

Duplicato virtuale immersivo. Rilievo e strategie per gli ambienti del Vittoriale degli Italiani

Rachele A. Bernardello
Paolo Borin
Andrea Giordano

Abstract

Lo studio descrive la creazione di un duplicato digitale immersivo di due stanze del Vittoriale degli Italiani – la Stanza del Lebbroso e la Stanza delle Reliquie – con l'obiettivo di supportare una piattaforma collaborativa per la promozione del patrimonio culturale. L'indagine affronta le principali criticità tecniche e operative del rilievo in ambienti museali complessi, tra cui la conformità spaziale, la distribuzione luminosa, l'elevato numero e la variabilità materica degli oggetti, le difficoltà di accesso e l'impossibilità di movimentazione. Viene presentata una *pipeline* integrata che combina rilievo laser scanner, fotogrammetria *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) e fotogrammetria standard, applicata sia agli ambienti che agli oggetti singoli e aggregati. Il modello fotogrammetrico ottenuto, grazie all'accuratezza visiva e alla compatibilità con ambienti VR, costituisce una base interoperabile per esperienze condivise e arricchite da contributi multidisciplinari. I risultati dimostrano la capacità di rappresentare fedelmente la realtà fisica, rendendo il modello un supporto utile alla digitalizzazione, alla comprensione e alla valorizzazione immersiva del patrimonio culturale.

Parole chiave

Duplicato virtuale, Vittoriale degli Italiani, rilievo, modello, conoscenza.



La stanza delle Reliquie e la stanza del Lebbroso (foto di R. A. Bernardello).

“La nostra vita è un’opera magica, che sfugge al riflesso della ragione e tanto più è ricca quanto più se ne allontana, attuata per occulto e spesso contro l’ordine delle leggi apparenti.”

D’Annunzio 1916, p. 32

Introduzione

La disponibilità di interazione tra più tecnologie sembra offrire nuove opportunità economiche per l’industria culturale e accademiche legate alla divulgazione sempre più accurata e pervasiva dei beni culturali. Non è un caso che la messa a sistema di tecnologie quali rilievi automatizzati, reti dati 5G, visori di realtà mista, machine learning e modelli linguistici di grandi dimensioni per opere e musei specifici sia al centro di numerosi progetti di ricerca, di carattere nazionale ed europeo [1]. L’obiettivo condiviso risiede nel duplicare la realtà in uno o più modelli digitali, collegando i modelli o parti di essi – opportunamente semantizzati e classificati – con basi di dati esterne [Davis, Heravi 2021]. In questo modo è possibile predisporre una piattaforma in cui il duplicato digitale permette la compartecipazione di uno o più attori attraverso il soddisfacimento degli interessi di utilizzo economico, di conservazione, di studio e divulgazione del bene culturale [Abergel *et al.* 2023; Apollonio, Gaiani, Bertacchi 2019; De Luca 2024; Fanini *et al.* 2021]. Il presente studio fa parte del progetto Connessioni Culturali che sperimenta un nuovo modello di fruizione del patrimonio culturale usando le tecnologie emergenti per superare i confini fisici dei musei, creando una connessione virtuale tra il Vittoriale degli Italiani e il museo MAXXI di Roma. Il progetto permette ai visitatori romani di esplorare in realtà virtuale due stanze della Prioria del Vittoriale, all’interno di un dedicato spazio al MAXXI, in connessione in tempo reale con ciò che avviene al Vittoriale. Tale spazio proto-fisico ospita alcuni elementi fortemente riconoscibili quali sedute, tavoli, statuaria di media dimensione riprodotti tramite prototipazione rapida in modo da aumentare il grado di interazione e immersività della soluzione, aggiungendo la componente tattile, una volta sovrapposto alla realtà virtuale.

Il lavoro qui introdotto mostra la fase di creazione di un duplicato digitale esatto di due stanze del Vittoriale: la Stanza del Lebbroso – di seguito Lebbroso – che ospita il celebre letto-bara, e la Stanza delle Reliquie – di seguito Reliquie – che contiene una collezione di oggetti, che celebrano l’idea di sacro, di varie dimensioni, provenienze e caratteristiche materiche [Bruno Guerri 2016; Terraroli 2013] (fig. 1). La visita consueta alla prioria del Vittoriale è strutturata attraverso un percorso circolare di attraversamento delle stanze, che inizia e termina con dal vestibolo della Prioria. L’esperienza museale di queste stanze, a differenza di molte altre, è contingentata ad uno spazio ristretto e da vincoli logistici.

