano poi studi concentrati sugli aspetti legati alla soddisfazione degli utenti nella sperimentazione di tali soluzioni (Pescarin, 2014). Sulla base di questi possiamo concludere che varie forme di musei digitali hanno dimostrato il loro ampio potenziale e che fondamentale sia stato il contributo a essi fornito dal settore scientifico del disegno: una disciplina che si caratterizza come un ponte tra i saperi, ovvero una

connessione consapevole tra l'ambito umanistico-pedagogico e quello della *computer science* (Luigini & Panciroli, 2018).

La necessità di condividere il CH per via digitale è stata rimarcata nell'Anno Europeo del Patrimonio Culturale (Salerno, 2020; Sciacchitano, 2019) e quanto mai ribadita da numerosi documenti redatti a seguito delle chiusure dei luoghi della cultura a causa dell'attuale pandemia. Un bilancio e una mappatura completa delle tante iniziative sviluppate in questo periodo sono sicuramente prematuri, ma le comunità scientifiche e i network stanno effettuando monitoraggi efficaci che consentiranno di trarre lezioni significative. Indubbiamente la sfida maggiore risiede nella necessità di sostenere economicamente le chiusure o le ri-aperture dei musei, dando sostegno all'intero settore turistico. Lavori come il presente si inseriscono nel solco di esperienze utili a sperimentare un nuovo modo di vivere le collezioni museali, non un semplice palliativo ma un sistema di fruizione strutturato che trovi terreno fertile nelle tante ricerche condotte per la digitalizzazione del CH. I tempi sono infatti maturi perché la strategia digitale sia parte integrante delle strategie museali e per garantire la libera circolazione di manufatti e spazi in ogni momento e luogo.

Il caso di studio qui affrontato è lo Studiolo di Federico da Montefeltro, un luogo unico tra i più rari e preziosi capolavori del Rinascimento italiano. Esso è collocato al primo piano del Palazzo Ducale di Urbino, residenza dal '400 dei Montefeltro e oggi principale museo e complesso storico della Regione Marche (Polichetti, 1985).

Nel Rinascimento gli studioli avevano un importante valore simbolico e politico: erano il luogo destinato al riposo virtuoso e meditativo del Signore, ne esprimevano la personalità ed i più intimi ideali e lì erano raccolti i suoi oggetti più preziosi. Diversi studioli sono stati realizzati durante il Rinascimento, lo Studiolo di Urbino è però uno dei pochi ad essere rimasto pressoché intatto fino ad oggi. Realizzato intorno al 1476, è uno spazio molto piccolo, dalla pianta irregolare e decorato secondo fasce

sovrapposte (Figura 20): la fascia inferiore ospita un *continuum* di tarsie lignee, una straordinaria opera che crea un'illusione di dilatazione dello spazio grazie agli elementi raffigurati (Marchi, 2015). Questi rappresentano nicchie e armadi con ante semiaperte da cui si intravedono libri, strumenti scientifici e altri oggetti, figure rappresentanti le imprese ducali e sedili ribaltabili, alcuni chiusi e altri aperti. Tutte le raffigurazioni raccontano la figura del Duca secondo il suo duplice aspetto di uomo di guerra e di pace. Al di sopra di queste si trovano i ventotto ritratti dei cosiddetti *Uomini Illustri*, grandi pensatori e intellettuali, religiosi e non, antichi e contemporanei. Questa fascia, a differenza delle tarsie e del soffitto, fu presto smembrata, in un'operazione particolarmente dannosa che ha portato una metà dei ritratti ad essere conservata dal 1863 al Louvre (se ne conservano copie con un'alterazione cromatica nello Studiolo) e solo l'altra metà, acquistata dallo Stato italiano nel 1934, ad essere esposta nel luogo per cui essi furono pensati. Infine, a rendere ancor più suggestivo lo spazio è lo splendido soffitto in legno a lacunari dorati, riportante le stesse imprese ducali che esaltano le tarsie.

Come già riportato in questo testo, lo sviluppo delle tecnologie digitali permette oggi di ricreare con perfetta fedeltà, attraverso gli strumenti della realtà virtuale, non solo beni mobili ma anche luoghi, spesso essi stessi veri e propri capolavori, di visitarli ed esplorarli con la stessa efficacia dell'esperienza fisica. Inoltre la visita può essere arricchita di contenuti multimediali confezionati su misura per il visitatore, sia questo un adulto, un adolescente, un bambino o uno specialista del settore.

Punto di partenza per la nuova fruizione proposta è la riproduzione digitale, su cui può essere sviluppata una narrazione virtuale, mirata a generare un'esperienza che non si limiti a mostrare quanto visibile con una visita fisica, ma crei ulteriori suggestioni nel visitatore, svelando i significati delle rappresentazioni e aprendo nuove connessioni interdisciplinari con altre opere e arti.

Il lavoro condotto sullo Studiolo persegue proprio queste finalità ed è stato sviluppato tentando di definire una buona pratica di filiera che, partendo dalla ricostruzione digitale, offra in ogni momento un'adeguata possibilità di fruire del CH in remoto.

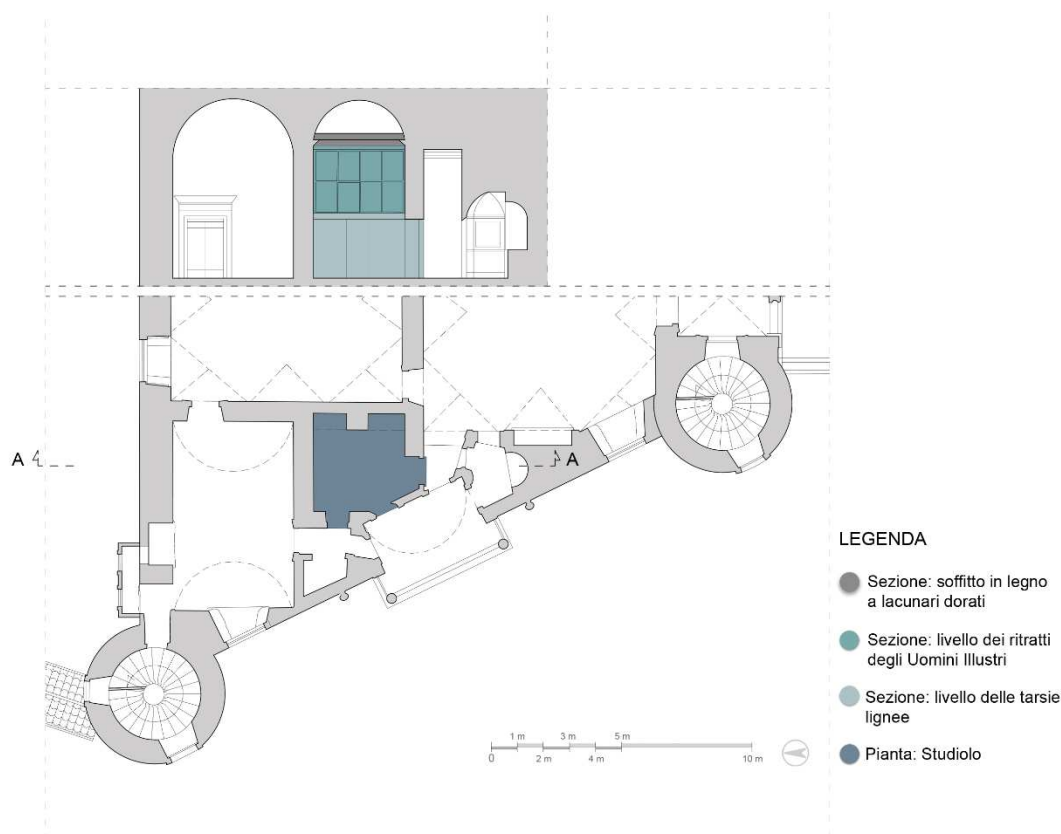


Figura 20 Pianta e sezione dello Studiolo del Duca.

Viste le sue peculiarità geometriche, raccolto in pianta ma dal notevole sviluppo in alzato, e materiche, dovute a rivestimenti altamente riflettenti, l'acquisizione e la conseguente modellazione digitale dello Studiolo sono state di per se stesse una sfida: esse sono state condotte trattando lo spazio come suddiviso in 4 livelli, ovvero pavimentazione, tarsie lignee, ritratti degli Uomini Illustri e soffitto a lacunari.

Lo stato dell'arte sulla creazione di *facsimili* digitali risulta sufficientemente solido per la realizzazione di un rilievo integrato (Attenni, Bartolomei, Hess, & Ippolito, 2017;

Michele Russo & Manfredini, 2015) che porti all'elaborazione di un modello digitale che, essendo finalizzato ad una visualizzazione virtuale (García-León, Sánchez-Allegue, Peña-Velasco, Cipriani, & Fantini, 2018), garantisca una percezione realistica dell'ambiente con particolare riferimento alle problematiche di fedeltà e calibrazione del colore (Gaiani, 2015) e di ottimizzazione delle geometrie e *texture* (Merlo, Fantini, Aliperta, Lavoratti, & López Hernández, 2013). La campagna di acquisizione ha avuto inizio con la realizzazione di 3 scansioni laser, impostandone la risoluzione di presa a 3,1mm@10m. Per ogni stazione è stata inoltre acquisita un'immagine a 360°, utilizzando una fotocamera esterna montata su testa panoramica. Si è quindi proceduto alle acquisizioni fotografiche, volte all'elaborazione di una *texture* realistica e pianificate in maniera differente per ciascun livello. Tutte le operazioni di ripresa sono state condotte in condizioni di illuminazione controllate, escludendo fonti esterne di illuminazione ed inserendo un *colorchecker* per la successiva correzione delle immagini acquisite.

Per la pavimentazione sono stati realizzati degli scatti dal perimetro verso il centro della stanza, impiegando un sistema d'illuminazione a luce diffusa per evitare problematiche dovute ai riflessi sulla cera lucida.

Per l'acquisizione fotografica del livello delle tarsie lignee, estremamente riflettenti per l'applicazione di successivi strati di vernici protettive, si è deciso di ricorrere ad un'illuminazione polarizzata, ideando un sistema di presa idoneo alla successiva elaborazione fotogrammetrica (Sernani, Angeloni, Dragoni, Quattrini, & Clini, 2019). Su cavalletto fotografico è stata montata una barra in alluminio, con un pannello led fissato a ciascuna delle due estremità e fotocamera al centro. Le luci sono state quindi orientate a 45° verso la superficie da acquisire e schermate con una pellicola polarizzata, l'obiettivo della fotocamera è stato invece dotato di un filtro polarizzatore composto da una parte fissa ed una in grado di ruotare. Quando la luce emessa dai

pannelli led incide sul filtro, è infatti permesso il passaggio soltanto della parte di radiazione il cui campo elettrico oscilla in direzione perpendicolare alle sue fibre, la riflessione superficiale sulle tarsie avviene pertanto su quello stesso piano e può essere completamente eliminata ruotando il filtro montato sulla fotocamera, posizionandolo in modo tale da bloccare la radiazione entrante nell'obiettivo con quella stessa direzione (Figura 21).

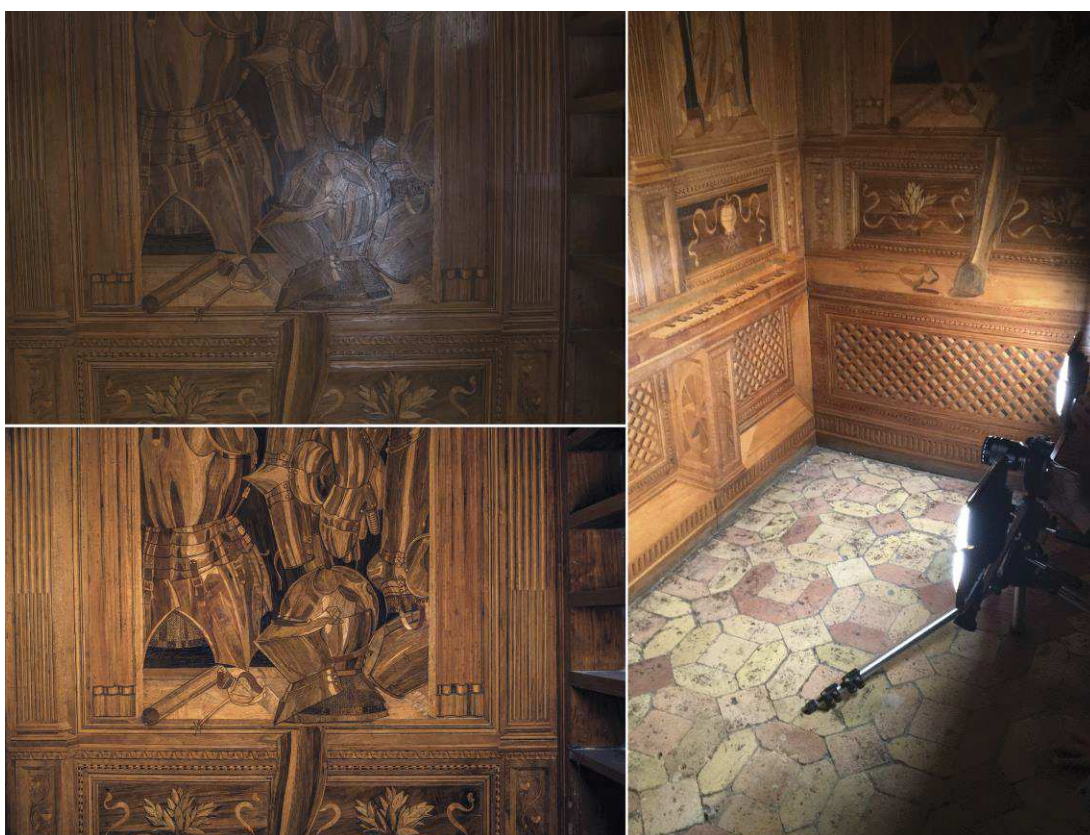


Figura 21 A sinistra, confronto tra le acquisizioni fotografiche delle tarsie lignee senza e con filtro polarizzatore. A destra un'immagine del sistema di ripresa utilizzato.

Spostandosi parallelamente alle pareti lungo tutto il perimetro, si sono così acquisite 283 immagini in formato RAW, scattate ad 1 metro di distanza dalla parete, con una distanza focale fissa di 24mm, ottenendo una sovrapposizione del 70% tra scatti

consecutivi e un *Ground Sampling Distance* (GSD) inferiore a 0,4 mm. Si riporta uno schema delle acquisizioni laser scanner e di quelle fotografiche effettuate per la parete nord (Figura 22).

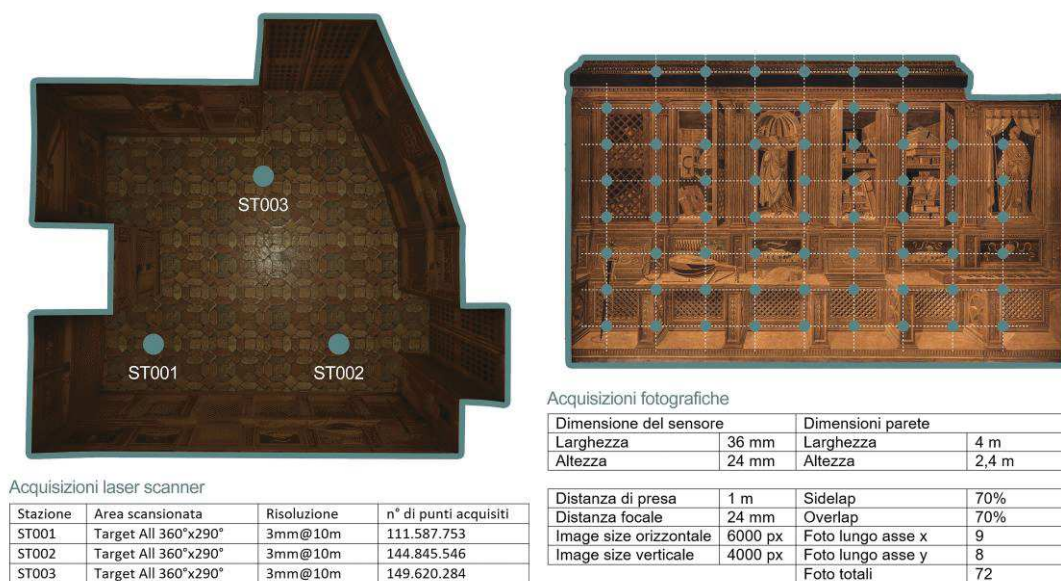


Figura 22 A sinistra, individuazione e dati delle stazioni laser scanner, a destra, individuazione degli scatti e progetto di presa fotografica di una parete.

Infine, per la volta a cassettoni sono state eseguite delle acquisizioni utilizzando un cavalletto ad altezza uomo. Considerando la finalità di una fruizione virtuale, un GSD di 10 mm è stato ritenuto sufficiente per questo elemento.

La successiva fase di elaborazione dei dati è stata ugualmente condotta operando in maniera distinta sui livelli individuati in sede di acquisizione.

Le nuvole di punti ottenute da laser scanner sono state allineate mediante il *software Leica Cyclone*⁵ ed integrate con le immagini panoramiche, ottenendone una singola colorata e costituita da oltre 400 milioni di punti. Questa, importata all'interno del

⁵ <https://leica-geosystems.com/it-it/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>

*software 3DReshaper*⁶, è stata segmentata in 4 parti coerenti con le acquisizioni fotografiche e processata per ottenerne delle superfici poligonali. La pavimentazione è stata ricondotta ad un semplice piano, la fascia delle tarsie lignee ed il soffitto sono stati invece semplificati (Figura 23) mantenendo un maggiore livello di dettaglio per gli elementi curvi.

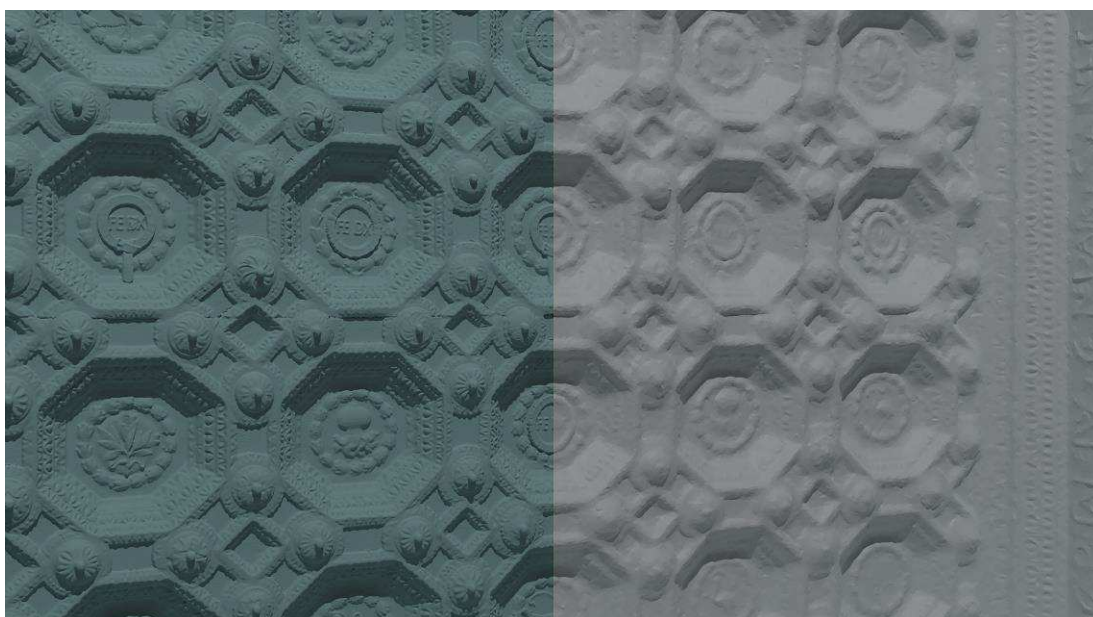


Figura 23 Mesh poligonale del soffitto a lacunari. A sinistra prima della decimazione (10 milioni di poligoni), a destra dopo (500 mila poligoni).

A causa delle citate peculiarità geometriche dello Studiolo, nell'acquisizione TLS si sono generate zone d'ombra nel livello degli *Uomini Illustri*. Per questo motivo si è deciso di realizzarne il modello geometrico, utilizzando il *software opensource Blender*⁷. Per rappresentare le pareti dello Studiolo e i dipinti nella loro dimensione esatta, ne sono stati disegnati gli ingombri partendo dalle ortoreimmagini da laser.

⁶ <https://www.3dreshaper.com/en/>

⁷ <https://www.blender.org/>

Ricorrendo all'uso di primitive *plane* ed estrusioni, sono state modellate le pareti e su ognuna di esse le tavole dei ritratti (Figura 24).



Figura 24 Mesh poligonale del soffitto a lacunari. A sinistra prima della decimazione (10 milioni di poligoni), a destra dopo (500 mila poligoni).

Realizzati ed ottimizzati i modelli 3D, il passo successivo ha visto la creazione dei materiali. Per il livello della pavimentazione e quello degli Uomini Illustri, tutte le caratteristiche visive sono state conferite mediante l'utilizzo di mappe procedurali. Per la realizzazione di alcuni materiali del livello degli *Uomini Illustri* (ganci metallici e tessuto della tenda) risultavano sufficienti quelle disponibili nel software, modificandone alcuni dettagli sfruttando la variazione del seme di casualità. Per le tavole di legno dei ritratti, la pannellatura lignea su cui sono disposti e la pavimentazione la *texture* è stata invece creata a partire da uno scatto fotografico. Anche in questo caso l'output è comunque rappresentato da mappe procedurali, ognuna delle quali controlla un aspetto specifico del materiale (Figura 25).