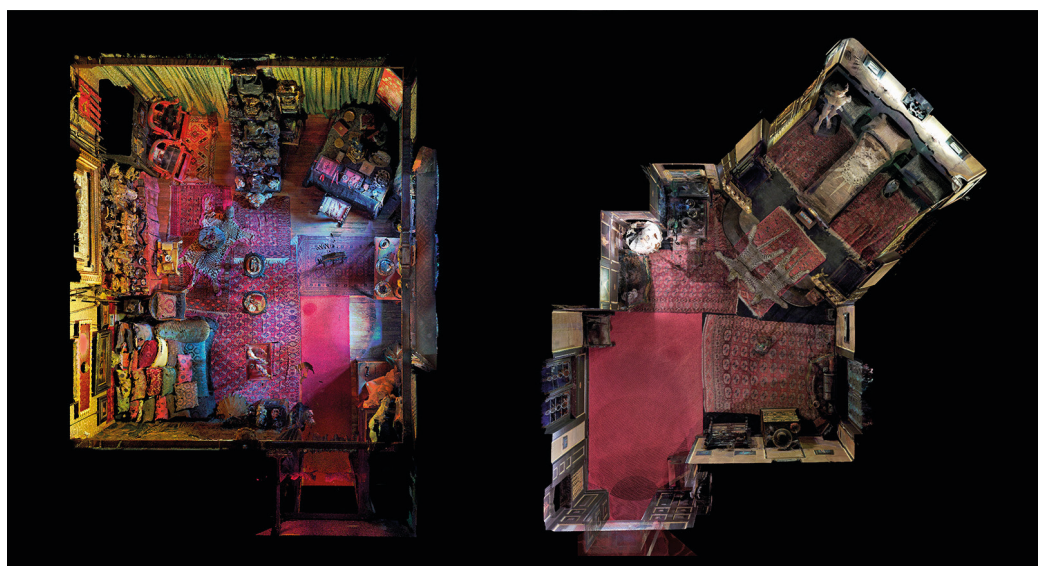


Fig. 1. Spaccati prospettici delle Sala delle Reliquie (a sinistra) e della Sala del Lebbroso (a destra) (elaborazione di R. A. Bernardello).

L'esperienza virtuale proposta intende trascendere tali limiti e offrire un'esperienza completa degli ambienti dannunziani prescelti, oltre a connettere visivamente il comportamento tra i due lontani gruppi di visitatori. Il progetto, nella parte di costruzione geometrica del duplicato digitale, investiga l'individuazione del processo di rilievo più adeguato rispetto ai requisiti di fruizione dell'ambiente virtuale, la costruzione di un modello fotogrammetrico a scala reale ed infine l'ottimizzazione per l'esperienza virtuale con visori HMD (*Head-Mounted Display*) di realtà mista [Apollonio et al. 2021]. Il presente studio pone attenzione alle criticità e ai risultati del processo di rilievo e costruzione del modello fotogrammetrico, base indispensabile per l'esperienza del visitatore.

Criticità

Il rilievo volto alla fedele rappresentazione virtuale degli ambienti del Vittoriale per l'uso precedentemente dichiarato ha presentato delle evidenti criticità che è necessario dichiarare e approfondire. Queste possono essere divise tra criticità di tipo tecnico e operativo, alcune legate alla rappresentazione finale delle stanze, che coinvolge gli obiettivi divulgativi del progetto in termini di conoscenza.

Dal punto di vista delle operazioni di rilievo, le stanze rilevate presentano numerose sfide che, messe a sistema secondo l'ordine presentato, generano un alto grado di complessità per le operazioni di rilievo:

- conformità spaziale, Reliquie presenta una pianta quadrata e finestrata su un lato, Leb-broso ha una pianta irregolare con una parte rialzata di 30 cm preceduta da un ambiente rettangolare più ampio e finestrato;
- condizioni di illuminamento prodotte da fonti puntuali molto luminose, quali abat-jour e lampadari originali con lampade a incandescenza, oppure da vetrate policrome, tra cui la raffigurazione di Santa Cecilia all'organo realizzata da Pietro Chiesa su disegno di Guido Cadorin presente nelle Reliquie;
- numero di oggetti, come nota caratteristica del Vittoriale, ogni ambiente presenta un numero ed eclettico insieme di oggetti, tra cui opere artistiche – piccoli altari, quadri, sculture di varie dimensioni – componenti di arredo – vasi, sedute, terminali di illuminazione, tavoli intarsiati – decorazioni architettoniche – boiserie, cornici, rivestimenti parietali, tappeti – e oggettistica di piccola-media dimensione propriamente poggiata su mobili e tavolini;
- variabilità dei materiali, ogni oggetto presenta materiali differenti, tra cui legni di diverse essenze e finiture, porcellane, vetri, tele e tessuti dipinti. A ogni materiale corrisponde una specifica luminanza, rendendo ogni superficie avente coefficienti e angoli di riflessione molto diversi (fig. 2);
- accessibilità dello spazio, elementi architettonici e oggetti possono essere avvicinati con gradi di complessità crescenti, creando spazi per le operazioni di ripresa ristretti o a geometria complessa; amovibilità degli oggetti, la conservazione della configurazione originale degli spazi da parte della gestione del Vittoriale non consente la movimentazione degli oggetti, tra cui dei tappeti con pelliccia e cranio di leopardo posti a pavimento, tavolini con propria oggettistica ecc.

L'obiettivo di creare un duplicato digitale quale modello rappresentativo finale impone al rilievo alcuni requisiti che si pongono quali criticità nella costruzione di un processo di digitalizzazione delle stanze. A riguardo è necessario segnalare alcuni aspetti che si ritengono importanti:



Fig. 2. Problemi di restituzione dei materiali vitrei (a sinistra) e dei materiali lignei con basso illuminamento (a destra) (elaborazione di OneMore).

- completezza del duplicato digitale, in cui esso rappresenta visivamente l'ambiente anche nelle aree non accessibili all'utente, tra cui le ante dipinte ai lati del letto-bara che ospitano un vetro policromo con composizione stellare o i volumi negli scomparti inferiori delle scaffalature a muro;
- rispondenza dell'ambiente virtuale alle condizioni di illuminamento del visitatore, che sono presentate spesso da finestre oscurate, e che potrebbero non corrispondere a quelle originali delle stanze;
- relazione tra gli oggetti, che nella realtà si presentano come aggregazioni di oggetti quali vasi, libri, fotografie con il loro supporto quali mobili e scaffalature per cui visivamente si comportano come oggetti unitari, diversamente da come dovrebbero essere intesi come elementi singoli che il visitatore virtuale può afferrare;
- capacità di divulgazione della conoscenza non grafica, rappresentata dalla abilità di identificare i singoli oggetti all'interno delle aggregazioni, quali dipinti, opere d'arte, singoli volumi che possano creare una narrazione nello spazio virtuale, o siano sensibili alla capacità degli utenti di soddisfare una richiesta di informazioni a riguardo attraverso la relazione con sistemi di Intelligenza Artificiale.

La pipeline di rilievo

Il rilievo degli ambienti scelti del vittoriale ha visto la necessità di risolvere le criticità precedentemente esplicitate attraverso l'uso di strumenti diversificati e metodologie di acquisizione specifiche per gli oggetti e gli aggregati di oggetti.

La prima operazione volta alla virtualizzazione degli ambienti è stata l'acquisizione degli spazi fisici delle sale. Lo scopo di questa prima attività è quello di ricavare la configurazione geometrica dello spazio con le sue esatte dimensioni per poter ricostruire gli ambienti per la costruzione dello spazio proto-fisico del MAXXI, per determinare la geometria degli elementi adiacenti al soffitto, la posizione degli oggetti fissi, come scaffali, ripiani statue, e degli oggetti più piccoli e mobili.

A questo scopo è stato impiegato un laser scanner statico (*Faro Focus M70*). Durante la fase di acquisizione sono state eseguite scansioni ad altezze differenti e planimetricamente distribuite, garantendo la copertura di tutte le zone e una corretta acquisizione degli elementi sia a soffitto, ad esempio in Reliquie il vessillo in seta rossa della reggenza italiana del Carnaro con i tiranti in corda e il ciclo di statue sopra il cornicione, sia a terra, ad esempio i tappeti trofeo di pelliccia di animale sotto i tavolini. Il laser ha un intervallo di errore macchina pari a ± 3 mm, garantendo quindi una acquisizione integrabile con la fotogrammetria e le precisioni

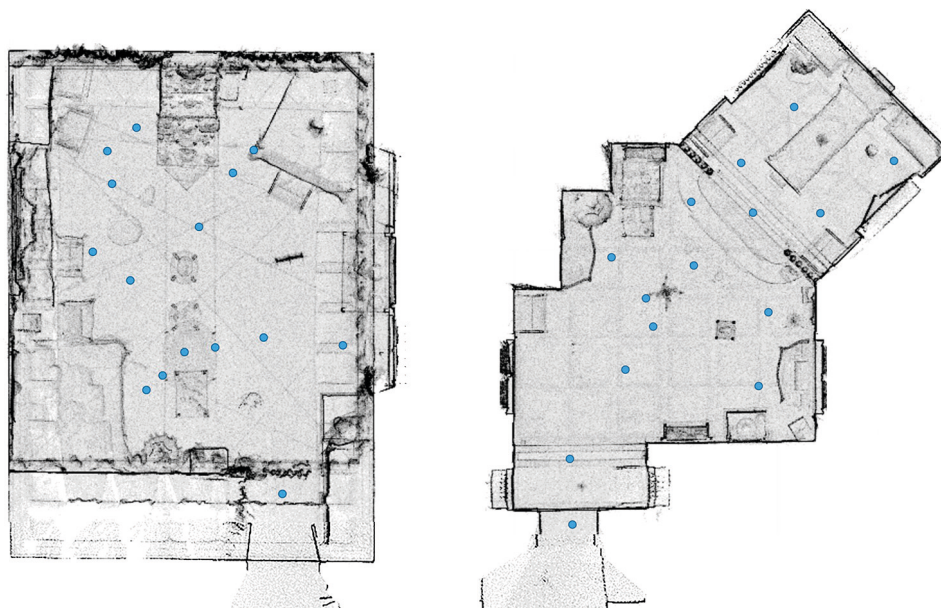


Fig. 3. Posizione delle scansioni laser all'interno delle due stanze (elaborazione di R. A. Bernardello).

necessarie per la virtualizzazione dell'ambiente. Le scansioni sono state effettuate con una risoluzione di 12.272 mm/10 m, per le Reliquie sono state effettuate 15 scansioni con una distribuzione planimetrica media di 1/2.7 m² e volumetrica 1/12 m³ e per il Lebbroso 18 scansioni distribuzione planimetrica di 1/1.7 m² e volumetrica 1/7.83 m³ (fig. 3).

La seconda azione di rilievo è stata rivolta ai singoli oggetti ed è stata sviluppata con due tecniche differenti di fotogrammetria: mediante uno SLAM fotogrammetrico (*xvsSLAM3D Scanner Stonex*) e con fotogrammetria standard (usando una *Reflex Nikon Z7II*). I dati risultanti dello SLAM fotogrammetrico sono di due tipi: le singole foto acquisite in continuo dalla traiettoria dell'operatore con fotogrammi a 25 fps, e la mesh ottenuta dal processamento automatico con *texture* applicata. I dati dal rilievo con *reflex* sono invece singole foto che vanno poi processate su *software* specifici per l'ottenimento della *mesh* di *output*.

L'approccio all'acquisizione è differente tra i due strumenti considerando quattro caratteristiche: 1. la completa copertura dell'oggetto rilevato; 2. la qualità della *texture* finale per accuratezza del dato colore e del dato geometrico; 3. la possibilità di integrare localmente l'*output* post-processato con il laser scanner; 4. la possibilità di migliorare la *mesh* e il dato con l'integrazione dei dati degli altri rilievi.

Per lo SLAM è stato necessario un gruppo di quattro operatori che hanno acquisito in continuo il singolo oggetto, un operatore atto a controllare la copertura totale dell'oggetto, due operatori a garantire il setting di luce corretto sulle aree temporaneamente oggetto di indagine, e un operatore per sostenere il *controller* per la verifica in tempo reale della mesh creata, e possibili errori tra acquisizione in continuo e l'esposizione. Il rilievo con *reflex* è stato fatto da un singolo operatore per l'80% delle immagini su cavalletto, con lunghezza focale di 24 mm, apertura focale di f/9 e tempi di esposizione minimi di 1.2 sec, ISO-5000, queste impostazioni sono state superate in alcuni luoghi per garantire la completa copertura degli oggetti ove la macchina fotografica non poteva essere stabilizzata, ad esempio l'angolo del mobilio a destra della stanza del Lebbroso o il retro delle teste delle statue costituenti il Buddha.