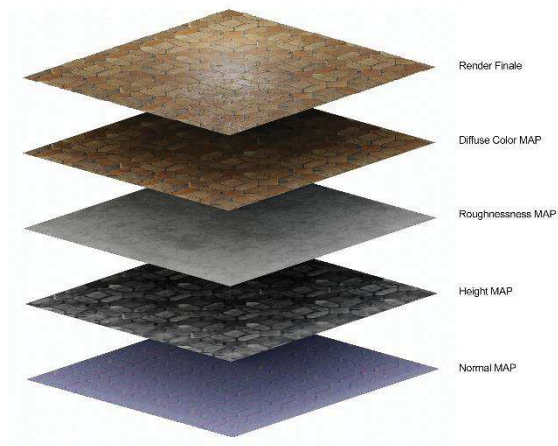


Figura 25 Mappe procedurali prodotte per la texturizzazione della pavimentazione.

Per il livello delle tarsie ed il soffitto, le acquisizioni fotografiche sono state post-prodotte e quindi importate insieme ai modelli precedentemente elaborati nell'ambiente software *Agisoft Photoscan*⁸. Qui, allineati i diversi scatti e riportati nel corretto sistema spaziale di riferimento, la texturizzazione è stata eseguita in maniera automatica (Figura 26).



Figura 26 Vista prospettica del livello delle tarsie lignee, modello texturizzato.

⁸ <https://www.agisoft.com/>

Ultima operazione condotta sui materiali è stato l'*unwrap* delle *texture*, che ne ha permesso una corretta applicazione, ottimizzando le corrispondenze tra le posizioni dei vertici nello spazio modello 3D e le posizioni dei medesimi vertici nello spazio *texture* 2D. Questo processo è stato particolarmente utile per le tavole dei dipinti degli *Uomini Illustri*, al fine di posizionare correttamente nello spazio UV le *texture* relative ai ritratti (Figura 27).

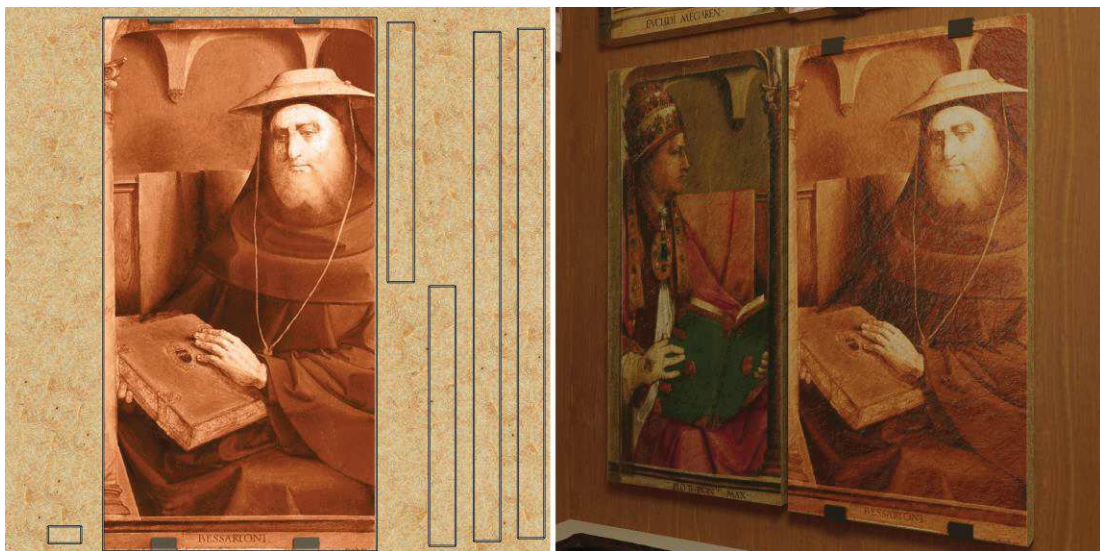


Figura 27 A sinistra, *unwrapping* della mappa base color relativa alla tavola di un dipinto e immagine del ritratto. A destra, la resa a seguito della renderizzazione.

Risultato finale di questa prima fase è dunque un facsimile digitale dello Studiolo, ottimizzato per una fruizione virtuale, costituito da *mesh* poligonali per un totale di circa 800 mila poligoni e 32 materiali (Figura 28).

Il lavoro descritto trova il suo compimento nello sviluppo di un'applicazione di VR. Questa tecnologia si è dimostrata molto efficace nel valorizzare l'esperienza del CH, offrendo strumenti ideali per attività divulgative. In questa sperimentazione si propone in particolare una piattaforma in grado di integrare modello virtuale e contenuti

culturali e storiografici, generando un *Interactive Thematic Virtual Environment* (ITVE) narrante i significati associati alle diverse rappresentazioni presenti nello Studiolo.



Figura 28 Sezione prospettica e viste dello Studiolo del Duca, modello 3D renderizzato.

Tale soluzione risulta efficace per il caso di studio proposto per due motivazioni: la prima è legata alle sue dimensioni contenute, che si prestano all'esplorazione virtuale senza necessitare di una simulazione degli spostamenti, la seconda riguarda invece l'elevato numero di elementi decorativi allegorici, di difficile comprensione senza una specifica formazione sulla storia e le arti rinascimentali, qui spiegati grazie agli

strumenti interattivi offerti dall'ambiente virtuale. L'interazione, nonché la spiegazione dei punti d'interesse, avviene tramite due tipologie di contenuti differenti: l'informazione testuale e quella audio. Per quanto riguarda il primo, tramite il controller è possibile richiamare delle icone, da cui visualizzare una didascalia che l'utente può osservare contestualmente all'elemento scelto. Il secondo veicolo implementato, ossia le tracce audio, è stato utilizzato per la spiegazione dei macro-elementi d'interesse della stanza; in particolare una traccia, avviata automaticamente indossando il visore, offre un'introduzione generale; le altre, richiamabili con lo stesso principio delle informazioni testuali, sono state invece utilizzate per descrivere nello specifico i due livelli (tarsie e Uomini Illustri). L'intero sviluppo dell'applicazione, realizzata per *Htc Vive*⁹, è stato effettuato all'interno della *game engine* Unity: importati i modelli in formato FBX, sono state inserite una luce *point* per l'illuminazione degli Uomini Illustri, una luce *spot* per quella della pavimentazione (Figura 29), ed un'immagine HDRI per simulare la luce naturale esterna.



Figura 29 Illuminazione del modello virtuale: a sinistra luce *point* per l'illuminazione dei ritratti, a destra luce *spot* per l'illuminazione della pavimentazione.

⁹ <https://www.vive.com>

Per quanto concerne le interazioni, sono stati utilizzati gli *Assets VRTK* per la libera esplorazione dello spazio virtuale, mentre la fruizione audio e testuale è stata realizzata tramite un sistema di *Virtual Button* in grado di spegnere ed attivare gli oggetti virtuali corrispondenti alle informazioni richieste (Figura 30).



Figura 30 Fruizione di contenuti multimediali in ambiente VR. Schede descrittive e contenuti audio possono essere richiamati tramite i controller.

Questo lavoro dimostra come il digitale possa operare profonde trasformazioni in una più moderna strutturazione di musei e mostre, permettendo a queste di uscire da gallerie e palazzi storici per portare il CH nelle case di tutti, creando un nuovo significato e senso, non solo alla circolazione del patrimonio mobile ma anche a quella dei luoghi che lo contengono, al fine di ricreare la più perfetta contestualizzazione della fruizione remota. E compiendo così quell'opera di democratizzazione di un'arte intesa come Bene Comune disponibile dovunque e per chiunque, auspicata e intuita a inizio secolo prima da Paul Valéry e poi da Walter Benjamin nel suo celeberrimo "L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica". Un'innovazione che da anni procede a macchia di leopardo ma, complice l'emergenza in atto, potrebbe trovare in questo periodo di profonde trasformazione legate alla pandemia una sua strutturazione più rigorosa. I musei, già protagonisti come luogo di conoscenza attiva, stanno trasformando il loro ruolo anche virtualmente: tramite il racconto dell'opera, la lezione o la visita guidata col direttore o ancora coinvolgendo l'utente a casa, in maniera però ancora troppo frammentata.

In questo ambito, la fruizione virtuale proposta per lo Studiolo del Duca, integra l'esplorazione di una ricostruzione digitale con le possibilità d'interazione offerte dagli strumenti della VR, definendosi anche come elemento di partenza per un'adeguata strutturazione di ulteriori contenuti continuamente aggiornabili. Si prevede quindi di trasformarla anche in un'applicazione desktop ed una mobile per *smartphone*, ai contenuti testuali e audio, già fruibili, saranno implementati contenuti video e si strutturerà una visita guidata dedicata ai più giovani. La nuova selezione di contenuti verrà fatta con strumenti di *eye-tracking* da utilizzare sia in ambiente reale che in ambiente virtuale, incrementando ulteriormente gli ambiti di utilizzo del presente modello. Obiettivo più generale è quello di sfruttare il processo di digitalizzazione per rendere l'esperienza del CH da remoto sempre più inclusiva grazie a contenuti di alta

qualità, sia da un punto di vista dei modelli virtuali che dei contenuti multimediali necessari per la comprensione del complesso simbolismo del patrimonio artistico e per la sua adeguata fruizione da parte di tutti, in ogni momento.

3.3 La documentazione digitale per la tutela e valorizzazione del patrimonio ipogeo. Le Grotte di Palazzo Campana a Osimo.

L'Italia è un paese ricco di ambienti sotterranei che costituiscono una tra le più importanti espressioni del CH nazionale, spazi però troppo spesso poco conosciuti e inaccessibili. Non si tratta infatti solo di stretti tunnel e passaggi bui, ma anche di gallerie riccamente decorate, che ci tramandano segni e rituali di comunità che in tempi diversi le hanno vissute. Per questo motivo è importante salvaguardare dal degrado il Patrimonio ipogeo (*Underground Heritage*, UH), attraverso studi approfonditi che ne possano offrire una piena riscoperta e conoscenza.

Il caso di studio esaminato in questo lavoro è un tipico esempio di UH: le Grotte di Palazzo Campana a Osimo che fanno parte di un'ampia rete di spazi sotterranei a cui si accede dalle cantine dei palazzi nobiliari cui appartengono.

Il presente paragrafo riporta i risultati dell'indagine integrata di queste gallerie, realizzata ricorrendo a TLS, fotogrammetria e acquisizioni GPS, offrendo un confronto tra i risultati derivanti dall'applicazione delle diverse tecniche a spazi ristretti e bui, dimostrando quanto fondamentale sia l'integrazione dei dati per una documentazione completa, rapida ed efficiente, anche in condizioni problematiche di illuminazione e

spazio. Le attività svolte per questo lavoro hanno previsto poi, oltre alla documentazione digitale, anche la sperimentazione di alcune possibilità di fruizione alternativa all'esperienza diretta dei luoghi, il cui degrado è stato dimostrato essere accelerato dalla presenza di gruppi visitatori che producono un'alterazione del tasso di umidità del sistema ipogeo. Il *workflow* ha dunque previsto tre fasi principali: l'acquisizione dei dati (TLS, GPS e fotogrammetria), l'elaborazione del modello digitale (modellazione e integrazione dei dati) ed infine lo sviluppo delle soluzioni di fruizione: un tour virtuale per web browser, un'applicazione di VR per *HTCVive* e la riproduzione fisica in scala 1:1 di uno dei bassorilievi mediante fresatura CNC.

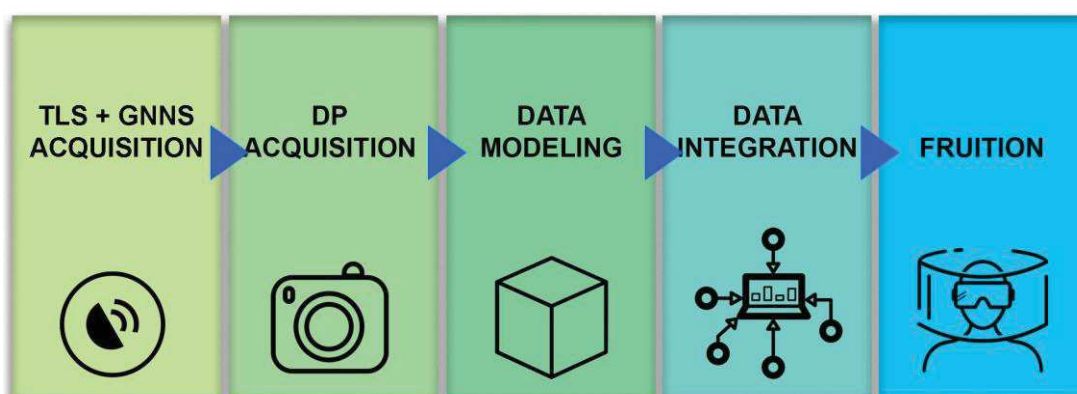


Figure 1: Workflow: alla fase di acquisizione mediante scansioni TLS, prese GPS e fotografiche, ha fatto seguito quella di elaborazione, con la modellazione e l'integrazione dei dati acquisiti, di cui sono state infine realizzate alcune proposte di fruizione.

In particolare, questo lavoro mirava a sottolineare il potenziale di un'indagine integrata per superare le difficoltà nella documentazione del UH. La necessità di un accurato rilievo dello stato attuale delle grotte era emersa chiaramente nella pianificazione di un intervento per contenere il degrado che incombe su questo prezioso luogo, diventando così, grazie alle soluzioni digitali, anche un'occasione per definire modalità meno invasive di fruizione. Si è dunque testato e validato un metodo per una ricostruzione ad alta risoluzione di ambienti ipogei, sia da un punto di vista geometrico

che del fotorealismo, utile come strumento di base per l'elaborazione di output destinati sia ad esperti di conservazione che per una fruizione da parte di non esperti interessati ad approfondire un patrimonio nascosto ma fortemente radicato nella tradizione locale.

L'integrazione di diverse tecniche di indagine è indispensabile per ottenere un prodotto finale valido che sia punto di partenza per la tutela e la valorizzazione del UH come in (Murtiyoso, Grussenmeyer, Guillemin, & Prilaux, 2017)(Mandelli, Fassi, Perfetti, & Polari, 2017). La combinazione di TLS, GPS e fotogrammetria (Liang et al., 2018) si è dimostrata estremamente efficace per l'acquisizione e l'elaborazione di nuvole di punti ad alta definizione, permettendo di ottenere modelli 3D accurati e fotorealistici anche di spazi complessi (Lerma, Navarro, Cabrelles, & Villaverde, 2010b). Per quanto riguarda in particolare l'acquisizione dati in ambienti sotterranei, questa risulta problematica a causa di condizioni ambientali come la mancanza di sorgenti luminose omogenee, superfici altamente assorbenti e instabili, spazi ristretti e geometricamente complessi. Per questi motivi, i dispositivi TLS sono spesso utilizzati in tali ambienti. Grazie alle loro caratteristiche tecniche, sono utili per creare mappe 3D ad alta risoluzione di aree sotterranee come grotte naturali, per indagini geomorfologiche, e per effettuare misurazioni su ambienti ipogei e documentarli come in (De Waele et al., 2018) e (Fabbri, Sauro, Santagata, Rossi, & De Waele, 2017). Come proposto in (Serna, Pillay, & Trémeau, 2015) l'integrazione del modello 3D ottenuto da scansioni laser con immagini acquisite tramite fotocamere esterne rende possibile la combinazione di precisione geometrica e qualità della *texture*, permettendo di raggiungere un alto livello di fotorealismo. (Cardaci, Versaci, & Fauzia, 2016) mostra un esempio di complesso funerario sotterraneo afflitto dagli stessi problemi del presente caso di studio: la difficile accessibilità, la scarsa visibilità, il piccolo riconoscimento del valore storico e architettonico. Ciò richiede una seria riflessione

sulle sfide e sui requisiti necessari per garantire sia la conservazione che la rivitalizzazione di tale patrimonio. Trovare modi per visualizzare e divulgare contenuti digitali tridimensionali è infatti un'ulteriore sfida per la comunità scientifica. L'acquisizione e l'elaborazione dei dati sono fondamentali per documentare l'UH, ma la comunicazione e la diffusione sono altrettanto importanti per diffondere la conoscenza di questi luoghi nascosti e delle loro storie. Le Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione (*Information and Communications Technology*, ICT) si stanno rapidamente sviluppando consentendo la gestione in tempo reale di modelli basati sulla realtà ad alta risoluzione, dando la possibilità di creare una realtà immersiva alternativa che sostituisce il mondo reale (Boas, 2013). L'importanza di utilizzare le ICT per rendere la cultura accessibile a un pubblico più ampio è dimostrata in (P. Clini, Nespeca, & Ruggeri, 2017), esse forniscono infatti soluzioni per esperienze di visita che non danneggiano o alterano i delicati equilibri del sito, permettendone una fruizione da remoto (Belen Jiménez Fernández-Palacios, Morabito, & Remondino, 2017).

Le Grotte di Palazzo Campana a Osimo (Figura 31) sono parte di un complesso di gallerie sotterranee di datazione incerta, esteso sotto gran parte della città e utilizzato come rifugio per la popolazione durante la Seconda Guerra Mondiale. Costituite di arenaria sono composte da due sezioni, un ramo libero e un anello rettangolare. Lungo le pareti e le volte delle gallerie principali, questo anello mostra diversi elementi scolpiti in condizioni precarie principalmente a causa di infiltrazioni d'acqua e dell'interazione umana. A causa della fragilità materiale, i problemi principali di tali superfici sono legati alle variazioni di temperatura e umidità causate dai flussi di visitatori e dall'alto rischio in uno spazio così stretto di urtare inavvertitamente le pareti danneggiandone in maniera irreparabile i bassorilievi.



Figura 31 Osimo, Palazzo Campana. Vista della facciata principale.

Ci sono molte teorie sull'origine e le funzioni di queste gallerie fatte di spazi sotterranei che compongono ombre e simboli, ricchi di bassorilievi e incisioni scolpite nell'arenaria. I tunnel furono certamente utilizzati come rifugi dai cittadini di Osimo durante la Seconda Guerra Mondiale e furono probabilmente utilizzati anche come condotte d'acqua che rifornivano cisterne, pozzi e fontane. Le grotte si sviluppano secondo un percorso ad anello e lungo le due gallerie principali alcuni recessi si affacciano in maniera speculare (Figura 32).

I bassorilievi di Palazzo Campana sono senza dubbio l'elemento più affascinante dell'intero complesso cittadino e, allo stesso tempo, il più fragile. Risalenti al XVII secolo, sono stati oggetto di numerosi studi monografici che ne hanno indagato i significati e le origini. La fonte iconografica delle pareti e delle volte è stata individuata, da studi quali (Copparo & Filippetti, 1997), nell'“Iconologia” di Cesare Ripa

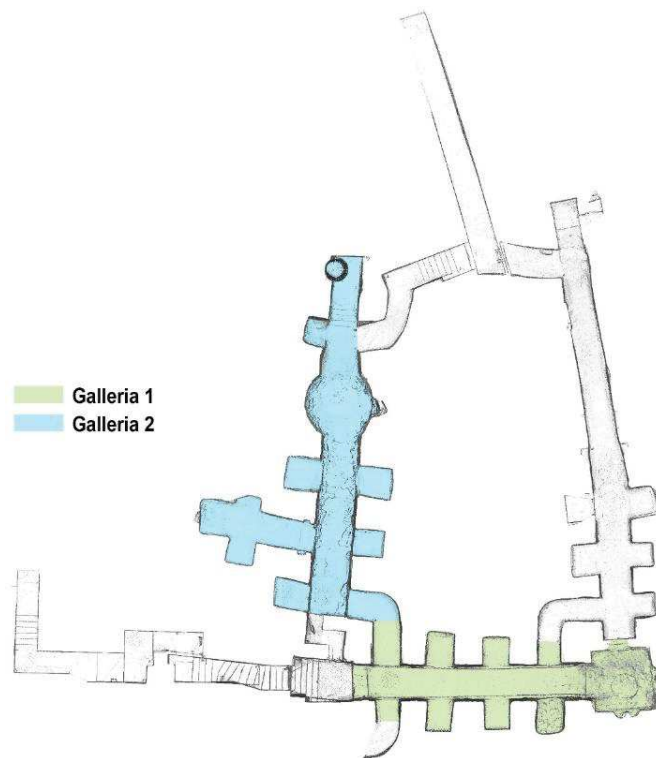


Figura 32 Planimetria delle Grotte di Palazzo Campana a Osimo. Individuazione nello sviluppo ad anello delle due gallerie caratterizzate dalla presenza di bassorilievi.

Le interpretazioni che si possono fare sulle immagini sono difficili, sia per il cattivo stato di conservazione dell'arenaria, sia per la costruzione di alcuni pilastri di sostegno che hanno portato alla completa distruzione di alcune porzioni di apparato decorativo. Lungo il lato destro della prima galleria ci sono bassorilievi che rappresentano i Continenti e che personificano la Penitenza e l'Intelligenza. Sul lato opposto sono descritte alcune virtù: Umiltà, Conversione, Fortezza, Volontà e Bellezza. Alla fine della prima galleria c'è una sala quadrata, parzialmente sotterranea, in cui compaiono due figure inserite in nicchie a forma di conchiglie (Figura 33).