Lo SLAM ha prodotto dei risultati integrabili nell'esperienza virtuale quando gli oggetti risultavano con pochi dettagli geometrici, una configurazione omogenea e poche zone d'ombra. In generale la *texture* risultava spesso sfocata e poco attinente al reale a causa delle luci artificiali necessarie a garantire la messa a fuoco, la *mesh* ottenuta dal processamento automatico è stata esclusa per la poca possibilità di modifica e di intervento in una seconda iterazione. Lo strumento è stato fondamentale però per l'ottenimento delle geometrie dello spazio proto-fisico, in integrazione con il laser soprattutto nelle zone in cui questo restituisce zone non rilevate. La *mesh* da fotogrammetria standard, ha impiegato tempi molto più lunghi di processamento, ma ha garantito una alta qualità di integrazione con il laser scanner e la precisione del dimensionamento dei risultati molto più elevata, prendendo ad esempio la Piramide degli Idoli delle Reliquie si ha la copertura fotografica totale di 1 foto ogni 1.15 dm² (fig. 4).



Fig. 4. Complessità del soffitto nella stanza delle Reliquie (elaborazione di R. A. Bernardello).

In termini comparativi, è stato possibile condurre un'analisi sistematica dei modelli generati con le diverse tecnologie. I modelli derivati dalla fotogrammetria statica si sono dimostrati maggiormente adatti alla restituzione di oggetti complessi e dettagliati, con *texture* ad alta fedeltà cromatica e geometrie ottimizzabili per la realtà virtuale. La qualità delle normali, la precisione nelle aree d'ombra e la pulizia dei bordi risultano superiori, rendendoli ideali per impieghi museali e applicazioni narrative. Al contrario, i modelli da SLAM hanno mostrato buone performance su oggetti a bassa variabilità materica, ma carenze in termini di nitidezza delle *texture* e risoluzione topologica (fig. 5). Tali elementi li rendono preferibili in contesti in cui la leggerezza del modello e la rapidità di acquisizione costituiscono un valore prioritario. I modelli da laser scanner statico, infine, si sono confermati fondamentali per la calibrazione metrica dell'intero spazio e per l'allineamento delle nuvole, fungendo da riferimento assoluto per tutte le fasi successive. La possibilità di sovrapporre i diversi modelli e valutarne gli scarti ha permesso inoltre di quantificare la perdita o il mantenimento di informazioni a seconda dello strumento e della configurazione scelta.

Considerazioni finali

Il presente lavoro illustra le criticità e la conseguente *pipeline* di lavoro per la produzione di un modello fotogrammetrico di alcune stanze del Vittoriale degli Italiani, al fine di creare un duplicato digitale immersivo atto a supportare una piattaforma collaborativa di scambio di informazioni tra utenti per favorire la promozione turistica del bene culturale (fig. 6).

La relazione tra digitalizzazione e patrimonio culturale occupa da sempre la disciplina del disegno. In questo senso va discusso il significato e le caratteristiche che il termine modello in questo caso assume. Il termine, nel suo senso più ampio corrisponde ad una descrizione idealizzata e semplificata di un sistema, da usare quale base per la sua comprensione [Börner et al. 2012]. Tale assunto parte dal fatto che la ricerca scientifica non riesce a controllare una parte di universo senza opportune semplificazioni che ne permettano lo studio [Rosenblueth, Wiener 1945]. In questo senso i modelli fotogrammetrici evitano la semplificazione della realtà, offrendo al contrario una fedeltà visiva estrema, veicolata dall'uso di *texture* accoppiato a geometrie poco accurate. Nella proposta di descrizione di Tomás Maldonado, essi infatti incorporano, rispetto ad altri modelli per l'architettura la capacità emulativa, tralasciando quella simulativa e ogni formalizzazione matematica [Maldonado 1993]. Tale capacità emulativa, nel campo delle realtà miste immersive diventa il viatico affinché il modello risulti utile, offrendo all'utente la necessaria accuratezza grafica. Ciò che va compreso è che all'in-



Fig. 5. Problema della qualità nella texture da campionamento tramite SLAM (elaborazione di M. Monego).



Fig. 6. Conclusione del processo con integrazione ottimizzata tra più rilievi (elaborazione di OneMore).

terno di un flusso di lavoro più ampio, il modello fotogrammetrico con la massima accuratezza è la rappresentazione della parte di mondo, che è anche la parte di interesse per l'indagine scientifica umanistica del bene culturale [Frigg, Hartmann 2024].

Il modello fotogrammetrico generato, grazie alla sua accuratezza visiva e alla fedeltà geometrica, rappresenta una base solida per la costruzione di una piattaforma collaborativa destinata alla promozione e alla fruizione condivisa del patrimonio culturale. L'elevata qualità delle *texture* consente il riconoscimento puntuale degli oggetti anche da parte di utenti non esperti, facilitando la comunicazione tra soggetti con ruoli e competenze diverse. Inoltre, la struttura semantizzabile del modello è la base per l'integrazione di metadati descrittivi, schede informative, narrazioni testuali o vocali, al fine di abilitare una fruizione interattiva e personalizzabile. L'interoperabilità tecnica, garantita dall'esportazione in formati aperti compatibili con motori grafici e ambienti collaborativi consente aggiornamenti dinamici e l'inserimento del modello in flussi di lavoro interdisciplinari. Infine, la natura digitale del duplicato favorisce la co-presenza remota, permettendo a più utenti di esplorare simultaneamente l'ambiente virtuale, condividendo osservazioni e contenuti in tempo reale, e costruendo un'esperienza partecipata del bene culturale.