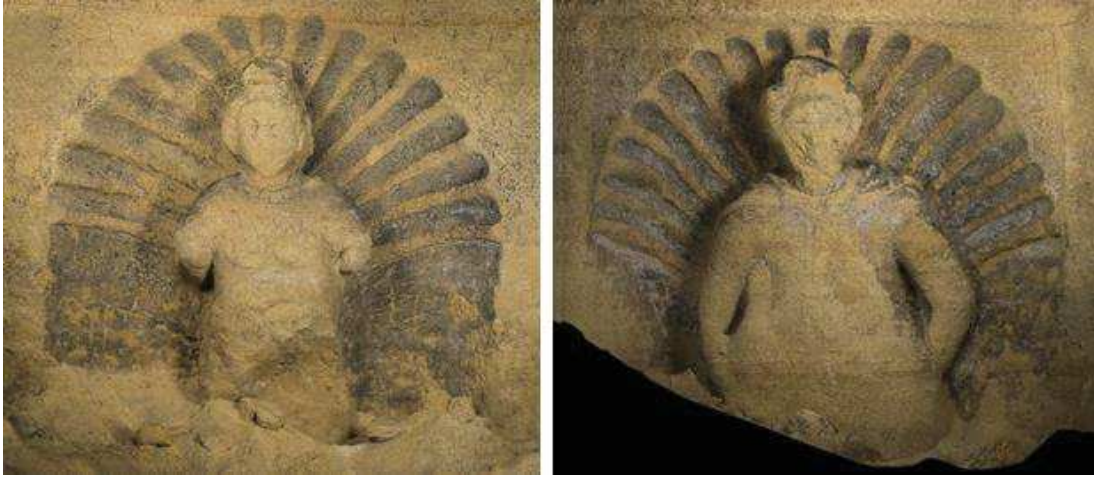


Figura 33 Statue di figure inserite in nicchie a forma di conchiglie scavate nelle pareti della sala quadrata posta alla fine della prima galleria.

La seconda galleria si innesta a sinistra delle scale che provengono dai piani superiori dell'edificio. Oltre ai bassorilievi sulle pareti, questa galleria presenta ricche decorazioni sulla volta che copre l'intero ambiente. Come la prima, anche questa è decorata con personificazioni tratte dall'"Iconologia" di Ripa: Idolatria e Inganno. Sono inoltre raffigurati alcuni miti dell'antichità greca. La seconda galleria termina idealmente il suo percorso narrativo con una sala a pianta centrale coperta da una volta dove sono rappresentati alcuni stemmi delle principali famiglie nobiliari osimane. Gli spazi ipogei di Palazzo Campana si configurano così come un tesoro inestimabile per la città di Osimo, la loro consistenza fisica va tutelata senza però dimenticare di avviarne un processo di valorizzazione che permetta di continuare a garantirne la fruizione.

Come già approfondito nei precedenti capitoli, diverse tecniche di acquisizione rendono possibile la generazione di modelli tridimensionali estremamente accurati. In questo caso di studio, l'integrazione di scansioni laser e fotogrammetria è stata mirata all'ottenimento di un modello fotorealistico e ad alta risoluzione geometrica per un

ambiente, come detto, estremamente stretto e completamente privo di luce. Il flusso di lavoro si è basato quindi sull'acquisizione dei dati, la modellazione 3D, effettuata in considerazione dei successivi output previsti per la fruizione, e infine la realizzazione di questi, due soluzioni virtuali ed una riproduzione fisica.

Per rilevare la complessa geometria delle grotte sono state eseguite scansioni laser scanner, il ricorso alla fotogrammetria ha permesso invece la successiva elaborazione di *texture* per associare il dato colorimetrico a quello geometrico.

Per la scansione delle gallerie è stato impiegato uno scanner laser Leica Scanstation P40 con una precisione di misurazione della posizione 3D di 3mm a 50m. Considerando la configurazione dell'area da acquisire, la risoluzione di scansione è stata impostata a 3,1mm a 10m. Nella consapevolezza della difficoltà di riconoscere i punti di riferimento naturali per allineare i dati, è stato fatto un ampio uso di obiettivi b/w (Figura 34). Tutti i 39 target utilizzati sono stati posizionati a terra a causa della fragilità delle pareti in arenaria e sono stati scansionati con un errore massimo di 2mm. A causa delle condizioni di illuminazione, la fotocamera interna dello scanner laser non è stata in grado di acquisire immagini sferiche dell'area scansionata per ottenerne informazioni RGB. Pertanto, le immagini panoramiche per mappare le nuvole di punti derivanti da ciascuna scansione sono state assemblate da 12 singoli scatti eseguiti impostando la lunghezza focale della fotocamera a 15mm e collimando il centro nodale a quello di scansione. Le immagini sono state acquisite utilizzando due diverse condizioni di illuminazione, ciascuna studiata per uno scopo specifico. La prima mirata ad ottenere un'immagine a basso contrasto di luci e ombre, l'altra finalizzata a creare un'immagine suggestiva per la fruizione tramite tour virtuale.

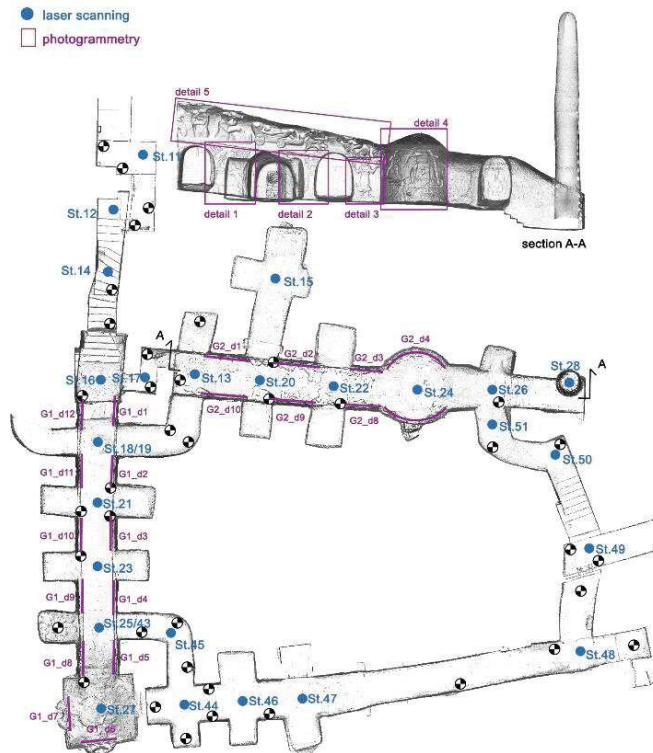


Figura 34 Planimetria delle gallerie rilevate e sezione della galleria n.2, con indicazione delle stazioni di presa laser, dei target b/n e delle acquisizioni fotogrammetriche.

Per le acquisizioni fotogrammetriche delle pareti in arenaria è stata invece utilizzata una fotocamera Sony Alpha9, impostando la lunghezza focale dell'obiettivo a 24mm e disponendo di una risoluzione dell'immagine pari 6000 x 4000px. A causa della loro forma, caratterizzata dall'alternarsi di parti convesse e concave, le acquisizioni fotografiche dei bassorilievi hanno richiesto un impegno notevole in termini di tempi ed una media di 60 foto ciascuno. Per superare le condizioni di scarsa luminosità, si è fatto ricorso al supporto di un kit di luci flash costituito da: due lampade Broncolor Siros 800 L su un treppiede, una dotata di un *softbox* e l'altra di ombrello riflettente argentato. Diversi tentativi sono stati effettuati per ottimizzare il posizionamento e

l'intensità delle luci e raggiungere il massimo livello di dettaglio senza creare ombre nette sugli elementi scolpiti.

Vista l'instabilità delle condizioni superficiali delle pareti, è stata verificata la compatibilità degli strumenti ottici (laser scanner e lampade flash) con il materiale di cui sono costituite le grotte, verificando che la lunghezza d'onda e la potenza dei segnali emessi, nonché i tempi di esposizione, fossero lontani dal valore dell'ablazione dell'arenaria.

Infine, per georeferenziare i dati acquisiti, 2 punti di controllo geodetici sono stati rilevati nell'area di scansione all'aperto tramite ricevitore GNSS-RTK (Figura 35).



Figura 35 Acquisizione dei punti di controllo per georeferire i dati derivanti dalle scansioni laser.

Tutti i dati derivanti dalle acquisizioni sono stati quindi pre-elaborati in modo indipendente. Le nuvole di punti da TLS sono state allineate utilizzando il software *Leica Cyclone* (Figura 36). I punti di controllo acquisiti tramite GNSS-RTK sono stati importati nel software *Geotop Meridiana* per la loro elaborazione automatica. Le foto di ogni singolo bassorilievo sono state post-prodotte utilizzando *Adobe Camera Raw* e poi importate in *Agisoft Photoscan* per essere allineate (Figura 37).



Figura 36 Viste della nuvola di punti ottenuta dall'allineamento in Cyclone delle diverse scansioni effettuate.

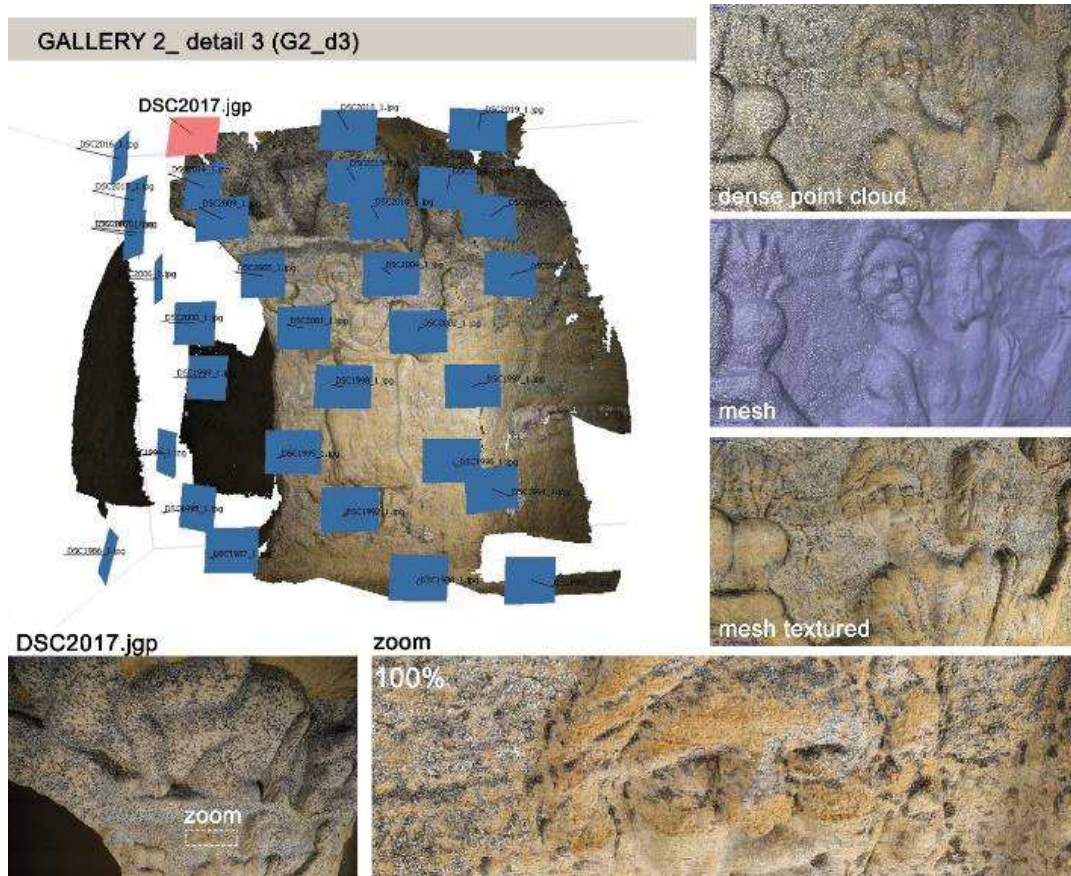


Figura 37 Rilievo fotogrammetrico del bassorilievo n.3 della galleria 2.

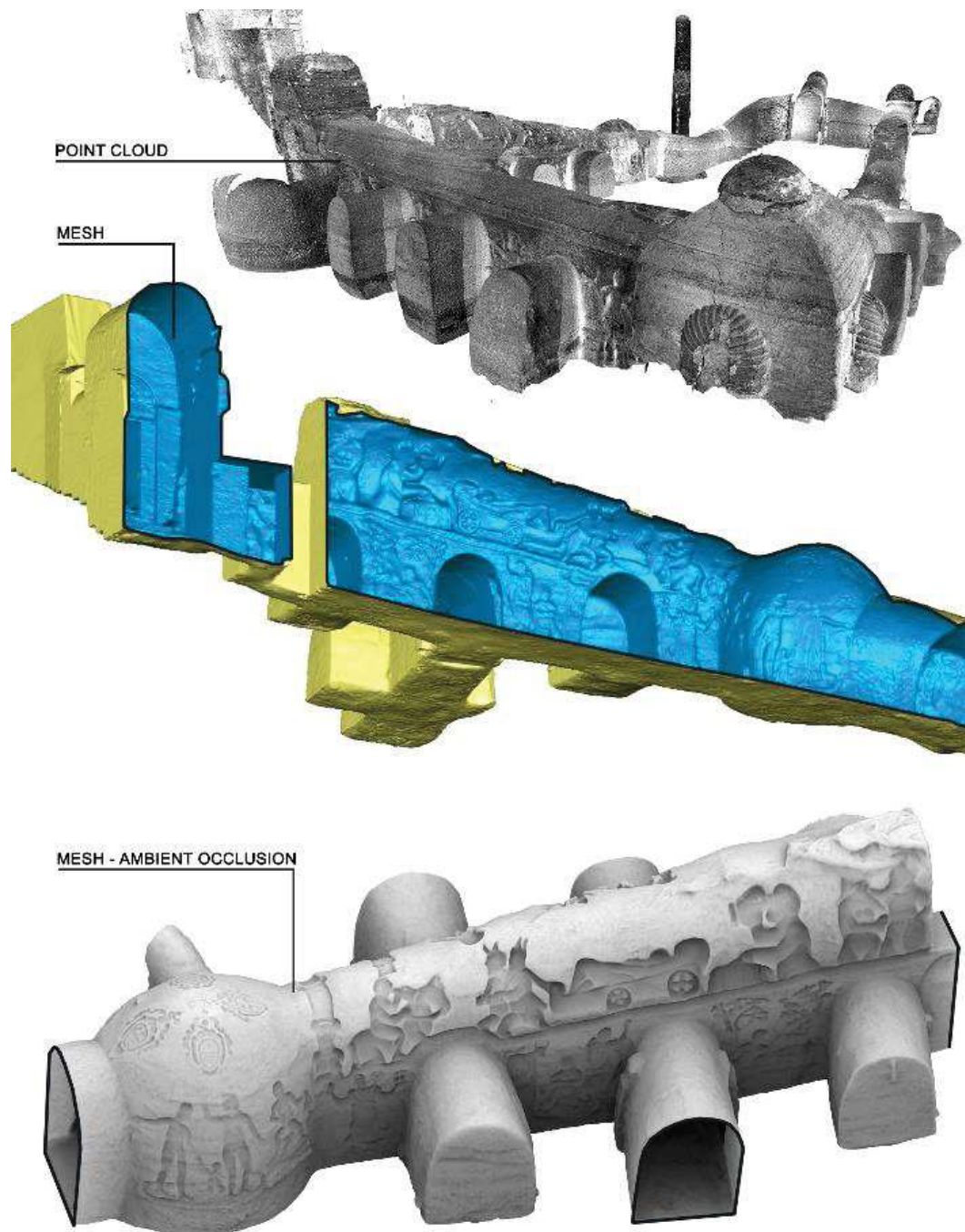


Figura 38 Dall'alto verso il basso. La nuvola di punti elaborata a partire dai dati delle scansioni laser. Una sezione longitudinale del modello mesh della galleria numero 2 e infine l'intero modello mesh della galleria numero 2.

Il primo passo per l'integrazione dei differenti dati è stato quello di impostare per tutti il medesimo sistema di riferimento. Con le coordinate locali ottenute posizionando manualmente le GCP nella nuvola di punti TLS e le corrispondenti coordinate geodetiche catturate da GNSS-RTK, la nuvola di punti TLS è stata georeferenziata. Poi, un minimo di cinque punti di controllo è stato rilevato manualmente su ogni set di foto relativo a ciascun bassorilievo e sono state loro assegnate le coordinate corrispondenti estrapolate dalla nuvola di punti derivante dalle scansioni. Vista l'impossibilità di posizionare dei target su una superficie così fragile, sono stati utilizzati dei punti visivamente riconoscibili. Utilizzando il software *3DReshaper*, la nuvola di punti da laser scanner è stata filtrata eliminando punti rumorosi e utilizzata per la generazione di un modello poligonale (Figura 38). Sempre utilizzando la nuvola di punti, importandola nel software *Autodesk AutoCAD*¹⁰, è stato possibile produrre automaticamente rappresentazioni bidimensionali tramite piani di taglio orizzontali e verticali, elaborando così piante e sezioni degli ambienti rilevati (Figura 39Figura 40Figura 41).

¹⁰ <https://www.autodesk.it/products/autocad/overview>

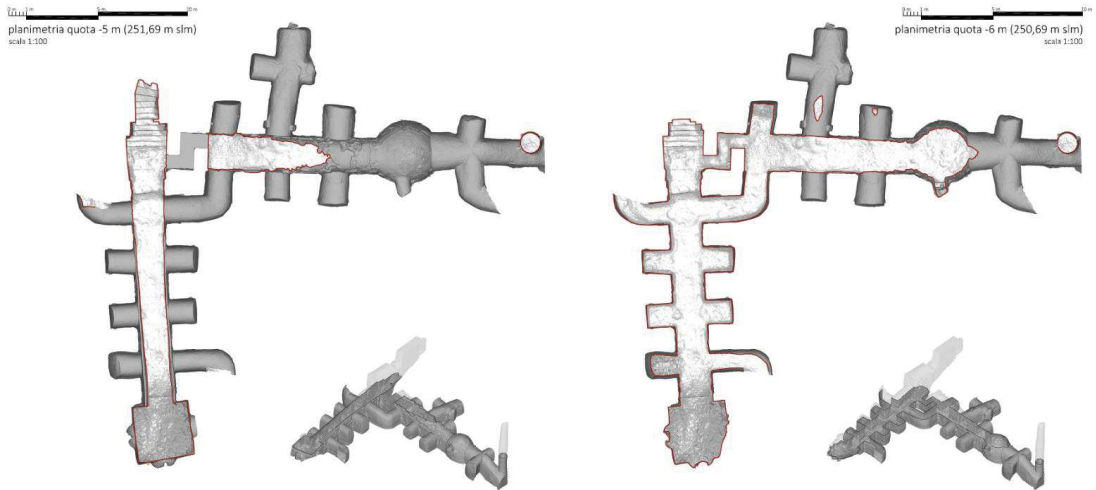


Figura 39 Sezioni orizzontali a differenti quote delle due gallerie decorate con bassorilievi.

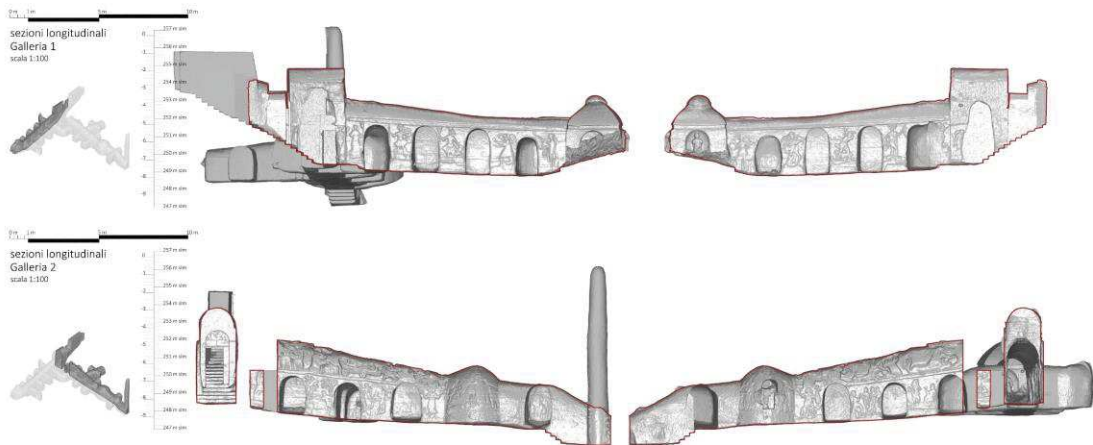


Figura 40 Sezioni verticali delle due gallerie decorate con bassorilievi.

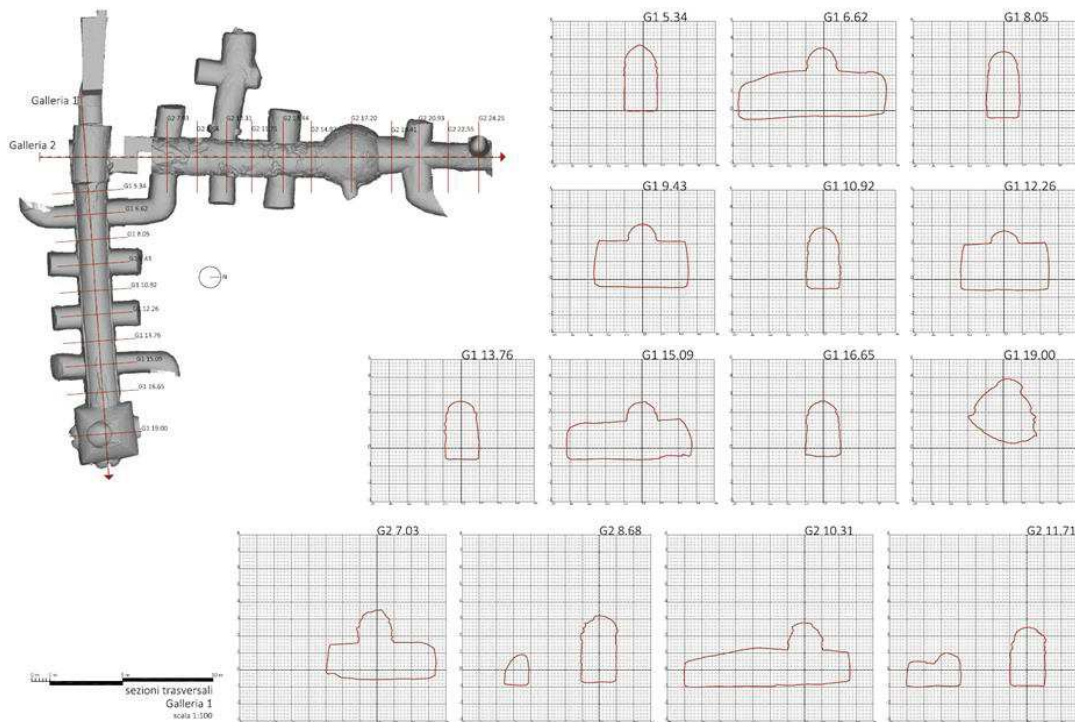


Figura 41 Sezioni trasversali delle due gallerie decorate con bassorilievi.

L'utilizzo dei diversi output derivanti dal processo di documentazione digitale condotto ha permesso lo sviluppo di soluzioni per una fruizione delle grotte rivolta anche ad un pubblico di non esperti, un modo per tutelare questo UH permettendone forme di visita e valorizzazione alternative. Un approccio che, avvalendosi delle diverse potenzialità offerte dal digitale, si è declinato sia in forma fisica che virtuale, inserendosi nell'ambito di recenti esperienze sviluppate per importanti luoghi della cultura caratterizzati da medesime problematiche di conservazione. In (Wong & Santana Quintero, 2019) è ad esempio proposta quella della tomba di Tutankhamen, sito documentato mediante scansioni laser e fotogrammetria e quindi fisicamente riprodotto. I siti di arte rupestre di Lascaux e Chauvet in Francia e di Altamira in Spagna sono altri casi ben noti in cui le repliche sostituiscono l'originale nella

fruizione al pubblico al fine di preservarne i delicati equilibri. Una lista di esempi in costante crescita grazie ai progressi tecnologici della documentazione digitale, della DF e della VR. Mantenere accessibili siti chiusi tramite l'uso di questi *facsimili*, siano essi fisici o virtuali, ha dimostrato enormi potenzialità nell'aumentare la consapevolezza ed il legame con tali luoghi, nonché per finalità educative e di ricerca. La prima soluzione di fruizione proposta per le Grotte di Osimo è stata dunque quella di una riproduzione fisica in scala 1:1, eseguita per una delle superfici decorate da bassorilievi. Tra le possibili soluzioni di DF, già approfondite nel §2.2.4, si è scelto il taglio CNC 2.5D, ricorrendo ad una fresatrice a controllo numerico in grado di mantenere precisioni millimetriche nella lavorazione del polistirolo espanso. A partire dal modello *mesh* ottenuto dall'elaborazione dei dati del derivanti dal processo di documentazione digitale se ne è quindi ottenuta la riproduzione fisica mostrata in (Figura 42). Infine, per garantirne una resa visiva coerente con l'originale, la superficie fresata è stata trattata con una vernice additivata con polvere di arenaria, della medesima gradazione di colore di quella di cui le grotte sono costituite.



Figura 42 Da sinistra, ortofotografia del bassorilievo raffigurante il "Giudizio di Paride", modello mesh ottimizzato per la fresatura, riproduzione fisica finale a seguito del trattamento superficiale.

La ricerca di una soluzione virtuale, per una fruizione in grado di offrire una percezione dell'intero sviluppo sotterraneo delle Grotte di Palazzo Campana, ha invece prodotto due esiti: un tour virtuale riproducibile mediante web browser ed un'esperienza di VR

fruibile mediante HMD. Due prodotti in grado di consentire al visitatore di esplorare le gallerie sotterranee, osservando da vicino i bassorilievi senza necessitare di un'interazione diretta, potenzialmente pericolosa per un ambiente tanto fragile.

La prima soluzione ha permesso di ricostruire l'ambiente delle grotte in maniera speditiva, tramite immagini panoramiche a 360°. Ricorrendo al software per l'elaborazione di tour virtuali *Pano2VR*¹¹ è stato inoltre possibile inserire all'interno delle diverse scene dei bottoni per richiamare immagini ad alta definizione dei diversi bassorilievi, corredate di testi che svelano il significato delle diverse raffigurazioni. Tale tour virtuale è stato quindi reso disponibile in rete, accessibile mediante un qualsiasi web browser sia per dispositivi fissi che *mobile* (Figura 43).

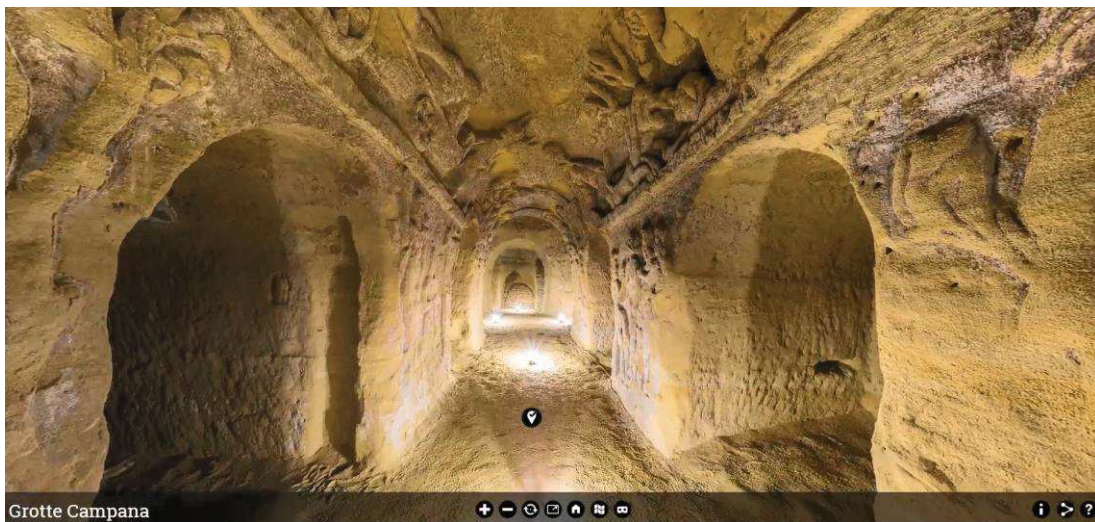


Figura 43 Tour Virtuale delle Grotte Campana. Grazie a diversi hotspot è possibile passare da un'immagine panoramica alla successiva, simulando lo spostamento lungo le gallerie.

Sfruttando le potenzialità del *game engine Unity 3D*, è stata invece sviluppata la seconda soluzione di fruizione virtuale ricorrendo al modello tridimensionale precedentemente elaborato integrando i dati da scansioni laser e fotogrammetria.

¹¹ <https://ggnome.com/pano2vr/>

Semplificata la sua geometria riducendo il numero dei poligoni con “priorità curvatura” per preservarne i dettagli, le coordinate UV sono state generate per ogni vertice nella *mesh* con l'operazione di *unwrap*. L'ultimo passo è stata la proiezione delle caratteristiche geometriche e visive del modello *high-poly* su quello *low-poly*, operazione essenziale per non ridurre la qualità della resa visiva finale, e dunque quella finale dell'esperienza utente. La fruizione di tale modello ottimizzato è stata resa possibile mediante un sistema *HTC Vive* composto da un visore, due controller e due telecamere per il tracciamento dei movimenti. Le possibilità offerte da questa tecnologia sono state sfruttate per arricchire l'esperienza dell'utente strutturando lo spazio virtuale come percorso espositivo delle diverse figure scolpite nella pietra, seguendo la narrazione già pensata da chi le realizzò in un preciso ordine sequenziale. Tramite i controller del *device*, è stato inoltre reso possibile richiamare una mappa delle gallerie che mostra al visitatore la sua posizione o visualizzare informazioni sui diversi bassorilievi attivando degli *hotspot* disseminati nella scena (Figura 44).

La differenza principale nell'uso di un modello 3D in luogo di un'immagine panoramica risiede nel punto di vista della scena offerto all'utente. Nel primo caso esso può cambiare seguendone i movimenti in totale libertà, nell'altro rimane invece fisso sul punto di vista determinato dalla posizione della fotocamera in fase di acquisizione dell'immagine panoramica. Utilizzando una ricostruzione tridimensionale dello spazio invece di un'immagine sferica, il sistema *HTC Vive* è quindi in grado di permettere all'utente di muoversi all'interno dello spazio virtuale come in quello reale, consentendogli di avvicinarsi ad una parete o a qualsiasi altro punto di suo interesse, tracciandone gli spostamenti grazie a due telecamere. Per superare i limiti di spazio determinati dal loro campo visivo, che consente spostamenti in un'area di circa 5x5 metri, è possibile utilizzare i controller come puntatori laser. Qualsiasi punto visibile può essere così raggiunto richiamando con il controller la

funzione teletrasporto, utilizzando il puntatore che automaticamente compare. Il sistema di coordinate dello spazio virtuale viene quindi ricalcolato intorno a questo punto, così come i nuovi limiti di spazio sempre dettati dall'area inquadrata dalle telecamere.

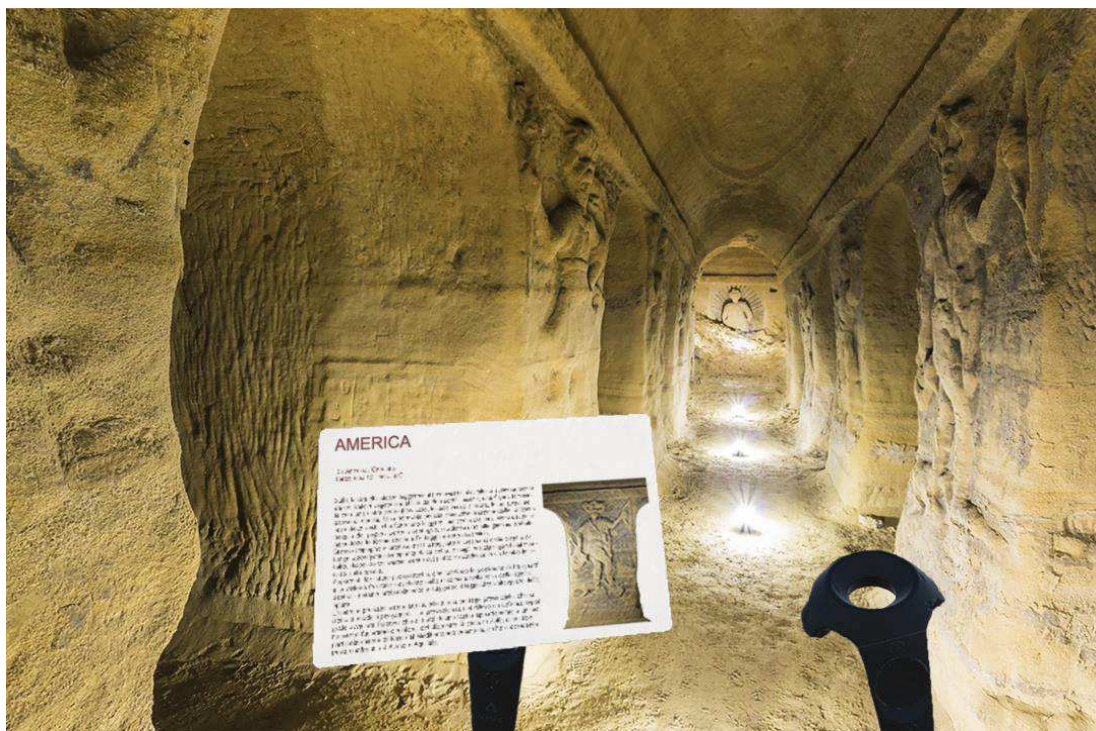


Figura 44 Visualizzazione di una delle gallerie, utilizzando un sistema HTC Vive per la realtà virtuale immersiva.

Il successo di tale esperienza sottolinea l'importanza di un'indagine integrata per superare le difficoltà nella documentazione dell'UH, solitamente caratterizzato da spazi inaccessibili. Grazie all'utilizzo di diversi metodi e strumenti, il caso di studio è stato infatti accuratamente e completamente documentato e visualizzato.

I valori di riflettanza ottenuti dalle acquisizioni laser scanner, comparati alle immagini delle acquisizioni fotografiche ad alta risoluzione, possono fornire informazioni dettagliate sullo stato conservativo dell'arenaria. Questi risultati ottenuti

dall'integrazione dei due metodi dimostrano che entrambi sono validi per un'analisi dettagliata di questo tipo di materiale e che offrono una buona riuscita non solo per gli aspetti geometrici, ma anche per quelli visivi, grazie ad un accurato progetto delle condizioni di illuminazione in fase di presa. Infatti, oltre agli output per gli esperti di conservazione, questo lavoro ha portato alla creazione di prodotti multimediali per un pubblico più ampio di utenti non professionisti, proponendo modalità innovative per proteggere l'UH dal degrado senza però rinunciare alla sua disseminazione e fruizione. Grazie al caso di studio affrontato, si è quindi mostrato un metodo per ottenere diverse possibili soluzioni per la fruizione, dalla riproduzione fisica ad una visualizzazione virtuale ed interattiva, che permettono ai visitatori di visualizzare ambienti sotterranei a 360° e di camminare attraverso le loro gallerie apprezzandone dettagli ed elementi decorativi, senza che sia necessario entrare direttamente in contatto con i luoghi reali.

3.4 La documentazione digitale di spazi e opere per una visita virtuale dei luoghi della cultura. La Pinacoteca Civica di Ancona.

Il Terremoto dell'Emilia nel 2012, con il crollo della Torre dei Modenesi a Finale Emilia, il Sisma del Centro Italia nel 2016, con migliaia di beni culturali danneggiati, l'attacco dell'ISIS all'area archeologica di Palmira nel 2017, l'incendio della Cattedrale di Notre Dame a Parigi nel 2019, sono solo alcune delle più recenti ferite inferte al CH. Preservare la memoria garantendo una documentazione preventiva, che possa essere punto di partenza per una rinascita dei simboli della nostra identità comune, è un dovere cui la nostra società non può più venire meno, un impegno per le generazioni attuali e future. Come già riportato nell'introduzione di questo volume, con l'indizione dell'Anno Europeo del Patrimonio Culturale, iniziativa risalente al 2018, la Comunità Europea ha voluto sensibilizzare i suoi cittadini proprio all'importanza sociale ed economica del CH, ponendo 6 obiettivi generali per la sua tutela: protezione, salvaguardia, riutilizzo, rafforzamento, valorizzazione e promozione (Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione, 2017); finalità raggiungibili anche grazie all'impiego di strumenti tecnologici.

Partendo da questo stimolo, ricorrendo all'uso delle tecnologie più performanti per la comprensione dei Beni Culturali a diversa scala, si è costituita la base documentale per il successivo sviluppo di un'esperienza virtuale per un museo civico di medie dimensioni, dimostratasi poi efficace anche nella situazione di chiusura forzata legata all'emergenza Covid-19.

La possibilità di un facile accesso a strumenti di digitalizzazione potenti e veloci ha favorito negli ultimi decenni la tendenza a documentare e fruire del CH tramite una visualizzazione virtuale. Rispetto ai tradizionali disegni o plastici, gli output prodotti mediante tale approccio garantiscono infinite possibilità di adattamento a nuove interpretazioni e soluzioni interattive in grado di ampliare la diffusione dei contenuti ad un pubblico potenzialmente illimitato.

Un approccio metodologico digitale alla documentazione e fruizione del CH che non costituisce però una prassi consolidata per gli operatori di questo settore, il cui lavoro, a fronte di una loro adeguata preparazione, ne trarrebbe indiscutibilmente enormi benefici.

Soluzioni di documentazione digitale, come quelle già presentate nel capitolo 2, offrono alla comunità scientifica quanto all'utente non esperto, la base per una possibile fruizione digitale tridimensionale di singoli beni culturali così come di spazi complessi; soluzioni ideali per potenziale e versatilità nell'analisi, visualizzazione e divulgazione del CH e declinabile anche per varie finalità didattiche. Come già approfondito, l'integrazione di tecniche *image-based* e *range-based* permette infatti di generare modelli tridimensionali fotorealistici e dall'elevato dettaglio geometrico, con metodologie applicabili alle diverse scale e ormai diffusamente accettate come soluzione ottimale per la creazione di facsimili digitali di oggetti o ambienti reali.

La fruizione di questi output, che hanno già dimostrato enormi potenzialità per la definizione di un esatto piano di monitoraggio, protezione e manutenzione del CH,

può essere operata attraverso diverse soluzioni, da quelle più comunemente legate ad aspetti divulgativi, come applicazioni di realtà aumentata o virtuale (Bozzelli et al., 2019), a veri e propri archivi e cataloghi 3D, come le librerie digitali all'interno dei musei (P. Clini et al., 2017) o rese disponibili in cloud computing sul web (Quattrini et al., 2018). Un'ulteriore soluzione che permette di fruire di questi modelli virtuali, integrandoli alla narrazione di aspetti intangibili a loro connessi, è quella offerta dai Tour Virtuali. Come in (Mah et al., 2019), grazie a foto a 360°, questi permettono all'utente di visitare i luoghi della cultura in maniera immersiva ed interattiva, offrendo la possibilità di richiamare contenuti multimediali quali testi, audio e video e di sfruttare un'interazione in tempo reale con operatori addetti alla fornitura di servizi museali. L'ampio potenziale di divulgazione e diffusione delle panoramiche a 360° costituisce da anni una consolidata linea di ricerca (Paolo Clini & Quattrini, 2011b) e uno standard per i grandi player (Proctor, 2011) non manca però di riservare interessanti sviluppi, come dimostrato in questa esperienza.

Il caso di studio scelto è la Pinacoteca Civica "F. Podesti" di Ancona, riferimento nella scena culturale del capoluogo marchigiano sin dall'istituzione, avvenuta nel 1884. L'edificio che oggi ospita la sua collezione è lo storico Palazzo Bosdari, edificato nell'attuale conformazione già nel 1400 e ristrutturato a partire dal 1660, con accenti fortemente manieristici.

Il lavoro ha previsto una prima fase di conoscenza degli oggetti, avvenuta tramite il racconto dell'edificio e l'approfondimento di alcune opere esposte offerti dagli storici dell'arte della cooperativa Le Macchine Celibi, che si occupa della gestione del Museo e che ha attivamente partecipato alle attività condotte. Conosciuta la storia, le caratteristiche e le conseguenti problematiche legate a spazi e oggetti, si è passati alla digitalizzazione mediante laser scanner e fotogrammetria delle opere e dei relativi spazi espositivi. L'obiettivo principale è stato quindi la definizione di un set completo

di informazioni geometriche e non solo, utili a definire un perfetto facsimile digitale di ciascuna porzione dell'edificio e di quanto in esso contenuto.

Ai fini della documentazione dell'edificio sono state eseguite 133 stazioni di presa impiegando una *ScanStation Leica P40*, integrate con foto a 360°, elaborate a partire da 8 singoli scatti eseguiti con una fotocamera *Nikon D90* dotata di obiettivo fisheye da 8mm, montata su testa panoramica e posta su treppiede in modo da farne collimare il centro nodale con il sensore del laser. Per ottenere un modello completo della struttura, ricorrendo ad un drone *Parrot Anafi*, si è quindi eseguito il rilievo aerofotogrammetrico delle coperture.

L'attività di digitalizzazione ha infine interessato le opere, venendo in questo caso eseguita applicando la tecnica fotogrammetrica SfM. Per un'adeguata successiva ricostruzione tridimensionale, l'acquisizione ha visto l'impiego di un idoneo sistema di luci, schermate con pellicole polarizzanti al fine di eliminare riflessi superficiali mediante la rotazione di un analogo filtro applicato all'obiettivo della fotocamera, una *Sony α9*.

Questa enorme mole di dati è stata quindi elaborata ricorrendo a diversi software. Per quanto derivante dalle scansioni laser è stato impiegato il software *Leica Cyclone*, le nuvole di punti relative a ciascuna presa sono state allineate ottenendo un unico modello discreto, descrivente tutti gli spazi della Pinacoteca, costituito da oltre 9 miliardi di punti (Figura 45), colorati ricorrendo alle immagini panoramiche a 360° prodotte grazie al software *PTGui*¹², con un errore di allineamento finale dell'ordine del centimetro. L'elaborazione, all'interno del software *Agisoft PhotoScan*, delle acquisizioni da drone (Figura 46) ha permesso quindi di integrare tale nuvola di punti con quella relativa alla copertura dell'edificio (Figura 47).

¹² <https://www.ptgui.com/>

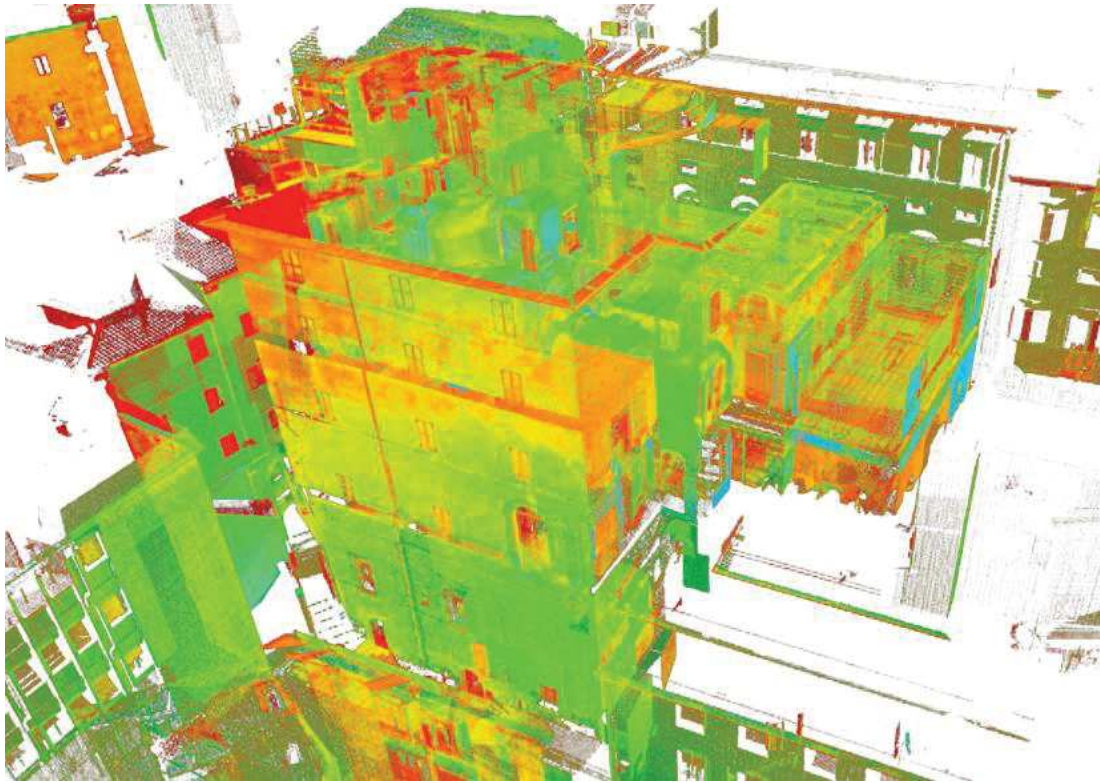


Figura 45 Nuvola di punti ottenuta da 133 scansioni laser terrestri dell'edificio che ospita la Pinacoteca Civica di Ancona.