Si tratta quindi di inquadrare il presente lavoro all'interno di un più ampio sforzo scientifico in cui il modello fotogrammetrico rappresenta il *common-ground* per simulazioni storiche e storico artistiche, che potrebbero sfociare in opportune narrative atte ad ampliare la percezione culturale dell'opera d'arte o del contesto in cui interviene.

Ringraziamenti

Lo studio qui presentato rientra tra le attività del progetto Connessioni Culturali finanziato dal Ministero delle Imprese e del *Made in Italy*, in cui sono coinvolte le organizzazioni che ringraziamo Fondazione Il Vittoriale degli Italiani, MAXXI Museo nazionale delle arti del XXI secolo, One More Pictures, TIM Enterprise, Lynx International, SMACT Competence Center, Move2AI e Rai Cinema. Ringraziamo inoltre i partner scientifici Michele Monego, Massimo Fabris e Andrea Menin.

Crediti

Andrea Giordano è autore del capitolo *Introduzione*, Paolo Borin è autore dei capitoli *Criticità* e *Considerazioni finali*, Rachele A. Bernardello è autrice del capitolo *La pipeline di rilievo*.

Nota

[1] European Commission, *The Cultural Heritage Cloud*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/social-sciences-and-humanities/cultural-heritage-and-cultural-and-creative-industries-ccis/cultural-heritage-cloud_en.

Riferimenti bibliografici

Abergel, V., Manuel, A., Pamart, A., Cao, I., De Luca, L. (2023). Aioli: A reality-based 3D annotation cloud platform for the collaborative documentation of cultural heritage artefacts. In *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 30, e00285. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00285>.

Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. In *Remote Sensing*, 13(3), pp. 1-39. <https://doi.org/10.3390/rs13030486>.

Apollonio, F. I., Gaiani, M., Bertacchi, S. (2019). Managing cultural heritage with integrated services platform. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Proceedings of the 2nd International Conference of Geomatics and Restoration, Milano, 8-10 maggio 2019. XLII-2/W11, pp. 91-98. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-91-2019>.

Börner, K., Boyack, K. W., Milojević, S., Morris, S. (2012). An Introduction to Modeling Science: Basic Model Types, Key Definitions, and a General Framework for the Comparison of Process Models. In A. Scharnhorst, K. Börner, P. Van Den Besselaar (Eds.), *Models of Science Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 3-22. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23068-4_1.

Bruno Guerri, G. (2016). *Il Vittoriale degli Italiani*. Milano: Silvana Editore.

D'Annunzio, G. (1916). *La Leda senza cigno*. Tomo Primo. Milano: Fratelli Treves.

Davis, E., Heravi, B. (2021). Linked Data and Cultural Heritage: A Systematic Review of Participation, Collaboration, and Motivation. In *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 14(2), pp. 21:1-21:18. <https://doi.org/10.1145/3429458>.

De Luca, L. (2024). A digital ecosystem for the multidisciplinary study of Notre-Dame de Paris. In *Journal of Cultural Heritage*, 65, pp. 206-209. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.011>.

Fanini, B., Ferdani, D., Demetrescu, E., Berto, S., D'Annibale, E. (2021). ATON: An Open-Source Framework for Creating Immersive, Collaborative and Liquid Web-Apps for Cultural Heritage. In *Applied Sciences*, 11(22), 11062. <https://doi.org/10.3390/app112211062>.

Frigg, R., Hartmann, S. (2024). Models in Science. In E. N. Zalta, U. Nodelman (Eds.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2024). Stanford, CA: Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2024/entries/models-science/>.

Maldonado, T. (1993). *Reale e virtuale*. Milano: Feltrinelli.

Rosenblueth, A., Wiener, N. (1945). The Role of Models in Science. In *Philosophy of Science*, 12(4), pp. 316-321. <https://doi.org/10.1086/286874>.

Terraroli, V. (2013). *Il Vittoriale. Percorsi simbolici e collezioni d'arte di Gabriele D'annunzio*. Losanna: Skira.

Autori

Rachele A. Bernardello, Università degli Studi di Padova, rachele.bernardello@unipd.it

Paolo Borin, Università degli Studi di Brescia, paolo.borin@unibs.it

Andrea Giordano, Università degli Studi di Padova, andrea.giordano@unipd.it

Per citare questo capitolo: Rachele A. Bernardello, Paolo Borin, Andrea Giordano (2025). Duplicato virtuale immersivo. Rilievo e strategie per gli ambienti del Vittoriale degli Italiani. In L. Carlevaris et al. (a cura di), *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 261-276. DOI: 10.3280/oa-1430-c771.

Immersive Digital Twin. Strategies for the Survey for some Rooms for the Vittoriale degli Italiani

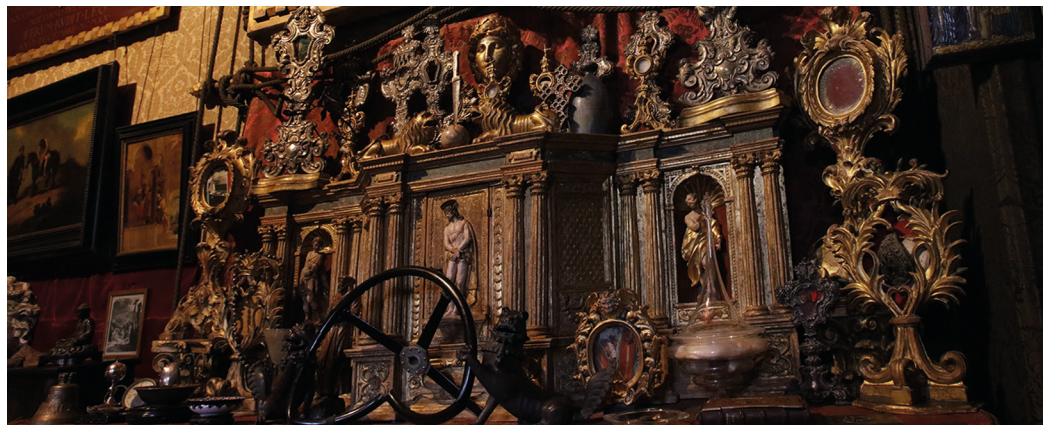
Rachele A. Bernardello
Paolo Borin
Andrea Giordano