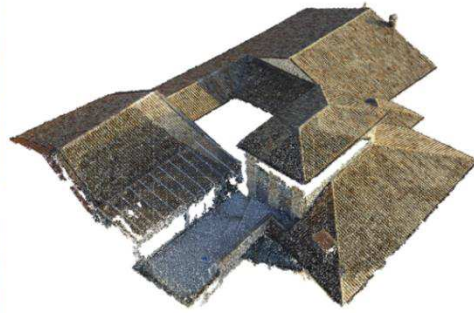
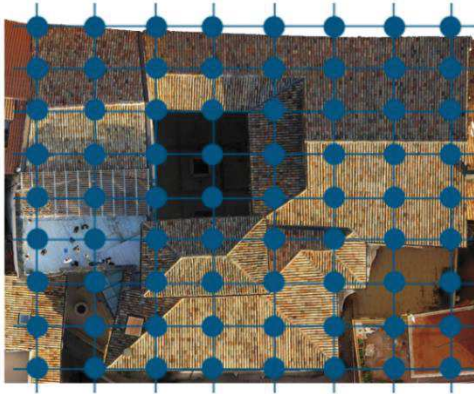


Tabella acquisizione

Dimensioni del sensore		Dimensioni della copertura	
Larghezza	6,17 mm	Larghezza	42 m
Altezza	4,55 mm	Altezza	35 m

Distanza di presa	70 m	Sidelap	70%
Distanza focale	23 mm	Overlap	70%
Image size orizzontale	5344 px	Foto lungo asse x	8
Image size verticale	4016 px	Foto lungo asse y	9
		Totale foto nadirali	72
		Foto oblique	26
		Totale nadirali+oblique	98

Figura 46 Individuazione degli scatti di acquisizione per la copertura dell'edificio, progetto di presa e vista



Figura 47 Risultato dell'integrazione della nuvola di punti derivante dalle scansioni laser con quella delle coperture ottenuta per fotogrammetria aerea mediante drone

L'output derivante da tale integrazione è stato decimato per poter essere agilmente gestito ai fini dell'estrapolazione di piante, prospetti e sezioni dell'edificio (Figura 48). Per le diverse opere, gli scatti fotografici acquisiti in formato raw, sono stati editati grazie al software *Adobe CameraRaw*¹³, e quindi anch'essi elaborati in *Agisoft PhotoScan* ottenendone dei modelli 3D con un errore di allineamento massimo stimato pari ad 1 mm (Figura 49).

L'ultimo passaggio di questo processo di digitalizzazione è stata la ricongiunzione di contenuto e contenitore: ciascuna delle opere è stata portata nel sistema di riferimento spaziale della nuvola di punti dell'edificio associando le coordinate di punti noti dalle scansioni laser ai corrispondenti ottenuti mediante processo fotogrammetrico. Risultato finale è l'esatta riproduzione geometrica dell'edificio, integrata con modelli delle opere di elevato dettaglio e soprattutto caratterizzati da *texture* fotografiche ad alta risoluzione (Figura 50).

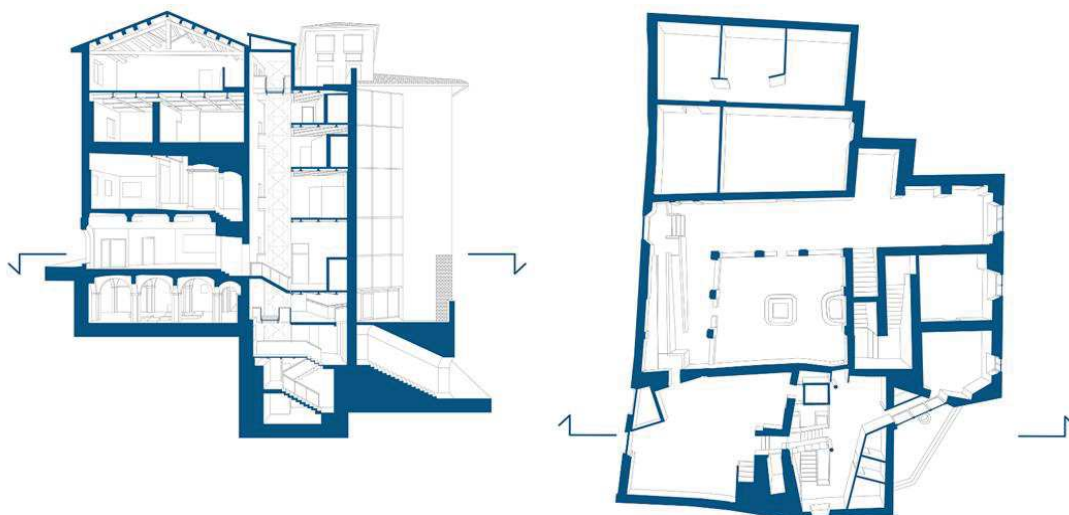


Figura 48 Sezione e pianta prospettica dell'edificio della Pinacoteca

¹³ <https://helpx.adobe.com/it/camera-raw/kb/camera-raw-plug-in-installer.html>



Tabella acquisizione

Dimensioni del sensore		Dimensioni della copertura	
Larghezza	36 mm	Larghezza	2,15 m
Altezza	24 mm	Altezza	3,12 m

Distanza di presa	1,5 m	Sidelap	70%
Distanza focale	50 mm	Overlap	70%
Image size orizzontale	6000 px	Foto lungo asse x	7
Image size verticale	4000 px	Foto lungo asse y	15
		Totale foto	105

Figura 49 Elaborazione fotogrammetrica della Pala Gozzi, prima opera datata del Tiziano

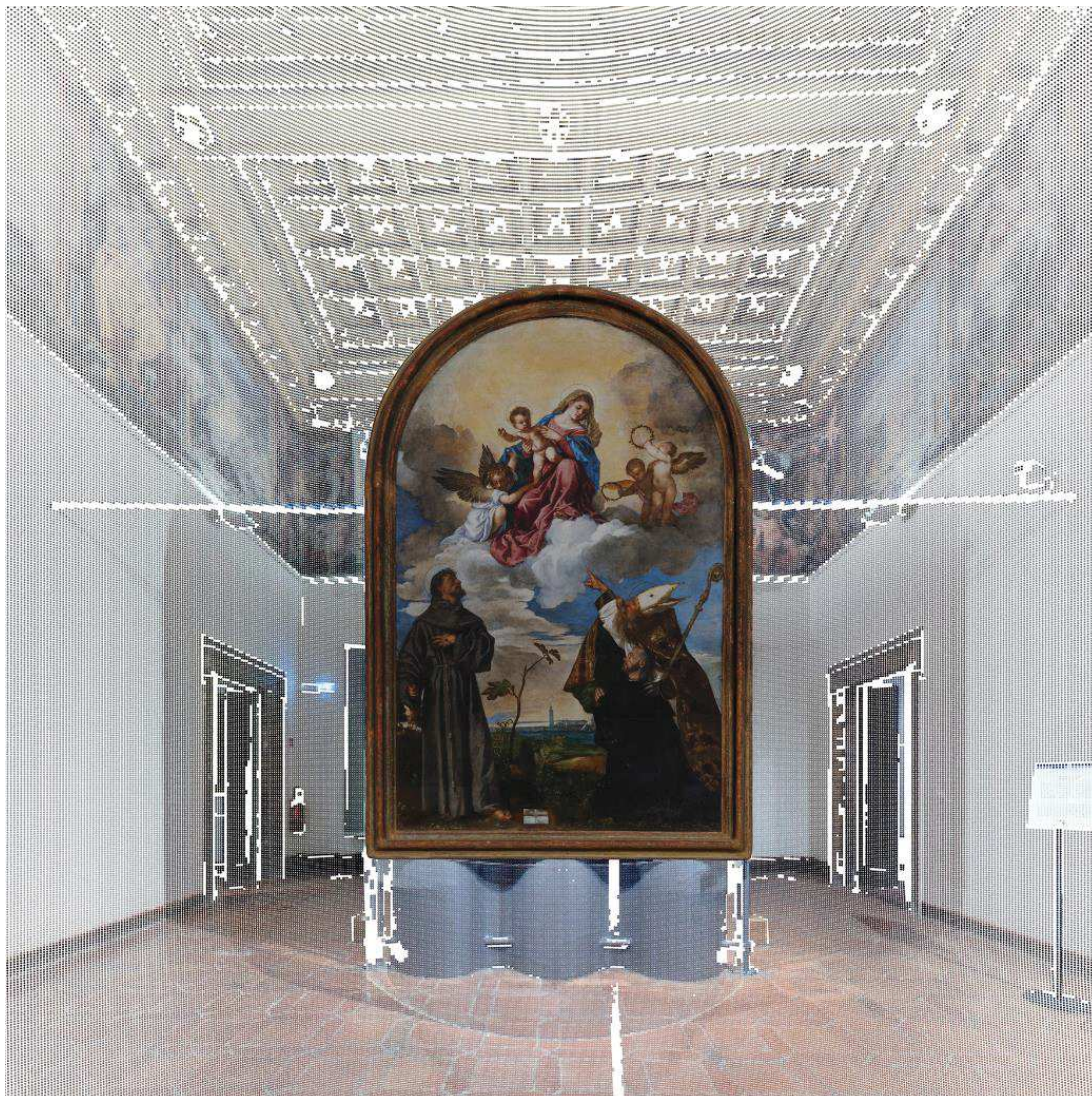


Figura 50 Integrazione della nuvola di punti dell'edificio con i modelli mesh delle opere. Vista della Pala Gozzi esposta nella Sala Zampetti

Gli esiti della descritta esperienza sono stati ulteriormente valorizzati dall'attivazione di una riflessione congiunta con la direzione e gli operatori del Museo.

La riflessione interdisciplinare ha condotto il gruppo di lavoro alla messa a sistema di una progettualità più ampia rivolta alla creazione di un prodotto digitale dalle spiccate

potenzialità interattive ed esperienziali.

Il valore aggiunto di questa soluzione si può ricondurre ad un duplice contributo:

- Il primo riguarda l'attivazione del dialogo museologia-tecnologia. Nel settore museale è infatti molto carente la percezione consapevole delle potenzialità connesse al mondo degli strumenti tecnologici. Questa esperienza ha dunque creato un ponte tra i due settori, con l'avvio di una progettazione a lungo termine che vede l'arricchimento del percorso degli studenti e allo stesso tempo la connessione dell'Università al territorio a sostegno del CH.
- Il secondo ha riguardato la creazione di uno strumento operativo a disposizione del museo. Questo strumento permette di rivolgersi al pubblico virtuale e può essere utilizzato per nuove forme di fruizione e catalogazione digitale del patrimonio.

L'approccio progettuale intrapreso ha quindi mirato alla realizzazione di un prototipo di "museo digitale empatico" (Vitale, 2013) secondo un concetto che mette al centro la persona seguendo un preciso schema:

- indagare l'utenza del museo;
- porre le condizioni per motivare le persone all'interazione con il patrimonio museale;
- attivare ambienti che abilitino la partecipazione attraverso la cura dei diversi linguaggi per ogni target di pubblico individuato.

Queste premesse hanno fatto in modo che il progetto rivolgesse la sua attenzione nei confronti dell'esperienza museale; questa può dirsi ottimale quando c'è focalizzazione e attenzione ai processi in atto, interesse affettivo, appagamento e gioia, e quindi motivazione perché in questo stato l'utente percepisce che ciò che sta facendo è base e ragione della sua azione.

Alla base della fruizione si trova quindi la motivazione che può essere ricondotta a 4

driver fondamentali secondo (Morris, 2004):

- 1) L'aspetto sociale come forma di intrattenimento;
- 2) L'aspetto intellettuale per fini accademici e professionali;
- 3) L'aspetto emozionale legato all'esperienza estetica;
- 4) La dimensione spirituale che insiste sulla creatività e sui processi contemplativi.

Un buon museo, soprattutto virtuale, non deve scoraggiare e deve essere facilmente accessibile, con indicazioni comprensibili e con informazioni utili, studiate per ogni tipologia di pubblico (Branchesi, Curzi, & Mandarano, 2016).

A questo proposito il tour virtuale realizzato ha messo in atto una serie di modelli per sperimentare come raggiungere un'adeguata interazione con il pubblico, con l'intento di riproporre le dinamiche proprie dell'esperienza diretta del Patrimonio Culturale (Figura 51).

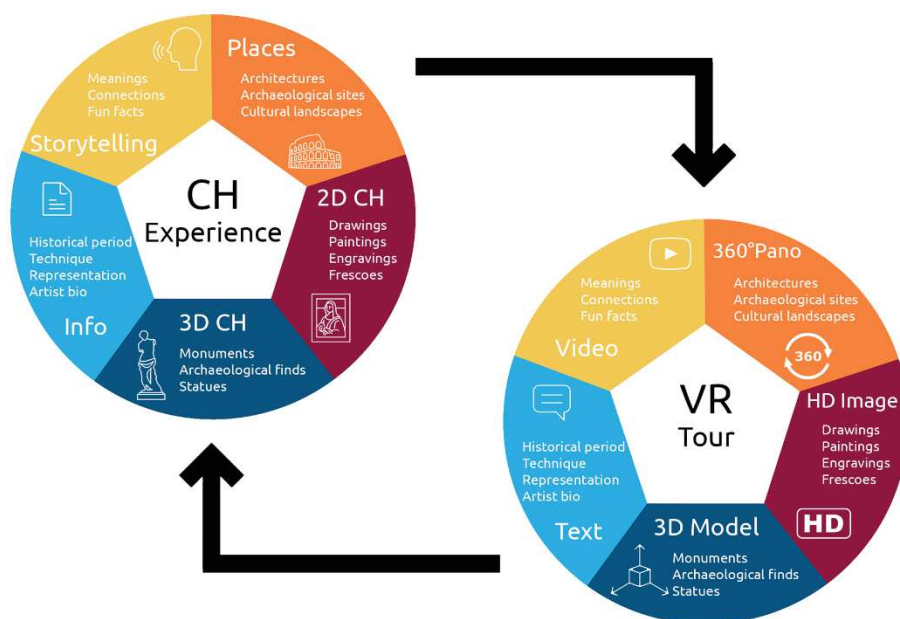


Figura 51 Schema concettuale che relaziona esperienza diretta del Patrimonio Culturale ed esperienza

Il tour virtuale¹⁴, elaborato partendo dalle potenzialità offerte dal software *Pano2VR*, permette all'utente di spostarsi da una sala all'altra grazie ad una mappa della Pinacoteca o selezionando direttamente un'opera di suo interesse. In ogni ambiente è presentato automaticamente un testo introduttivo ai dipinti esposti e cliccando su di essi è possibile richiamarne informazioni, immagini ad alta risoluzione e modelli 3D¹⁵ (Figura 52).

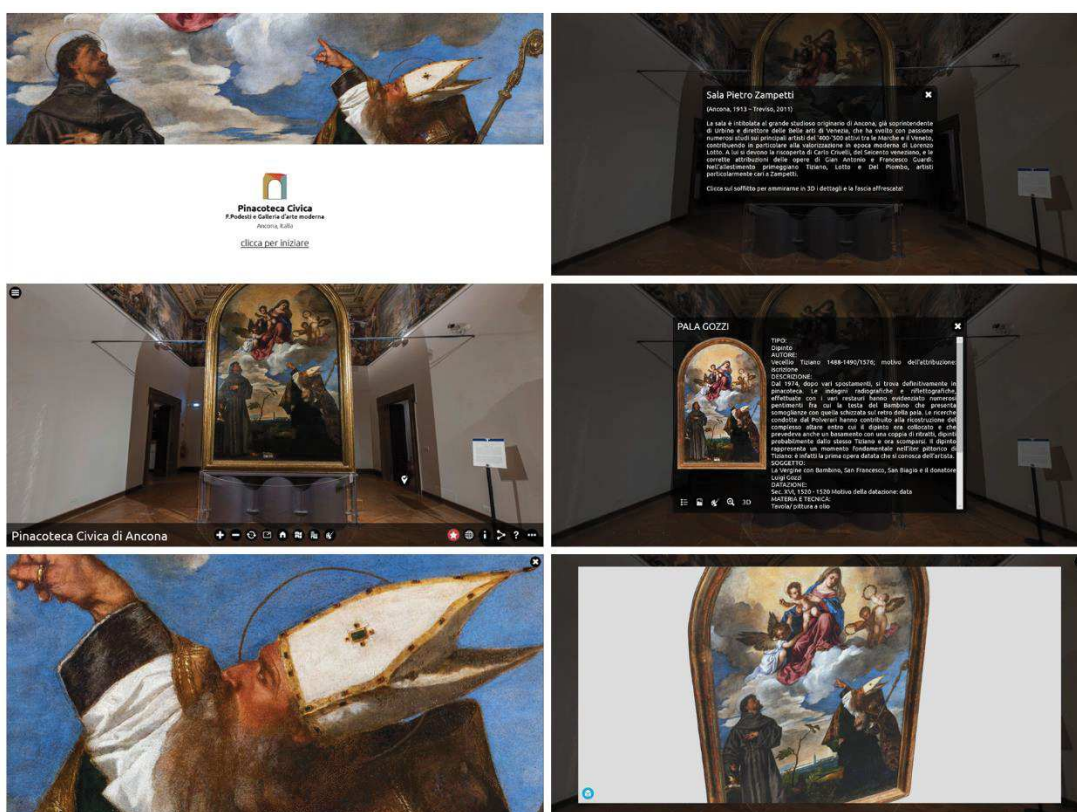


Figura 52 Il tour virtuale fornisce informazioni sulle diverse sale e approfondimenti sulle singole opere

¹⁴ https://distori.org/VIRTUAL_TOUR/pinacoteca-civica-podesti/tour.html

¹⁵ <https://sketchfab.com/distori/collections/pinacoteca-civica-di-ancona>

Inoltre, indossando un visore per la realtà virtuale, è possibile avviarne un'esperienza completamente immersiva per una riproduzione tridimensionale di spazi e opere in scala 1:1 (Figura 53).



Figura 53 Utilizzo di visore per la realtà virtuale per un'esperienza immersiva delle sale e che permette di richiamare i modelli 3D delle opere in scala 1:1.

La progettualità avviata si costituisce come un laboratorio di sperimentazione permanente che permetterà di lavorare sul tour virtuale con l'obiettivo di potenziare e aggiungere strumenti rivolti alla cura della relazione con le persone.

Di seguito alcuni esempi di implementazione, strutturati in riferimento a temi specifici, che potranno essere messi a sistema:

- **Accessibilità:** si prevede lo studio e la realizzazione di appositi strumenti di mediazione come testi ad alta leggibilità, audio descrittivi e narrativi pensati per diverse tipologie di utenza.
- **Intrattenimento:** sarà definito un palinsesto connesso all'uso dello spazio virtuale caratterizzato da visite guidate e mostre, con esposizioni di opere che difficilmente sarebbero stati esposti nella dimensione reale.

- Fruizione: si integreranno proposte rivolte all'esplorazione di singole opere con aggiunta di schede tematiche. Ad esempio, gli aspetti legati al restauro offrirebbero la possibilità di indagare la realtà materica dei dipinti.

La grande sfida di questo approccio è la dimostrazione di come la tecnologia può entrare nel mondo della fruizione dei beni culturali realizzando supporti che, a partire da una corretta digitalizzazione del CH quale nuova forma di tutela e conservazione, implementino la funzione educativa mettendo in atto nuovi sistemi di interazione e possibili servizi rivolti al nuovo pubblico virtuale.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi, tramite processi digitali di documentazione e fruizione, ha permesso di realizzare soluzioni in grado di offrire nuove modalità per la tutela e la disseminazione del CH. Con l'obiettivo di offrire un accesso efficace ai contenuti culturali veicolati, sono state sviluppate esperienze di fruizione digitale per i diversi casi di studio affrontati: l'applicazione di AR *LeonARdo*, per l'approfondimento dei disegni del *Codice Atlantico* tramite un'esperienza "aumentata" delle rappresentazioni originali; l'applicazione di VR sullo Studiolo del Duca di Urbino, per una visita immersiva supportata da contenuti multimediali, utili a svelare il significato delle tante allegorie rappresentate sulle sue pareti; l'esperienza delle Grotte di Palazzo Campana a Osimo, chiuse al pubblico per preservarne il delicato equilibrio di conservazione, ma rese comunque fruibili grazie a soluzioni di riproduzione fisica e virtuale; ed infine il tour virtuale della Pinacoteca Civica di Ancona che, trasponendone i luoghi e la

collezione in rete, ne ha garantito una fruizione alternativa anche nei periodi di chiusura forzata dettati dalla pandemia. Questi casi di studio hanno così permesso di dimostrare l'efficacia dell'applicazione di tecnologie digitali alla documentazione e fruizione del CH e quindi l'importanza dell'avvio di una diffusa trasformazione digitale in questo settore. Le azioni condotte hanno poi permesso di evidenziare chiaramente i punti di forza ed i limiti dei diversi processi digitali proposti. Per quanto concerne i primi, si è dimostrato come la digitalizzazione permetta di attivare soluzioni di salvaguardia e valorizzazione del CH, offrendone una fruizione svincolata dalla presenza dell'originale. Le possibilità di narrazione ed interazione, garantite dai mezzi digitali, consentono poi di sfruttare paradigmi affermati nel settore della formazione e non solo, come la *gamification* ed il *learning by interacting*, utili a migliorare l'esperienza utente e a calibrarla sulle diverse tipologie di visitatore. D'altra parte non mancano però i limiti. Diverse soluzioni proposte prevedono ad esempio l'utilizzo di un *device* per ciascun utente, esperienze individuali che possono essere problematiche per musei e mostre con grandi flussi di visitatori. L'uso delle ICT comporta poi dei costi, non solo legati all'acquisto e alla realizzazione delle soluzioni tecnologiche, ma anche alla loro gestione. Per rendere sostenibile l'intero processo di digitalizzazione è dunque fondamentale avviare percorsi finalizzati allo sviluppo di competenze interne ai musei, con momenti di formazione ed auto-formazione assistita, nonché soluzioni *e-learning* che garantiscano un'adeguata diffusione delle conoscenze necessarie per le diverse realtà culturali. Se tali problematiche saranno risolte, le stesse copie digitali potranno finalmente realizzarsi in maniera compiuta come nuovo CH, aprendo a nuove interpretazioni di quella tensione descritta da Salvatore Settis: *“Fra originali e copie c'è una strana tensione. La copia rende omaggio all'originale e con ciò ne riconosce la superiorità ma insieme pretende di sostituirla e dunque ne contesta l'unicità.”*

Bibliografia

- Antinucci, F. (2014). *Comunicare nel museo*. Editori Laterza. Retrieved from <https://books.google.it/books?id=2V6ODAAAQBAJ>
- Antlejš, K., Celec, K., Sinani, M., Mirtič, E., Ljubič IB-PROCADD doo Janja Slabe, D., Lemajič, G., & Kos, M. (2012). Restoration of a Stemmed Fruit Bowl Using 3D Technologies. *Review of the National Center for Digitization. SEEDI Communications 14. Proceedings of the Sixth SEEDI Conference. Digitization of Cultural and Scientific Heritage*.
- Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Iaccarino Idelson, A., & Scopigno, R. (2013). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.06.008>
- Attenni, M., Bartolomei, C., Hess, M., & Ippolito, A. (2017). Survey and modeling:

- From the process to a methodology. *SCIRES-IT*. Retrieved from <https://doi.org/10.2423/i22394303v7n1p57>
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/38.963459>
- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. Retrieved from <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
- Balzani, M., Callieri, M., Fabbri, M., Fasano, A., Montani, C., Pingi, P., ... Varone, A. (2004). Digital representation and multimodal presentation of archeological graffiti at Pompei. In *VAST 2004: the 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage: incorporating 2nd Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage: Conscience-auditorium, Brussels and Ename Center, Oudenaarde, Belgium*,.
- Bekele, M. K. (2019). Walkable Mixed Reality Map as interaction interface for Virtual Heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00127>
- Bekele, M. K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., & Gain, J. (2018). A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/3145534>
- Benjamin, W. (2013). *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica* (Einaudi).
- Benko, H., Ishak, E. W., & Feiner, S. (2004). Collaborative mixed reality visualization of an archaeological excavation. In *ISMAR 2004: Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2004.23>

- Boas, Y. (2013). Overview of Virtual Reality Technologies. *Mms.Ecs.Soton.Ac.Uk*. Retrieved from http://mms.ecs.soton.ac.uk/2013/papers/yavb1g12_25879847_finalpaper.pdf
- Bolognesi, C. M., & Aiello, D. A. A. (2020). Through Achille Castiglioni's Eyes: Two Immersive Virtual Experiences. In G. Guazzaroni & A. S. Pillai (Eds.), *Virtual and Augmented Reality in Education, Art, and Museums* (pp. 283–310). Hershey, PA, USA: IGI Global. Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1796-3.ch014>
- Bozzelli, G., Raia, A., Ricciardi, S., De Nino, M., Barile, N., Perrella, M., ... Palombini, A. (2019). An integrated VR/AR framework for user-centric interactive experience of cultural heritage: The ArkaeVision project. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00124>
- Branchesi, L., Curzi, V., & Mandarano, N. (2016). *Comunicare il museo oggi. Dalle scelte museologiche al digitale*. Skira editore.
- Bright, S. (2012). Investigating effective support mounts for fans during display by exploring new technologies. *CeROArt*. Retrieved from <https://doi.org/10.4000/ceroart.2546>
- Brusaporci, S., Centofanti, M., & Maiezza, P. (2017). MUS. AQ: A digital museum of L'Aquila for the smart city INCIPICT project. In *New Activities For Cultural Heritage* (pp. 200–208). Springer.
- Calisi, D., Giannone, F., Ventura, C., Salonia, P., Cottefoglie, F., & Ziparo, V. A. (2016). Digitizing indoor and underground cultural heritage sites with robots. *SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology*, 6(1), 23–30. Retrieved 10 November 2020 from <https://doi.org/10.2423/I22394303V6N1P23>
- Cardaci, A., Versaci, A., & Fauzia, L. R. (2016). Between Archaeology and

Landscape. Analysis, Conservation and Valorisation of Early Christian Hypogean Complexes of the South-Eastern Sicily. In *Landscape & Archaeology En-route International Seminar in Flaminia, Fano, Fossombrone, Cagli, Italy, 23-25 June 2016* (Vol. 4, pp. 40–48). I QUADERNI DI CAREGGI.

- Carrozzino, M., Evangelista, C., Brondi, R., Tecchia, F., & Bergamasco, M. (2014). Virtual reconstruction of paintings as a tool for research and learning. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.06.003>
- Casella, G., & Coelho, M. (2013). Augmented heritage - Situating augmented reality mobile apps in cultural heritage communication. In *ACM International Conference Proceeding Series* (pp. 138–140). Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2503859.2503883>
- Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R., & Ruggeri, L. (2016). SFM TECHNIQUE AND FOCUS STACKING FOR DIGITAL DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL ARTIFACTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 229–236. Retrieved 20 April 2017 from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-229-2016>
- Clini, P., Nespeca, R., & Ruggeri, L. (2017). Virtual in real. Interactive solutions for learning and communication in the national archaeological museum of Marche. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* (Vol. 42, pp. 647–654). Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-5-W1-647-2017>
- Clini, P., Ruggeri, L., Angeloni, R., & Sasso, M. (2018). Interactive immersive virtualmuseum: Digital documentation for virtual interaction. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* (Vol. 42). Retrieved from

<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-251-2018>

- Clini, Paolo, & Quattrini, R. (2011a). Le panoramiche sferiche per il rilievo e la comunicazione dell'architettura, un nuovo approccio alla realtà virtuale speditiva. In *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*. Roma: Gangemi editore.
- Clini, Paolo, & Quattrini, R. (2011b). Le panoramiche sferiche per il rilievo e la comunicazione dell'architettura, un nuovo approccio alla realtà virtuale speditiva. In *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*.
- Clini, Paolo, Quattrini, R., Bonvini, P., Nespeca, R., Angeloni, R., Mammoli, R., ... Mengoni, M. (2020). Digit (al) isation in Museums: Civitas Project—AR, VR, Multisensorial and Multiuser Experiences at the Urbino's Ducal Palace. In *Virtual and Augmented Reality in Education, Art, and Museums* (pp. 194–228). IGI Global.
- Clini, Paolo, Quattrini, R., Frontoni, E., Pierdicca, R., & Nespeca, R. (2017). Real/Not Real: Pseudo-Holography and Augmented Reality Applications for Cultural Heritage Paolo. In *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling* (IGI Global, pp. 201–227). Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0680-5.ch009>
- Clini, Paolo, Quattrini, R., Nespeca, R., Angeloni, R., & Mammoli, R. (2020). Digital facsimiles of architectural heritage: new forms of fruition, management and enhancement. The exemplary case of the Ducal Palace at Urbino. In *Graphical Heritage, Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica* (pp. 571–582). Cham: Springer.
- Clini, Paolo, Quattrini, R., Nespeca, R., Carolis, G., & Ruggeri, L. (2015). Disegnare la città insegnando a rilevare. Tecnologie integrate per un rilievo urbano 3D. In

- Disegno & Città* (pp. 523–530). Torino: Gangemi Editore. Retrieved from <https://doi.org/ISBN:978-88-492-3124-3>
- Copparo, F., & Filippetti, F. (1997). *I tarocchi di pietra del Palazzo Campana di Osimo*. (Istituto Campana,Ed.).
- D’Agnano, F., Balletti, C., Guerra, F., & Vernier, P. (2015). Tooteko: A case study of augmented reality for an accessible cultural heritage. Digitization, 3D printing and sensors for an audio-tactile experience. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-207-2015>
- De Luca, L. (2011). *La fotomodellazione architettonica*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- De Waele, J., Fabbri, S., Santagata, T., Chiarini, V., Columbu, A., & Pisani, L. (2018). Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romagna, N. Italy). *Geomorphology*, 319, 47–61. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.012>
- Demetrescu, E., d’Annibale, E., Ferdani, D., & Fanini, B. (2020). Digital replica of cultural landscapes: An experimental reality-based workflow to create realistic, interactive open world experiences. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.018>
- Direzione generale Musei - MIBACT. (2019). *Piano Triennale per la Digitalizzazione e l’Innovazione dei Musei*. Retrieved from <http://musei.beniculturali.it/wp-content/uploads/2019/08/Piano-Triennale-per-la-Digitalizzazione-e-l’Innovazione-dei-Musei.pdf>
- Dragoni, A. F., Quattrini, R., Sernani, P., & Ruggeri, L. (2019). Real Scale Augmented

- Reality. A Novel Paradigm for Archaeological Heritage Fruition. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-030-12240-9_68
- EPOCH. (2009). *The London Charter. Access*. Retrieved from <http://www.londoncharter.org/>
- European Union. (2020). Europeana Strategy 2020-2025. Empowering Digital Change. Publications Office of the European Union. Retrieved from <https://doi.org/10.2759/524581>
- Fabrizi, S., Sauro, F., Santagata, T., Rossi, G., & De Waele, J. (2017). High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy). *Geomorphology*, 280, 16–29. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.001>
- Fangi, G. (2019). ALEPPO before and after the WAR 2010-2018. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-449-2019>
- Ferdani, D., Fanini, B., Piccioli, M. C., Carboni, F., & Vigliarolo, P. (2020). 3D reconstruction and validation of historical background for immersive VR applications and games: The case study of the Forum of Augustus in Rome. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.12.004>
- Fogliaroni, P. (2018). Mixed reality for archeology and cultural heritage. In *CEUR Workshop Proceedings*.
- Forte, M, Pescarin, S., & Pujol Tost, L. (2006). VR applications, new devices and museums: public's feedback and learning. A preliminary report. In *Proceedings of the 7th international symposium on virtual reality, archaeology and cultural*

heritage, VAST (pp. 64–69).

- Forte, Maurizio. (2007). *La villa di Livia: un percorso di ricerca di archeologia virtuale* (Vol. 41). L'Erma di Bretschneider.
- Forte, Maurizio, Pescarin, S., Pietroni, E., & Rufa, C. (2006). Multiuser interaction in an archaeological landscape: the Flaminia project. *BAR International Series*, 1568, 189.
- Gaiani, M. (2015). Color acquisition, management, rendering, and assessment in 3D reality-based models construction. In *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*. Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8379-2.ch001>
- Gaiani, M., Apollonio, F. I., & Martini, B. (2015). A design framework for Smart Cultural Objects. *Strategic Design Research Journal*. Retrieved from <https://doi.org/10.4013/sdrj.2015.81.04>
- Gaiani, M., Gamberini, E., Tonelli, G., Bonfigli, M. E., Calori, L., Guidazzoli, A., ... Riccò, B. (2007). Realtà virtuale come strumento di lavoro per il restauro architettonico e archeologico: il 3D virtual GIS 'La Via Appia Antica'. In A. Coralini & D. Scagliarini Corlàita (Eds.), *UT NATURA ARS Virtual Reality e archeologia* (University, p. 143).
- Galeazzi, F., Moyes, H., & Aldenderfer, M. (2014). Defining Best 3D Practices in Archaeology: Comparing Laser Scanning and Dense Stereo Matching Techniques for 3D Intrasite Data Recording. *Advances in Archaeological Practice*. Retrieved from <https://doi.org/10.7183/2326-3768.2.4.353>
- García-León, J., Sánchez-Allegue, P., Peña-Velasco, C., Cipriani, L., & Fantini, F. (2018). Interactive dissemination of the 3D model of a Baroque Altarpiece: A pipeline from digital survey to game engines. *SCIRES-IT*. Retrieved from <https://doi.org/10.2423/i22394303v8n2p59>

- Gargaro, S., Cigola, M., Gallozzi, A., & Zordan, M. (2019). UN APPROCCIO METODOLOGICO PER LA CONOSCENZA E LA GESTIONE DI UN'AREA ARCHEOLOGICA. In *VII Convegno Internazionale ReUSO Matera 23-26 Ottobre 2019* (pp. 1663–1674). Gangemi Editore Spa.
- Gerval, J. P., & Le Ru, Y. (2015). Fusion of multimedia and mobile technology in audioguides for museums and exhibitions. *Intelligent Systems Reference Library*. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-14645-4_8
- Giovannini, E. C., Lo Turco, M., & Mafri, N. (2019). DOCUMENTING HISTORICAL RESEARCH for A COLLECTION INFORMATION MODELLING. A PROPOSAL for A DIGITAL ASSET MANAGEMENT SYSTEM. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-519-2019>
- Guidi, G., Russo, M., & Beraldin, J.-A. (2010). *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. (P. Roncoroni, Ed.). McGraw-Hill.
- Guidi, G., Russo, M., Magrassi, G., & Bordegoni, M. (2010). Performance evaluation of triangulation based range sensors. *Sensors*. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s100807192>
- Haouchine, N., Dequidt, J., Berger, M. O., & Cotin, S. (2013). Deformation-based augmented reality for hepatic surgery. In *Studies in Health Technology and Informatics*. Retrieved from <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-209-7-182>
- Henderson, S., & Feiner, S. (2011). Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(10), 1355–1368. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.245>
- Huffman, K. L., Giordano, A., & Bruzelius, C. (2017). *Visualizing Venice: Mapping*

and Modeling Time and Change in a City. Routledge.

- Ippoliti, E., Meschini, A., Moscati, A., & Rossi, D. (2012). Interfacce e tecnologie visual 3D per conoscere , condividere e valorizzare il patrimonio culturale. *Disegnare Con*, 45–54.
- Istituto dell'Enciclopedia Italiana. (1996). Digitalizzione. In *Enciclopedia on line*. Istituto dell'Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani S.p.A. Retrieved from <https://www.treccani.it/enciclopedia/digitalizzazione/>
- Jiménez Fernández-Palacios, B., Rizzi, A., & Remondino, F. (2015). Etruscans in 3D - Surveying and 3D modeling for a better access and understanding of heritage -. *Virtual Archaeology Review*. Retrieved from <https://doi.org/10.4995/var.2013.4324>
- Jiménez Fernández-Palacios, Belen, Morabito, D., & Remondino, F. (2017). Access to complex reality-based 3D models using virtual reality solutions. *Journal of Cultural Heritage*, 23, 40–48. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.09.003>
- Julier, S. J., Fatah Gen Schieck, A., Blume, P., Moutinho, A., Koutsolampros, P., Javornik, A., ... Kostopoulou, E. (2016). VisAge: Augmented reality for heritage. In *PerDis 2016 - Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Pervasive Displays*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2914920.2939884>
- Knapp, M. E., Wolff, R., & Lipson, H. (2008). Developing printable content: A repository for printable teaching models. In *19th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2008*.
- Lampis, A. (2020). Ambienti digitali e Musei Italiani. In *Videogames, Ricerca, Patrimonio Culturale*, S. Pescarin (cur.) (pp. 288–294). Franco Angeli. Retrieved from http://ojs.francoangeli.it/_omp/index.php/oa/catalog/book/538
- Landau, S., Wiener, W., Naghshineh, K., Giusti, E., & Wiener, W. (2005). Creating

- accessible science museums with user-activated environmental audio beacons (ping!). *Assistive Technology*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10400435.2005.10132103>
- Laycock, S. D., Bell, G. D., Mortimore, D. B., Greco, M. K., Corps, N., & Finkle, I. (2012). Combining X-ray micro-CT technology and 3D printing for the digital preservation and study of a 19th century cantonese chess piece with intricate internal structure. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2399180.2399181>
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010a). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499–507. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.011>
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010b). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499–507. Retrieved 28 April 2020 from <https://doi.org/10.1016/J.JAS.2009.10.011>
- Liang, H., Li, W., Lai, S., Zhu, L., Jiang, W., & Zhang, Q. (2018). The integration of terrestrial laser scanning and terrestrial and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry for the documentation of Chinese classical gardens – A case study of Huanxiu Shanzhuang, Suzhou, China. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.004>
- Liarokapis, F. (2007). An augmented reality interface for visualizing and interacting with virtual content. *Virtual Reality*, 11(1), 23–43. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0055-1>

- Limoncelli, M., & Scardozi, G. (2015). La ricostruzione tridimensionale e il restauro virtuale di una tomba etrusca dipinta dell'Etruria meridionale interna: la "Grotta Dipinta" di Pranzovico (Viterbo). *Virtual Archaeology Review*, 4, 37. Retrieved from <https://doi.org/10.4995/var.2013.4285>
- Litvak, E., & Kuflik, T. (2020). Enhancing cultural heritage outdoor experience with augmented-reality smart glasses. *Personal and Ubiquitous Computing*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01366-7>
- Lo Turco, M., & Giovannini, E. C. (2020). Towards a phygital heritage approach for museum collection. *Journal of Archaeological Science: Reports*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102639>
- Lo Turco, M., Piumatti, P., Calvano, M., Giovannini, E. C., Mafrici, N., Tomalini, A., & Fanini, B. (2019). Interactive Digital Environments for Cultural Heritage and Museums. Building a digital ecosystem to display hidden collections. *DISEGNARECON*.
- Lopez-Menchero, V. M., & Grande, A. (2011). The Principles of the Seville Charter. *Proceedings XXIIIrd International CIPA Symposium*, 12–16.
- Luhtmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2011). *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Whittles, Caitness. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/phor.12114>
- Magda Ramos, M., & Remondino, F. (2015). Data fusion in cultural heritage - A review. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-359-2015>
- Mah, O. B. P., Yan, Y., Tan, J. S. Y., Tan, Y. X., Tay, G. Q. Y., Chiam, D. J., ... Feng, C. C. (2019). Generating a virtual tour for the preservation of the (in)tangible cultural heritage of Tampines Chinese Temple in Singapore. *Journal of Cultural*

- Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.04.004>
- Mandelli, A., Fassi, F., Perfetti, L., & Polari, C. (2017). Testing different survey techniques to model architectonic narrow spaces. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-505-2017>
- Manovich, L. (2006). The poetics of augmented space. *Visual Communication*. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/1470357206065527>
- Marchi, A. (2015). *Lo Studiolo del Duca. Il ritorno degli Uomini Illustri alla Corte di Urbino*. Milano: Skira editore.
- Marraffa, A., & Fatta, F. (2020). From the Vascular Art to the Representation of the Scene: Build, Deconstruct, Rebuild. In *Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica* (pp. 498–512). Springer.
- Merlo, A., Aliperta, A., & Montuori, R. (2017). Strumenti e metodi per la documentazione digitale degli scavi archeologici: La Blanca (Petén - Guatemala). *Restauro Archeologico*, 25(1), 26–47. Retrieved from <https://doi.org/10.13128/RA-20525>
- Merlo, A., Fantini, F., Aliperta, A., Lavoratti, G., & López Hernández, J. L. (2013). Texturing e ottimizzazione dei modelli digitali reality based : la chiesa della Compañía de Jesús Texturing and optimization of reality based digital models : the church of Compañía de Jesús. *Disegnare Con*, 1–14. Retrieved from <http://disegnarecon.unibo.it/issue/view/393/showToc>
- Meschini, A., Rossi, D., Petrucci, E., & Sicuranza, F. (2017). Expanded Cultural Heritage Representation: Digital Applications for Mixed-Reality Experiences. In *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling* (IGI Global, pp. 256–287). Retrieved from

<https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0680-5.ch011>

Milgram, P., & Kishino, F. (1994). Taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*.

Moorhouse, N., tom Dieck, M. C., & Jung, T. (2019). An experiential view to children learning in museums with Augmented Reality. *Museum Management and Curatorship*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/09647775.2019.1578991>

Morris, G. (2004). It's a vision thing. Retrieved 25 May 2020, from <https://www.culturehive.co.uk/wp-content/uploads/2013/09/Its-a-vision-thing..Gerri-Morris..2004.pdf>

Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Guillemain, S., & Prilaux, G. (2017). CENTENARY of the BATTLE of VIMY (FRANCE, 1917): PRESERVING the MEMORY of the GREAT WAR THROUGH 3D RECORDING of the MAISON BLANCHE SOUTERRAINE. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-171-2017>

NEMO. (2020). *Survey on the impact of the COVID-19 situation on museums in Europe Final Report*. Retrieved from https://www.nemo.org/fileadmin/Dateien/public/NEMO_documents/NEMO_COVID19_Report_12.05.2020.pdf

Nespeca, R. (2018). *Documentazione digitale per il cultural heritage. Point cloud come sistema informativo*. (Aracne,Ed.).