Abstract

The study describes the creation of an immersive digital twin of two rooms in the Vittoriale degli Italiani –the Stanza del Lebbroso and the Stanza delle Reliquie– with the aim of supporting a collaborative platform for the promotion of cultural heritage. The investigation addresses the main technical and operational challenges of surveying complex museum environments, including spatial constraints, lighting distribution, the high number and material variability of objects, limited accessibility, and the impossibility of moving items. An integrated pipeline is presented, combining laser scanning, SLAM photogrammetry (Simultaneous Localization and Mapping), and standard photogrammetry, applied to both the environments and individual or grouped objects. The resulting photogrammetric model, thanks to its visual accuracy and compatibility with VR environments, provides an interoperable foundation for shared experiences enriched by multidisciplinary contributions. The results demonstrate the ability to faithfully represent the physical reality, making the model a valuable tool for the digitization, understanding, and immersive enhancement of cultural heritage.

Keywords

Digital twin, Vittoriale degli Italiani, survey, model, knowledge.



The Reliquie Room
and the Lebbroso
Room (picture by R. A.
Bernardello).

"La nostra vita è un'opera magica, che sfugge al riflesso della ragione e tanto più è ricca quanto più se ne allontana, attuata per occulto e spesso contro l'ordine delle leggi apparenti."

D'Annunzio 1916, p. 32

Introduction

The availability of interaction between multiple technologies seems to offer new economic opportunities for the cultural industry and academic advancements related to the increasingly accurate and pervasive dissemination of cultural heritage. It is no coincidence that the integration of technologies such as automated surveys, 5G data networks, mixed reality headsets, machine learning, and large language models for specific artworks and museums is at the core of numerous national and European research projects [European Commission 2024] [1].

The shared objective is to duplicate reality into one or more digital models, linking these models or parts of them –appropriately semantically structured and classified– with external databases [Davis, Heravi 2021]. This approach allows for the creation of a platform where the digital twin enables multiple stakeholders to participate, addressing economic use, conservation, study, and dissemination of cultural heritage [Abergel et al. 2023; Apollonio, Gaiani, Bertacchi 2019; De Luca 2024; Fanini et al. 2021].

This study is part of the Connessioni Culturali project, which experiments with a new model of cultural heritage access using emerging technologies to overcome the physical boundaries of museums, creating a virtual connection between the Vittoriale degli Italiani and the MAXXI Museum in Rome. The project enables visitors in Rome to explore two rooms of the Prioria of the Vittoriale in virtual reality within a dedicated space at MAXXI, in real-time connection with events happening at the Vittoriale. This proto-physical space includes strongly recognizable elements such as chairs, tables, and medium-sized statues, reproduced through rapid prototyping to enhance interaction and immersion. By adding a tactile component, the virtual reality experience is enriched when overlaid with physical objects.

This study presents the process of creating an accurate digital twin of two rooms in the Vittoriale: the Stanza del Lebbroso (hereafter Lebbroso) –which houses the famous coffin-bed– and the Stanza delle Reliquie (hereafter Reliquie) –containing a collection of objects celebrating the sacred, varying in size, origin, and material composition [Bruno Guerri 2016; Terraroli 2013] (fig. 1). The conventional visit to the Prioria of the Vittoriale follows a circular path through the rooms, beginning and ending at the vestibule of the Prioria. Unlike other areas, the museum experience in these rooms is limited by restricted space and logistical constraints. The proposed

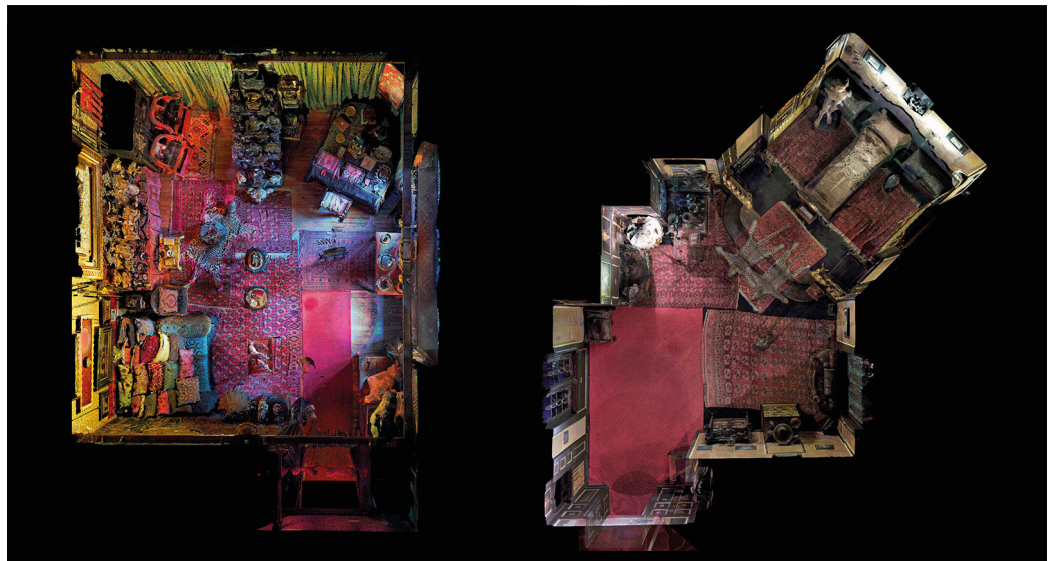


Fig. 1. Perspective cross-sections of the two rooms studied (processing of R. A. Bernardello).

virtual experience aims to transcend these limitations, offering a comprehensive experience of these selected D'Annunzian environments, while also visually connecting the behaviors of two distant groups of visitors. The project, in its phase of geometric construction of the digital twin, investigates: i. the most suitable survey method for virtual environment access, ii. the creation of a real-scale photogrammetric model; iii. the optimization of the model for virtual experiences using HMD (Head-Mounted Display) mixed reality headsets [Apollonio et al. 2021]. This study focuses on the challenges and outcomes of the survey and photogrammetric modeling process, which form the essential foundation for the visitor experience.