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

Nosengo, N. (2005). Digitalizzazione. In *Enciclopedia dei ragazzi*. Istituto dell'Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani S.p.A. Retrieved from https://www.treccani.it/enciclopedia/digitalizzazione_%28Enciclopedia-dei-

ragazzi%29/

- Nuttens, T., De Maeyer, P., De Wulf, A., Goossens, R., & Stal, C. (2009). Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry for Cultural Heritage : an Accuracy Assessment. *4th International Workshop on 3D Geo-Information*, (May), 18–22.
- Okura, F., Kanbara, M., & Yokoya, N. (2015). Mixed-reality world exploration using image-based rendering. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2700428>
- Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione. DECISIONE (UE) 2017/864 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 17 maggio 2017 relativa a un Anno europeo del patrimonio culturale (2018) (2017). Unione Europea: Gazzetta ufficiale dell'Unione europea. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D0864&from=EN>
- Parrinello, S., Picchio, F., & Bercigli, M. (2016). The 'migration' of reality in virtual scenarios: databases and documentation systems for the musealization of complex environments. *Disegnare Con*, 9(december).
- Pescarin, S. (2014). Museums and Virtual Museums in Europe Reaching expectations. *SCIRES-IT: SCientific RESearch and Information Technology*. Retrieved from <https://doi.org/10.2423/i22394303v4n1p131>
- Pescarin, S., Cerato, I., Fanini, B., Ferdani, D., Palombini, A., Rescic, L., ... Misfud, K. (2020). Una notte nel foro: un videogioco ambientato in un sito archeologico. In *Videogames, Ricerca, Patrimonio Culturale*, S. Pescarin (cur.) (pp. 60–69). Franco Angeli. Retrieved from http://ojs.francoangeli.it/_omp/index.php/oa/catalog/book/538
- Pierdicca, R., Malinverni, E. S., Frontoni, E., Colosi, F., & Orazi, R. (2016). 3D visualization tools to explore ancient architectures in South America. *Virtual Archaeology Review*. Retrieved from <https://doi.org/10.4995/var.2016.5904>

- Pietroni, E., Forlani, M., & Rufa, C. (2015). Livia's Villa Reloaded: An example of re-use and update of a pre-existing Virtual Museum, following a novel approach in storytelling inside virtual reality environments. In *2015 Digital Heritage International Congress, Digital Heritage 2015*. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419567>
- Pitzalis, D., Cignoni, P., Menu, M., & Aitken, G. (2008). 3D enhanced model from multiple data sources for the analysis of the Cylinder seal of Ibni-Sharrum. In *VAST 2008: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*.
- Polichetti, M. L. (1985). Nuovi elementi per la storia del Palazzo: restauri e ricerche. In Quattroventi (Ed.), *Il Palazzo di Federico da Montefeltro. Vol. 1: Restauri e Ricerche (a cura di Polichetti M.L.)* (pp. 137–174). Urbino.
- Proctor, N. (2011). The Google Art Project: A New Generation of Museums on the Web? *Curator: The Museum Journal*. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/j.2151-6952.2011.00083.x>
- Quattrini, R., Frappicini, N., & Nespeca, R. (2018). ARCHEOGate: un portale web per la catalogazione e la fruizione dell'archeologia delle Marche. In R. Salerno (Ed.), *Rappresentazione materiale/immateriale-Drawing as (in)tangible representation. 40° Convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione* (pp. 1349–1358). Milano: Gangemi Editore.
- Quattrini, R., Pierdicca, R., Frontoni, E., & Clini, P. (2015). Mobile e realtà aumentata al Palazzo Ducale di Urbino: il Museo è digitale. *ARCHEOMATICA*, 33–38.
- Rahaman, H., Champion, E., & Bekele, M. (2019). From photo to 3D to mixed reality: A complete workflow for cultural heritage visualisation and experience. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00102>

- Reichinger, A., Maierhofer, S., & Purgathofer, W. (2011). High-quality tactile paintings. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2037820.2037822>
- Reichinger, A., Neumüller, M., Rist, F., Maierhofer, S., & Purgathofer, W. (2012). Computer-aided design of tactile models: Taxonomy and case studies. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-642-31534-3_73
- Reisman, R. J., & Brown, D. M. (2006). Design of augmented reality tools for air traffic control towers. In *Collection of Technical Papers - 6th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. Retrieved from <https://doi.org/10.2514/6.2006-7713>
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs3061104>
- Russo, M., Remondino, F., & Guidi, G. (2011). Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico. *Archeologia e Calcolatori*.
- Russo, Michele, & Manfredini, A. M. (2015). Integrated multi-scalar approach for 3D cultural heritage acquisitions. In *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*. Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8379-2.ch011>
- Sá, A. M., Rodriguez Echavarría, K., Griffin, M., Covill, D., Kaminski, J., & Arnold, D. (2012). Parametric 3D-fitted frames for packaging heritage artefacts. *The 13th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*.
- Salerno, R. (2020). Graphic Languages and Digital Tools for Communicating and

- Sharing Heritage. In *Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica* (pp. 475–484). Cham: Springer.
- Sánchez-Belenguer, C., Vendrell-Vidal, E., Sanchez-Lopez, M., Díaz-Marín, C., & Aura-Castro, E. (2015). Automatic production of tailored packaging for fragile archaeological artifacts. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2716324>
- Santos, P., Acri, D., Gierlinger, T., Schmedt, H., & Stork, A. (2010). Supporting outdoor mixed reality applications for architecture and cultural heritage. In *Spring Simulation Multiconference 2010, SpringSim'10*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/1878537.1878735>
- Sciacchitano, E. (2019). Editorial. European year of Cultural-Heritage. A laboratory for heritage-based innovation. *SCIRES-IT - SCIENTIFIC RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGY*, 9(1), 1–14. Retrieved 29 July 2019 from <https://doi.org/10.2423/I22394303V9N1P1>
- Scopigno, R., Cignoni, P., Pietroni, N., Callieri, M., & Dellepiane, M. (2017). Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey. *Computer Graphics Forum*. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/cgf.12781>
- Sdegno, A., Cochelli, P., Riavis, V., & Veneziano, S. (2018). Advanced Simulation of Frank Lloyd Wright's Fallingwater: Digital Reconstruction and Virtual Reality. In *International and Interdisciplinary Conference on Digital Environments for Education, Arts and Heritage* (pp. 587–596). Springer.
- Serna, C. G., Pillay, R., & Trémeau, A. (2015). Data fusion of objects using techniques such as laser scanning, structured light and photogrammetry for cultural heritage applications. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 9016, pp. 208–224). Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-15979-9_20

- Sernani, P., Angeloni, R., Dragoni, A. F., Quattrini, R., & Clini, P. (2019). *Combining Image Targets and SLAM for AR-Based Cultural Heritage Fruition. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 11614 LNCS). Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-030-25999-0_17
- Shelton, B., & Hedley, N. (2004). Exploring a cognitive basis for learning spatial relationships with augmented reality. *Technology, Instruction, Cognition and Learning*.
- Skarlatos, D., & Kiparissi, S. (2012). COMPARISON of LASER SCANNING, PHOTOGRAMMETRY and SFM-MVS PIPELINE APPLIED in STRUCTURES and ARTIFICIAL SURFACES. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-3-299-2012>
- Sleeswyk, A. W. (1981). Vitruvius' Odometer. *Scientific American*. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/scientificamerican1081-188>
- tom Dieck, M. C., & Jung, T. (2018). A theoretical model of mobile augmented reality acceptance in urban heritage tourism. *Current Issues in Tourism*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/13683500.2015.1070801>
- Tucci, G., & Bonora, V. (2007). Application of High Resolution Scanning Systems for Virtual Moulds and Replicas of Sculptural Works. In *XXI International CIPA Symposium*.
- Valéry, P. (2003). *La conquête de l'ubiquité (1928)*. *La conquête de l'ubiquité (1928)*. Chicoutimi, Québec: J.-M. Tremblay. Retrieved from <https://doi.org/10.1522/cla.sif.vap.con>
- Vitale, G. (2013). *Design di sistema per le istituzioni culturali. Il museo empatico*. Bologna: Zanichelli. Retrieved from <http://www.aiap.it/libreria.php?ID=6227>

- Wagner, I., Basile, M., Ehrenstrasser, L., Maquil, V., Terrin, J.-J., & Wagner, M. (2009). Supporting Community Engagement in the City : Urban Planning in the MR-Tent. *Communities and Technology*, 8, 185–194. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/1556460.1556488>
- Wilson, L., Rawlinson, A., Frost, A., & Hepher, J. (2018). 3D digital documentation for disaster management in historic buildings: Applications following fire damage at the Mackintosh building, The Glasgow School of Art. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.012>
- Wong, L., & Santana Quintero, M. (2019). Tutankhamen’s two tombs: Replica creation and the preservation of our cultural heritage in the digital age. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-2-W11-1145-2019>
- Yoon, S. A., Elinich, K., Wang, J., Steinmeier, C., & Tucker, S. (2012). Using augmented reality and knowledge-building scaffolds to improve learning in a science museum. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9156-x>
- Younes, G., Kahil, R., Jallad, M., Asmar, D., Elhaji, I., Turkiyyah, G., & Al-Harithy, H. (2017). Virtual and augmented reality for rich interaction with cultural heritage sites: A case study from the Roman Theater at Byblos. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.03.002>
- Yuen, S. C.-Y., Yaoyuneyong, G., & Johnson, E. (2017). Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange*, 4(1). Retrieved from <https://doi.org/10.18785/jetde.0401.10>

Zikas, P., Bachlitzanakis, V., Papaefthymiou, M., Kateros, S., Georgiou, S., Lydatakis, N., & Papagiannakis, G. (2016). Mixed reality serious games and gamification for smart education. In *Proceedings of the European Conference on Games-based Learning*.

Zuanni, C. (2020). Digital responses from locked-down museums. *Cultural Practice*. Retrieved from <https://culturalpractice.org/digital-responses-from-locked-down-museums/>

Bibliografia tematica cronologica

La documentazione digitale del CH

Demetrescu, E., d'Annibale, E., Ferdani, D., & Fanini, B. (2020). Digital replica of cultural landscapes: An experimental reality-based workflow to create realistic, interactive open world experiences. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.018>

Fangi, G. (2019). ALEPPO before and after the WAR 2010-2018. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-449-2019>

Gargaro, S., Cigola, M., Gallozzi, A., & Zordan, M. (2019). UN APPROCCIO METODOLOGICO PER LA CONOSCENZA E LA GESTIONE DI UN'AREA

- ARCHEOLOGICA. In *VII Convegno Internazionale ReUSO Matera 23-26 Ottobre 2019* (pp. 1663–1674). Gangemi Editore Spa.
- Giovannini, E. C., Lo Turco, M., & Mafrici, N. (2019). DOCUMENTING HISTORICAL RESEARCH for A COLLECTION INFORMATION MODELLING. A PROPOSAL for A DIGITAL ASSET MANAGEMENT SYSTEM. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-519-2019>
- De Waele, J., Fabbri, S., Santagata, T., Chiarini, V., Columbu, A., & Pisani, L. (2018). Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romagna, N. Italy). *Geomorphology*, 319, 47–61. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.012>
- García-León, J., Sánchez-Allegue, P., Peña-Velasco, C., Cipriani, L., & Fantini, F. (2018). Interactive dissemination of the 3D model of a Baroque Altarpiece: A pipeline from digital survey to game engines. *SCIRES-IT*. Retrieved from <https://doi.org/10.2423/i22394303v8n2p59>
- Liang, H., Li, W., Lai, S., Zhu, L., Jiang, W., & Zhang, Q. (2018). The integration of terrestrial laser scanning and terrestrial and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry for the documentation of Chinese classical gardens – A case study of Huanxiu Shanzhuang, Suzhou, China. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.004>
- Nespeca, R. (2018). *Documentazione digitale per il cultural heritage. Point cloud come sistema informativo*. (Aracne,Ed.).
- Wilson, L., Rawlinson, A., Frost, A., & Hopher, J. (2018). 3D digital documentation for disaster management in historic buildings: Applications following fire

- damage at the Mackintosh building, The Glasgow School of Art. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.012>
- Atteni, M., Bartolomei, C., Hess, M., & Ippolito, A. (2017). Survey and modeling: From the process to a methodology. *SCIRES-IT*. Retrieved from <https://doi.org/10.2423/i22394303v7n1p57>
- Fabbri, S., Sauro, F., Santagata, T., Rossi, G., & De Waele, J. (2017). High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy). *Geomorphology*, 280, 16–29. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.001>
- Mandelli, A., Fassi, F., Perfetti, L., & Polari, C. (2017). Testing different survey techniques to model architectonic narrow spaces. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-505-2017>
- Merlo, A., Aliperta, A., & Montuori, R. (2017). Strumenti e metodi per la documentazione digitale degli scavi archeologici: La Blanca (Petén - Guatemala). *Restauro Archeologico*, 25(1), 26–47. Retrieved from <https://doi.org/10.13128/RA-20525>
- Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Guillemain, S., & Prilaux, G. (2017). CENTENARY of the BATTLE of VIMY (FRANCE, 1917): PRESERVING the MEMORY of the GREAT WAR THROUGH 3D RECORDING of the MAISON BLANCHE SOUTERRAINE. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-171-2017>
- Calisi, D., Giannone, F., Ventura, C., Salonia, P., Cottefoglie, F., & Ziparo, V. A.

- (2016). Digitizing indoor and underground cultural heritage sites with robots. *SCIRES-IT - SCIENTIFIC RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGY*, 6(1), 23–30. Retrieved 10 November 2020 from <https://doi.org/10.2423/I22394303V6N1P23>
- Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R., & Ruggeri, L. (2016). SFM TECHNIQUE AND FOCUS STACKING FOR DIGITAL DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL ARTIFACTS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 229–236. Retrieved 20 April 2017 from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-229-2016>
- Clini, P., Quattrini, R., Nespeca, R., Carolis, G., & Ruggeri, L. (2015). Disegnare la città insegnando a rilevare. Tecnologie integrate per un rilievo urbano 3D. In *Disegno & Città* (pp. 523–530). Torino: Gangemi Editore. Retrieved from <https://doi.org/ISBN:978-88-492-3124-3>
- Gaiani, M. (2015). Color acquisition, management, rendering, and assessment in 3D reality-based models construction. In *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*. Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8379-2.ch001>
- Magda Ramos, M., & Remondino, F. (2015). Data fusion in cultural heritage - A review. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-359-2015>
- Russo, Michele, & Manferdini, A. M. (2015). Integrated multi-scalar approach for 3D cultural heritage acquisitions. In *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*. Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8379-2.ch011>
- Serna, C. G., Pillay, R., & Trémeau, A. (2015). Data fusion of objects using techniques

- such as laser scanning, structured light and photogrammetry for cultural heritage applications. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 9016, pp. 208–224). Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-15979-9_20
- Galeazzi, F., Moyes, H., & Aldenderfer, M. (2014). Defining Best 3D Practices in Archaeology: Comparing Laser Scanning and Dense Stereo Matching Techniques for 3D Intrasite Data Recording. *Advances in Archaeological Practice*. Retrieved from <https://doi.org/10.7183/2326-3768.2.4.353>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Iaccarino Idelson, A., & Scopigno, R. (2013). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.06.008>
- Skarlatos, D., & Kiparissi, S. (2012). COMPARISON of LASER SCANNING, PHOTOGRAMMETRY and SFM-MVS PIPELINE APPLIED in STRUCTURES and ARTIFICIAL SURFACES. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-3-299-2012>
- De Luca, L. (2011). *La fotomodellazione architettonica*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- Henderson, S., & Feiner, S. (2011). Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(10), 1355–1368. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.245>
- Lopez-Menchero, V. M., & Grande, A. (2011). The Principles of the Seville Charter.

- Proceedings XXIIIrd International CIPA Symposium*, 12–16.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2011). *Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications*. Whittles, Caitness. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/phor.12114>
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/rs3061104>
- Russo, M., Remondino, F., & Guidi, G. (2011). Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico. *Archeologia e Calcolatori*.
- Guidi, G., Russo, M., & Beraldin, J.-A. (2010). *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*. (P. Roncoroni, Ed.). McGraw-Hill.
- Guidi, G., Russo, M., Magrassi, G., & Bordegoni, M. (2010). Performance evaluation of triangulation based range sensors. *Sensors*. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/s100807192>
- Lerma, J. L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3), 499–507. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.011>
- Nuttens, T., De Maeyer, P., De Wulf, A., Goossens, R., & Stal, C. (2009). Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry for Cultural Heritage : an Accuracy Assessment. *4th International Workshop on 3D Geo-Information*, (May), 18–22.
- Pitzalis, D., Cignoni, P., Menu, M., & Aitken, G. (2008). 3D enhanced model from multiple data sources for the analysis of the Cylinder seal of Ibni-Sharrum. In *VAST 2008: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*.

Tucci, G., & Bonora, V. (2007). Application of High Resolution Scanning Systems for Virtual Moulds and Replicas of Sculptural Works. In *XXI International CIPA Symposium*.

La fruizione digitale del CH

Bolognesi, C. M., & Aiello, D. A. A. (2020). Through Achille Castiglioni's Eyes: Two Immersive Virtual Experiences. In G. Guazzaroni & A. S. Pillai (Eds.), *Virtual and Augmented Reality in Education, Art, and Museums* (pp. 283–310). Hershey, PA, USA: IGI Global. Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1796-3.ch014>

Clini, Paolo, Quattrini, R., Bonvini, P., Nespeca, R., Angeloni, R., Mammoli, R., ... Mengoni, M. (2020). Digit (al) isation in Museums: Civitas Project—AR, VR, Multisensorial and Multiuser Experiences at the Urbino's Ducal Palace. In *Virtual and Augmented Reality in Education, Art, and Museums* (pp. 194–228). IGI Global.

Clini, Paolo, Quattrini, R., Nespeca, R., Angeloni, R., & Mammoli, R. (2020). Digital facsimiles of architectural heritage: new forms of fruition, management and enhancement. The exemplary case of the Ducal Palace at Urbino. In *Graphical Heritage, Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica* (pp. 571–582). Cham: Springer.

Ferdani, D., Fanini, B., Piccioli, M. C., Carboni, F., & Vigliarolo, P. (2020). 3D reconstruction and validation of historical background for immersive VR applications and games: The case study of the Forum of Augustus in Rome.

- Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.12.004>
- Lampis, A. (2020). Ambienti digitali e Musei Italiani. In *Videogames, Ricerca, Patrimonio Culturale*, S. Pescarin (cur.) (pp. 288–294). Franco Angeli. Retrieved from http://ojs.francoangeli.it/_omp/index.php/oa/catalog/book/538
- Litvak, E., & Kuflik, T. (2020). Enhancing cultural heritage outdoor experience with augmented-reality smart glasses. *Personal and Ubiquitous Computing*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01366-7>
- Lo Turco, M., & Giovannini, E. C. (2020). Towards a phygital heritage approach for museum collection. *Journal of Archaeological Science: Reports*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102639>
- Marraffa, A., & Fatta, F. (2020). From the Vascular Art to the Representation of the Scene: Build, Deconstruct, Rebuild. In *Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica* (pp. 498–512). Springer.
- Pescarin, S., Cerato, I., Fanini, B., Ferdani, D., Palombini, A., Rescic, L., ... Misfud, K. (2020). Una notte nel foro: un videogioco ambientato in un sito archeologico. In *Videogames, Ricerca, Patrimonio Culturale*, S. Pescarin (cur.) (pp. 60–69). Franco Angeli. Retrieved from http://ojs.francoangeli.it/_omp/index.php/oa/catalog/book/538
- Salerno, R. (2020). Graphic Languages and Digital Tools for Communicating and Sharing Heritage. In *Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica* (pp. 475–484). Cham: Springer.
- Zuanni, C. (2020). Digital responses from locked-down museums. *Cultural Practice*. Retrieved from <https://culturalpractice.org/digital-responses-from-locked-down-museums/>
- Bekele, M. K. (2019). Walkable Mixed Reality Map as interaction interface for Virtual

- Heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00127>
- Bozzelli, G., Raia, A., Ricciardi, S., De Nino, M., Barile, N., Perrella, M., ... Palombini, A. (2019). An integrated VR/AR framework for user-centric interactive experience of cultural heritage: The ArkaeVision project. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00124>
- Dragoni, A. F., Quattrini, R., Sernani, P., & Ruggeri, L. (2019). Real Scale Augmented Reality. A Novel Paradigm for Archaeological Heritage Fruition. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-030-12240-9_68
- Giovannini, E. C., Lo Turco, M., & Mafriaci, N. (2019). DOCUMENTING HISTORICAL RESEARCH for A COLLECTION INFORMATION MODELLING. A PROPOSAL for A DIGITAL ASSET MANAGEMENT SYSTEM. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-519-2019>
- Lo Turco, M., Piumatti, P., Calvano, M., Giovannini, E. C., Mafriaci, N., Tomalini, A., & Fanini, B. (2019). Interactive Digital Environments for Cultural Heritage and Museums. Building a digital ecosystem to display hidden collections. *DISEGNARECON*.
- Mah, O. B. P., Yan, Y., Tan, J. S. Y., Tan, Y. X., Tay, G. Q. Y., Chiam, D. J., ... Feng, C. C. (2019). Generating a virtual tour for the preservation of the (in)tangible cultural heritage of Tampines Chinese Temple in Singapore. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.04.004>
- Moorhouse, N., tom Dieck, M. C., & Jung, T. (2019). An experiential view to children learning in museums with Augmented Reality. *Museum Management and*

- Curatorship*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/09647775.2019.1578991>
- Rahaman, H., Champion, E., & Bekele, M. (2019). From photo to 3D to mixed reality: A complete workflow for cultural heritage visualisation and experience. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00102>
- Sciacchitano, E. (2019). Editorial. European year of Cultural-Heritage. A laboratory for heritage-based innovation. *SCIRES-IT - SCientific RESearch and Information Technology*, 9(1), 1–14. Retrieved 29 July 2019 from <https://doi.org/10.2423/I22394303V9N1P1>
- Sernani, P., Angeloni, R., Dragoni, A. F., Quattrini, R., & Clini, P. (2019). *Combining Image Targets and SLAM for AR-Based Cultural Heritage Fruition. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 11614 LNCS). Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-030-25999-0_17
- Wong, L., & Santana Quintero, M. (2019). Tutankhamen's two tombs: Replica creation and the preservation of our cultural heritage in the digital age. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-2-W11-1145-2019>
- Bekele, M. K., Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., & Gain, J. (2018). A Survey of Augmented, Virtual, and Mixed Reality for Cultural Heritage. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/3145534>
- Clini, P., Ruggeri, L., Angeloni, R., & Sasso, M. (2018). Interactive immersive virtualmuseum: Digital documentation for virtual interaction. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