Challenges

The survey aimed at the faithful virtual representation of the Vittoriale rooms for the stated use presents several challenges that need to be addressed. These challenges can be divided into technical and operational difficulties, some related to the final representation of the rooms, and others to the educational objectives of the project in terms of knowledge dissemination.

The surveyed rooms present numerous challenges, which, when combined, generate a high level of complexity for survey operations:

- Spatial Configuration: Reliquie has a square layout with a windowed side, while Lebbroso has an irregular layout with a raised section (30 cm above the floor) preceded by a larger rectangular windowed space.
- Lighting Conditions: Lighting is provided by intense point light sources such as lamps and chandeliers with incandescent bulbs, or stained glass windows, including the depiction of Saint Cecilia at the Organ created by Pietro Chiesa based on a design by Guido Cadorin, located in Reliquie.
- High Object Density: As a characteristic of the Vittoriale, each environment contains a large and eclectic collection of objects, including: artworks: small altars, paintings, sculptures of various sizes; furniture: vases, chairs, lighting fixtures, inlaid tables; architectural decorations: boiserie, frames, wall coverings, carpets; small and medium-sized objects, carefully placed on furniture and tables.
- Material Variability: Each object consists of different materials, including various wood essences and finishes, porcelain, glass, paintings on canvas, and textiles. Each material has a different luminance, affecting reflection coefficients and angles (fig. 2).
- Space Accessibility: Architectural elements and objects have varying degrees of accessibility, creating constraints for surveying and data acquisition.
- Object Immovability: The Vittoriale management preserves the original arrangement of objects, preventing the movement of elements such as fur rugs with leopard skulls, tables with delicate decorations etc.

Creating a digital twin as the final representative model imposes several requirements on the survey process, which pose additional digitization challenges:

- Completeness of the digital twin: The model must visually represent even non-accessible areas, such as the painted panels beside the coffin-bed, featuring a stained glass with a starry composition, or compartments in the lower sections of wall-mounted shelves.



Fig. 2. Issues in surveying and rendering glass materials (on the left) and wooden materials with low illumination (on the right) (processing of OneMore).

- Virtual Environment's Correspondence to Visitor Lighting Conditions: The rooms are often displayed to visitors with dimmed or obscured windows, which may not reflect the original lighting conditions.
- Object Relationships: In reality, objects appear as aggregations, such as vases, books, and photographs placed together on furniture. However, in virtual reality, these elements should be understood as separate interactive objects.
- Non-Graphical Knowledge Transmission: The ability to identify individual objects within groupings, such as paintings, artworks, or books, should support storytelling in virtual space and allow users to request information through AI systems.

Survey Pipeline

The survey of the chosen environments of the Vittoriale required resolving previously explained critical issues using diverse tools and specific acquisition methodologies for objects and object aggregates.

The first operation aimed at virtualizing the environment was the acquisition of the physical spaces of the rooms. The purpose of this initial activity is to obtain the geometric configuration of space with its exact dimensions to reconstruct the environments for building the proto-physical space of MAXXI, to determine the geometry of elements adjacent to the ceiling, the position of fixed objects such as shelves, statues, and smaller movable objects.

For this purpose, a static laser scanner (*Faro Focus M70*) was used. During the acquisition phase, scans were performed at different heights and distributed planimetrically, ensuring coverage of all areas and correct acquisition of elements both on the ceiling, for example in Reliquie the red silk banner of the Italian regency of Carnaro with rope ties and the cycle of statues above the cornice, and on the floor, such as the animal fur trophy rugs under the small tables. The laser has a machine error range of ± 3 mm, thus ensuring acquisition that can be integrated with photogrammetry and the necessary precision for virtualizing the environment. The scans were carried out with a resolution of 12.272 mm/10 m; for Reliquie, 15 scans were performed with an average planimetric distribution of 1/2.7 sqm and volumetric 1/12 m³, and for Lebbroso, 18 scans with a planimetric distribution of 1/1.7 sqm and volumetric 1/7.83 m³ (fig. 3). The second survey action was directed at individual objects and was developed using two different photogrammetry techniques: using a photogrammetric SLAM (*xvsSLAM3D Scanner Stonex*) and standard photogrammetry (using a *Nikon Z7II Reflex*). The resulting data from the photogrammetric