- Sciences - ISPRS Archives* (Vol. 42). Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-251-2018>
- Fogliaroni, P. (2018). Mixed reality for archeology and cultural heritage. In *CEUR Workshop Proceedings*.
- García-León, J., Sánchez-Allegue, P., Peña-Velasco, C., Cipriani, L., & Fantini, F. (2018). Interactive dissemination of the 3D model of a Baroque Altarpiece: A pipeline from digital survey to game engines. *SCIRES-IT*. Retrieved from <https://doi.org/10.2423/i22394303v8n2p59>
- Quattrini, R., Frappicini, N., & Nespeca, R. (2018). ARCHEOGate: un portale web per la catalogazione e la fruizione dell'archeologia delle Marche. In R. Salerno (Ed.), *Rappresentazione materiale/immateriale-Drawing as (in)tangible representation. 40° Convegno internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione* (pp. 1349–1358). Milano: Gangemi Editore.
- Sdegno, A., Cochelli, P., Riavis, V., & Veneziano, S. (2018). Advanced Simulation of Frank Lloyd Wright's Fallingwater: Digital Reconstruction and Virtual Reality. In *International and Interdisciplinary Conference on Digital Environments for Education, Arts and Heritage* (pp. 587–596). Springer.
- tom Dieck, M. C., & Jung, T. (2018). A theoretical model of mobile augmented reality acceptance in urban heritage tourism. *Current Issues in Tourism*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/13683500.2015.1070801>
- Brusaporci, S., Centofanti, M., & Maiezza, P. (2017). MUS. AQ: A digital museum of L'Aquila for the smart city INCIPICT project. In *New Activities For Cultural Heritage* (pp. 200–208). Springer.
- Clini, P., Nespeca, R., & Ruggeri, L. (2017). Virtual in real. Interactive solutions for learning and communication in the national archaeological museum of Marche. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial*

- Information Sciences - ISPRS Archives* (Vol. 42, pp. 647–654). Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-5-W1-647-2017>
- Clini, Paolo, Quattrini, R., Frontoni, E., Pierdicca, R., & Nespeca, R. (2017). Real/Not Real: Pseudo-Holography and Augmented Reality Applications for Cultural Heritage Paolo. In *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling* (IGI Global, pp. 201–227). Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0680-5.ch009>
- Huffman, K. L., Giordano, A., & Bruzelius, C. (2017). *Visualizing Venice: Mapping and Modeling Time and Change in a City*. Routledge.
- Jiménez Fernández-Palacios, Belen, Morabito, D., & Remondino, F. (2017). Access to complex reality-based 3D models using virtual reality solutions. *Journal of Cultural Heritage*, 23, 40–48. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.09.003>
- Meschini, A., Rossi, D., Petrucci, E., & Sicuranza, F. (2017). Expanded Cultural Heritage Representation: Digital Applications for Mixed-Reality Experiences. In *Handbook of Research on Emerging Technologies for Digital Preservation and Information Modeling* (IGI Global, pp. 256–287). Retrieved from <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0680-5.ch011>
- Scopigno, R., Cignoni, P., Pietroni, N., Callieri, M., & Dellepiane, M. (2017). Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey. *Computer Graphics Forum*. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/cgf.12781>
- Younes, G., Kahil, R., Jallad, M., Asmar, D., Elhajj, I., Turkiyyah, G., & Al-Harithy, H. (2017). Virtual and augmented reality for rich interaction with cultural heritage sites: A case study from the Roman Theater at Byblos. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.03.002>

- Yuen, S. C.-Y., Yaoyuneyong, G., & Johnson, E. (2017). Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange*, 4(1). Retrieved from <https://doi.org/10.18785/jetde.0401.10>
- Branchesi, L., Curzi, V., & Mandarano, N. (2016). *Comunicare il museo oggi. Dalle scelte museologiche al digitale*. Skira editore.
- Cardaci, A., Versaci, A., & Fauzia, L. R. (2016). Between Archaeology and Landscape. Analysis, Conservation and Valorisation of Early Christian Hypogean Complexes of the South-Eastern Sicily. In *Landscape & Archaeology En-route International Seminar in Flaminia, Fano, Fossombrone, Cagli, Italy, 23-25 June 2016* (Vol. 4, pp. 40–48). I QUADERNI DI CAREGGI.
- Julier, S. J., Fatah Gen Schieck, A., Blume, P., Moutinho, A., Koutsolampros, P., Javornik, A., ... Kostopoulou, E. (2016). VisAge: Augmented reality for heritage. In *PerDis 2016 - Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Pervasive Displays*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2914920.2939884>
- Parrinello, S., Picchio, F., & Bercigli, M. (2016). The ‘migration’ of reality in virtual scenarios: databases and documentation systems for the musealization of complex environments. *Disegnare Con*, 9(december).
- Pierdicca, R., Malinverni, E. S., Frontoni, E., Colosi, F., & Orazi, R. (2016). 3D visualization tools to explore ancient architectures in South America. *Virtual Archaeology Review*. Retrieved from <https://doi.org/10.4995/var.2016.5904>
- Zikas, P., Bachlitzanakis, V., Papaefthymiou, M., Kateros, S., Georgiou, S., Lydatakis, N., & Papagiannakis, G. (2016). Mixed reality serious games and gamification for smart education. In *Proceedings of the European Conference on Games-based Learning*.
- D’Agnano, F., Balletti, C., Guerra, F., & Vernier, P. (2015). Tooteko: A case study of

- augmented reality for an accessible cultural heritage. Digitization, 3D printing and sensors for an audio-tactile experience. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-207-2015>
- Gaiani, M., Apollonio, F. I., & Martini, B. (2015). A design framework for Smart Cultural Objects. *Strategic Design Research Journal*. Retrieved from <https://doi.org/10.4013/sdrj.2015.81.04>
- Gerval, J. P., & Le Ru, Y. (2015). Fusion of multimedia and mobile technology in audioguides for museums and exhibitions. *Intelligent Systems Reference Library*. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-14645-4_8
- Jiménez Fernández-Palacios, B., Rizzi, A., & Remondino, F. (2015). Etruscans in 3D - Surveying and 3D modeling for a better access and understanding of heritage -. *Virtual Archaeology Review*. Retrieved from <https://doi.org/10.4995/var.2013.4324>
- Limoncelli, M., & Scardozzi, G. (2015). La ricostruzione tridimensionale e il restauro virtuale di una tomba etrusca dipinta dell'Etruria meridionale interna: la "Grotta Dipinta" di Pranzovico (Viterbo). *Virtual Archaeology Review*, 4, 37. Retrieved from <https://doi.org/10.4995/var.2013.4285>
- Okura, F., Kanbara, M., & Yokoya, N. (2015). Mixed-reality world exploration using image-based rendering. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2700428>
- Pietroni, E., Forlani, M., & Rufa, C. (2015). Livia's Villa Reloaded: An example of re-use and update of a pre-existing Virtual Museum, following a novel approach in storytelling inside virtual reality environments. In *2015 Digital Heritage International Congress, Digital Heritage 2015*. Retrieved from

<https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419567>

- Quattrini, R., Pierdicca, R., Frontoni, E., & Clini, P. (2015). Mobile e realtà aumentata al Palazzo Ducale di Urbino: il Museo è digitale. *ARCHEOMATICA*, 33–38.
- Sánchez-Belenguer, C., Vendrell-Vidal, E., Sanchez-Lopez, M., Díaz-Marín, C., & Aura-Castro, E. (2015). Automatic production of tailored packaging for fragile archaeological artifacts. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2716324>
- Antinucci, F. (2014). *Comunicare nel museo*. Editori Laterza. Retrieved from <https://books.google.it/books?id=2V6ODAAAQBAJ>
- Carrozzino, M., Evangelista, C., Brondi, R., Tecchia, F., & Bergamasco, M. (2014). Virtual reconstruction of paintings as a tool for research and learning. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.06.003>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Pescarin, S. (2014). Museums and Virtual Museums in Europe Reaching expectations. *SCIRES-IT: SCientific RESearch and Information Technology*. Retrieved from <https://doi.org/10.2423/i22394303v4n1p131>
- Arbace, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Iaccarino Idelson, A., & Scopigno, R. (2013). Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *Journal of Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.06.008>
- Boas, Y. (2013). Overview of Virtual Reality Technologies. *Mms.Ecs.Soton.Ac.Uk*. Retrieved from http://mms.ecs.soton.ac.uk/2013/papers/yavb1g12_25879847_finalpaper.pdf
- Casella, G., & Coelho, M. (2013). Augmented heritage - Situating augmented reality mobile apps in cultural heritage communication. In *ACM International*

- Conference Proceeding Series* (pp. 138–140). Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2503859.2503883>
- Merlo, A., Fantini, F., Aliperta, A., Lavoratti, G., & López Hernández, J. L. (2013). Texturing e ottimizzazione dei modelli digitali reality based: la chiesa della Compañía de Jesús Texturing and optimization of reality based digital models: the church of Compañía de Jesús. *Disegnare Con*, 1–14. Retrieved from <http://disegnarecon.unibo.it/issue/view/393/showToc>
- Vitale, G. (2013). *Design di sistema per le istituzioni culturali. Il museo empatico*. Bologna: Zanichelli. Retrieved from <http://www.aiap.it/libreria.php?ID=6227>
- Antlejš, K., Celec, K., Sinani, M., Mirtič, E., Ljubič IB-PROCADD doo Janja Slabe, D., Lemajič, G., & Kos, M. (2012). Restoration of a Stemmed Fruit Bowl Using 3D Technologies. *Review of the National Center for Digitization. SEEDI Communications 14. Proceedings of the Sixth SEEDI Conference. Digitization of Cultural and Scientific Heritage*.
- Bright, S. (2012). Investigating effective support mounts for fans during display by exploring new technologies. *CeROArt*. Retrieved from <https://doi.org/10.4000/ceroart.2546>
- Haouchine, N., Dequidt, J., Berger, M. O., & Cotin, S. (2013). Deformation-based augmented reality for hepatic surgery. In *Studies in Health Technology and Informatics*. Retrieved from <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-209-7-182>
- Ippoliti, E., Meschini, A., Moscati, A., & Rossi, D. (2012). Interfacce e tecnologie visual 3D per conoscere , condividere e valorizzare il patrimonio culturale. *Disegnare Con*, 45–54.
- Laycock, S. D., Bell, G. D., Mortimore, D. B., Greco, M. K., Corps, N., & Finkle, I. (2012). Combining X-ray micro-CT technology and 3D printing for the digital preservation and study of a 19th century cantonese chess piece with intricate

- internal structure. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2399180.2399181>
- Reichinger, A., Neumüller, M., Rist, F., Maierhofer, S., & Purgathofer, W. (2012). Computer-aided design of tactile models: Taxonomy and case studies. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-642-31534-3_73
- Sá, A. M., Rodriguez Echavarria, K., Griffin, M., Covill, D., Kaminski, J., & Arnold, D. (2012). Parametric 3D-fitted frames for packaging heritage artefacts. *The 13th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*.
- Yoon, S. A., Elinich, K., Wang, J., Steinmeier, C., & Tucker, S. (2012). Using augmented reality and knowledge-building scaffolds to improve learning in a science museum. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11412-012-9156-x>
- Clini, Paolo, & Quattrini, R. (2011). Le panoramiche sferiche per il rilievo e la comunicazione dell'architettura, un nuovo approccio alla realtà virtuale speditiva. In *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*. Roma: Gangemi editore.
- Henderson, S., & Feiner, S. (2011). Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(10), 1355–1368. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.245>
- Lopez-Menchero, V. M., & Grande, A. (2011). The Principles of the Seville Charter. *Proceedings XXIIIrd International CIPA Symposium*, 12–16.
- Proctor, N. (2011). The Google Art Project: A New Generation of Museums on the

- Web? *Curator: The Museum Journal*. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/j.2151-6952.2011.00083.x>
- Reichinger, A., Maierhofer, S., & Purgathofer, W. (2011). High-quality tactile paintings. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/2037820.2037822>
- Santos, P., Acri, D., Gierlinger, T., Schmedt, H., & Stork, A. (2010). Supporting outdoor mixed reality applications for architecture and cultural heritage. In *Spring Simulation Multiconference 2010, SpringSim'10*. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/1878537.1878735>
- EPOCH. (2009). *The London Charter. Access*. Retrieved from <http://www.londoncharter.org/>
- Wagner, I., Basile, M., Ehrenstrasser, L., Maquil, V., Terrin, J.-J., & Wagner, M. (2009). Supporting Community Engagement in the City : Urban Planning in the MR-Tent. *Communities and Technology*, 8, 185–194. Retrieved from <https://doi.org/10.1145/1556460.1556488>
- Knapp, M. E., Wolff, R., & Lipson, H. (2008). Developing printable content: A repository for printable teaching models. In *19th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2008*.
- Forte, Maurizio. (2007). *La villa di Livia: un percorso di ricerca di archeologia virtuale* (Vol. 41). L'Erma di Bretschneider.
- Gaiani, M., Gamberini, E., Tonelli, G., Bonfigli, M. E., Calori, L., Guidazzoli, A., ... Riccò, B. (2007). Realtà virtuale come strumento di lavoro per il restauro architettonico e archeologico: il 3D virtual GIS 'La Via Appia Antica'. In A. Coralini & D. Scagliarini Corlàita (Eds.), *UT NATURA ARS Virtual Reality e archeologia* (University, p. 143).
- Liarokapis, F. (2007). An augmented reality interface for visualizing and interacting

- with virtual content. *Virtual Reality*, 11(1), 23–43. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10055-006-0055-1>
- Forte, M, Pescarin, S., & Pujol Tost, L. (2006). VR applications, new devices and museums: public's feedback and learning. A preliminary report. In *Proceedings of the 7th international symposium on virtual reality, archaeology and cultural heritage, VAST* (pp. 64–69).
- Forte, Maurizio, Pescarin, S., Pietroni, E., & Rufa, C. (2006). Multiuser interaction in an archaeological landscape: the Flaminia project. *BAR International Series*, 1568, 189.
- Manovich, L. (2006). The poetics of augmented space. *Visual Communication*. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/1470357206065527>
- Landau, S., Wiener, W., Naghshineh, K., Giusti, E., & Wiener, W. (2005). Creating accessible science museums with user-activated environmental audio beacons (ping!). *Assistive Technology*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10400435.2005.10132103>
- Balzani, M., Callieri, M., Fabbri, M., Fasano, A., Montani, C., Pingi, P., ... Varone, A. (2004). Digital representation and multimodal presentation of archeological graffiti at Pompei. In *VAST 2004: the 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage: incorporating 2nd Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage: Conscience-auditorium, Brussels and Ename Center, Oudenaarde, Belgium*.
- Benko, H., Ishak, E. W., & Feiner, S. (2004). Collaborative mixed reality visualization of an archaeological excavation. In *ISMAR 2004: Proceedings of the Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2004.23>
- Morris, G. (2004). It's a vision thing. Retrieved 25 May 2020, from

<https://www.culturehive.co.uk/wp-content/uploads/2013/09/Its-a-vision-thing..Gerri-Morris..2004.pdf>

Shelton, B., & Hedley, N. (2004). Exploring a cognitive basis for learning spatial relationships with augmented reality. *Technology, Instruction, Cognition and Learning*.

Azuma, R., Baillet, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/38.963459>

Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. Retrieved from <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>

Milgram, P., & Kishino, F. (1994). Taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*.

Sitografia

3DReshaper, software per la modellazione e l'editing 3D

<https://www.3dreshaper.com/en/>

Adobe Photoshop Camera Raw, plug-in di Adobe Photoshop per lo sviluppo e l'editing di immagini

<https://helpx.adobe.com/it/camera-raw/kb/camera-raw-plug-in-installer.html>

Agisoft Photoscan, software di fotogrammetria digitale

<https://www.agisoft.com/>

Autodesk AutoCAD, software CAD per la rappresentazione bi e tridimensionale

<https://www.autodesk.it/products/autocad/overview>

Blender, software multiplatforma di modellazione, rigging, animazione, montaggio video, composizione e rendering di immagini tridimensionali e bidimensionali.

<https://www.blender.org/>

Carta di Londra

<http://www.londoncharter.org/>

Distori Heritage, gruppo di ricerca interdisciplinare dell'Università Politecnica delle Marche

<https://distori.org/>

Hololens, visore wireless per la realtà mista.

<https://www.microsoft.com/it-it/hololens>

HTCVive, sistema di fruizione per la realtà virtuale.

<https://www.vive.com>

Leica Cyclone, software per l'elaborazione di nuvole di punti 3D

<https://leica-geosystems.com/it-it/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>

PTGui, software di stitching e proiezione di immagini panoramiche

<https://www.ptgui.com/>

Sketchfab, piattaforma online per pubblicare, condividere e scoprire contenuti 3D

<https://sketchfab.com/>

Unity, motore grafico multiplatforma sviluppato che consente lo sviluppo di videogiochi e altri contenuti interattivi, quali visualizzazioni architettoniche o animazioni 3D in tempo reale.

<https://unity.com/>

Vuforia, kit di sviluppo software per dispositivi mobili che consente la creazione di applicazioni di realtà aumentata.

<https://developer.vuforia.com/>

Publicazioni

Contributo in atti di convegno

CLINI, P., QUATTRINI, R., **ANGELONI, R.**, D'ALESSIO, M., LANARI, L. (2020)
La Pinacoteca Civica F. Podesti di Ancona: un laboratorio didattico per la digitalizzazione del Patrimonio.

In 42° CONVEGNO INTERNAZIONALE DEI DOCENTI DELLE DISCIPLINE DELLA RAPPRESENTAZIONE CONGRESSO DELLA UNIONE ITALIANA PER IL DISEGNO (pp. 1974–1993). Franco Angeli.

Contributo in volume

CLINI, P., QUATTRINI, R., BONVINI, P., NESPECA, R., **ANGELONI, R.**, MAMMOLI, R., ... MENGONI, M. (2020).

Digit(al)isation in Museums: Civitas Project–AR, VR, Multisensorial and Multiuser

Experiences at the Urbino's Ducal Palace.

In VIRTUAL AND AUGMENTED REALITY IN EDUCATION, ART, AND MUSEUMS (pp. 194–228). IGI Global.

Contributo in atti di convegno

CLINI, P., QUATTRINI, R., NESPECA, R., **ANGELONI, R.**, & MAMMOLI, R. (2020).

Digital facsimiles of architectural heritage: new forms of fruition, management and enhancement. The exemplary case of the Ducal Palace at Urbino.

In GRAPHICAL HERITAGE, CONGRESO INTERNACIONAL DE EXPRESIÓN GRÁFICA ARQUITECTÓNICA (pp. 571–582). Cham: Springer.

Articolo su rivista

CLINI, P., DOMENICI, G., & **ANGELONI, R.** (2019).

Integrated digital documentation methods for iron and glass buildings: The herbs market in Ancona.

In DISEGNARE IDEE IMMAGINI (Vol. 30).

Articolo su rivista

CLINI, P., NESPECA, R., **ANGELONI, R.**, MAMMOLI, R. (2019).

The integrated survey of narrow spaces and underground architecture: the case study of Campana Caves bas-reliefs.

In ISPRS ANNALS OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES (Vol. 42). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-277-2019>

Articolo su rivista

CLINI, PAOLO, **ANGELONI, R.**, D'ALESSIO, M., BURONI, P., BURONI, A. (2019).

Leonardo Digitale, applicazioni virtuali per Il cinquecentenario leonardiano alla mostra "Leonardo e Vitruvio. Oltre il Cerchio e il Quadrato.

In ARCHEOMATICA, X(3), 20–23.

Contributo in volume

CLINI, PAOLO, CALLEGARI, M., BRILLARELLI, S., **ANGELONI, R.**, & D'ALESSIO, M. (2019).

Le Macchine virtuali di Leonardo.

In LEONARDO E VITRUVIO. OLTRE IL CERCHIO E IL QUADRATO. Venezia: Marsilio editore.

Articolo su rivista

QUATTRINI, R., GASPARETTO, F., **ANGELONI, R.**, D'ALESSIO, M. (2019).

Modelli digitali per comunicare il patrimonio e l'intervento di restauro. Palazzetto Baviera di Senigallia.

In ARCHEOMATICA, X(3), 24–27.

Contributo in volume

SERNANI, P., **ANGELONI, R.**, DRAGONI, A. F., QUATTRINI, R., & CLINI, P. (2019).

Combining Image Targets and SLAM for AR-Based Cultural Heritage Fruition.

In LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE (INCLUDING SUBSERIES LECTURE NOTES IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND LECTURE NOTES IN

BIOINFORMATICS) (Vol. 11614 LNCS). https://doi.org/10.1007/978-3-030-25999-0_17

Articolo su rivista

CLINI, P., RUGGERI, L., **ANGELONI, R.**, SASSO, M. (2018).

Interactive immersive virtualmuseum: Digital documentation for virtual interaction.

In INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES - ISPRS ARCHIVES (Vol. 42). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-251-2018>

Contributo in atti di convegno

CLINI, P., RUGGERI, L., **ANGELONI, R.**, BURONI, P. (2018).

Pseudo olografia per la fruizione interattiva dei Beni Culturali. Le formelle di Francesco di Giorgio Martini a Palazzo Ducale di Urbino.

In RAPPRESENTAZIONE MATERIALE IMMATERIALE. DRAWING AS (IN)TANGIBLE REPRESENTATION (pp. 1059–1066). Milano: Gangemi.