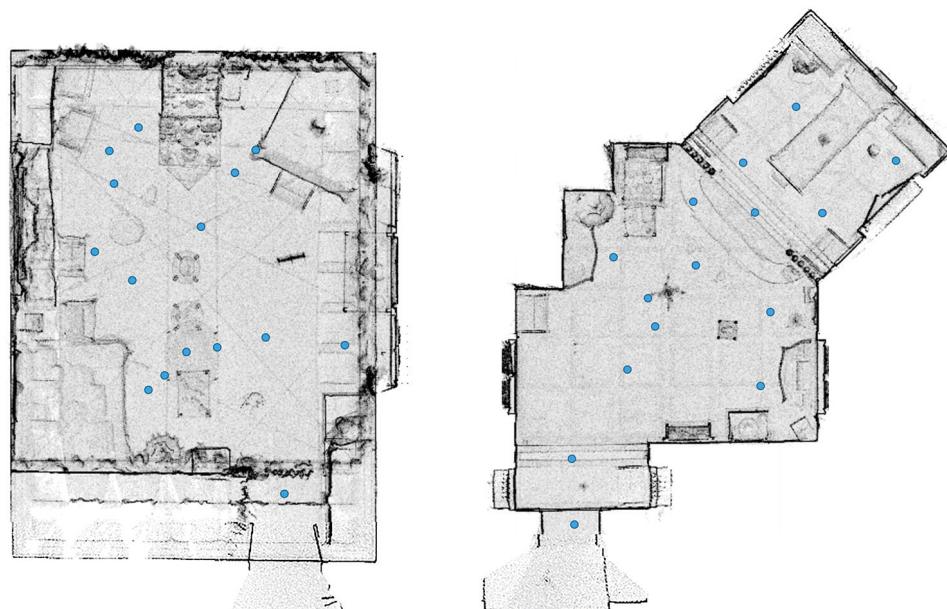


Fig. 3. Position of laser scans within the two rooms (processing of Rachele A. Bernardello).

SLAM are of two types: individual photos acquired continuously from the operator's trajectory with frames at 25 fps, and the mesh obtained from automatic processing with applied texture. The data from the reflex survey, on the other hand, are individual photos that are then processed on specific software to obtain the output mesh.

The acquisition approach differs between the two instruments considering four characteristics: 1. complete coverage of the surveyed object; 2. quality of the final texture for accuracy of color and geometric data; 3. possibility of locally integrating the post-processed output with the laser scanner; 4. possibility of improving the mesh and data by integrating data from other surveys. For the SLAM procedure, a group of four operators was necessary to continuously acquire the single object, one operator to control the total coverage of the object, two operators to ensure the correct light setting on the areas temporarily under investigation, and one operator to support the controller for real-time verification of the created mesh, and possible errors between continuous acquisition and exposure. The reflex survey was done by a single operator for 80% of the images on a tripod, with a focal length of 24 mm, focal aperture of f/9 and minimum exposure times of 1.2 sec, ISO-5000; these settings were exceeded in some places to ensure complete coverage of objects where the camera could not be stabilized, for example the corner of the furniture to the right of the Lebbroso room or the back of the heads of the statues constituting the Buddha.

The SLAM produced results that could be integrated into the virtual experience when the objects had few geometric details, a homogeneous configuration, and few shadow areas. In general, the texture often appeared blurred and not very relevant to reality due to the artificial lights necessary to ensure focus; the mesh obtained from automatic processing was excluded due to the limited possibility of modification and intervention in a second iteration. However, the instrument was fundamental for obtaining the geometries of the proto-physical space, integrating with the laser especially in areas where it returns unsurveyed zones. The mesh from standard photogrammetry took much longer processing times but ensured high quality integration with the laser scanner and much higher precision in dimensioning the results, taking for example the Pyramid of Idols of the Reliquie, which has a total photographic coverage of 1 photo every 1.15 sq dm (fig. 4).

In comparative terms, it was possible to conduct a systematic analysis of the models generated using different technologies. The models derived from static photogrammetry proved to be more suitable for the reconstruction of complex and detailed objects, offering high-fidelity textures and geometries optimized for virtual reality. The quality of surface normals, accuracy in shadowed areas, and edge cleanliness were superior, making them ideal for museum applications and narrative experiences. In contrast, SLAM-based models performed well on objects with low material variability but showed limitations in texture sharpness and



Fig. 4. Complexity of the ceiling in the Reliquie Room (processing of R. A. Bernardello).

topological resolution (fig. 5). These characteristics make them preferable in contexts where model lightness and rapid acquisition are of primary importance.

Finally, the static laser scanner models were confirmed to be essential for the metric calibration of the entire space and for aligning point clouds, serving as an absolute reference throughout all subsequent phases. The ability to superimpose the different models and evaluate their deviations also made it possible to quantify the loss or retention of information depending on the tool and configuration used.

Summary and conclusions

This work illustrates the critical issues and the consequent work pipeline for the production of a photogrammetric model of two rooms in the Vittoriale degli Italiani, with the aim of creating an immersive digital twin to support a collaborative platform for information exchange among users to promote tourism of the cultural heritage site (fig. 6).

The relationship between digitization and cultural heritage has always been a concern of the discipline of drawing. In this sense, the meaning and characteristics that the term “model” assumes in this case must be discussed. The term, in its broadest sense, corresponds to an idealized and simplified description of a system, to be used as a basis for its understanding [Börner *et al.* 2012]. This assumption stems from the fact that scientific research cannot control a part of the universe without appropriate simplifications that allow its study [Rosenblueth, Wiener 1945]. In this sense, photogrammetric models avoid simplifying reality, offering instead extreme visual fidelity, conveyed by the use of textures coupled with low-accuracy geometries. In Tomás Maldonado’s proposed description, they incorporate, compared to other models for architecture, the emulative capacity, neglecting the simulative one and any mathematical formalization [Maldonado 1993]. This emulative capacity, in the field of immersive mixed realities, becomes the vehicle for the model to be useful, offering the user the necessary graphic accuracy. What needs to be understood is that within a broader workflow, the photogrammetric model with maximum accuracy is the representation of the part of the world that is also the part of interest for the humanistic scientific investigation of cultural heritage [Frigg, Hartmann 2024].

The photogrammetric model generated, thanks to its visual accuracy and geometric fidelity, serves as a solid foundation for the development of a collaborative platform aimed at the promotion and shared enjoyment of cultural heritage. The high-quality textures allow for the precise recognition of objects even by non-expert users, facilitating



Fig. 5. Quality issue in texture sampling via SLAM (processing of M. Monego).



Fig. 6. Conclusion of the process with optimized integration between multiple surveys (processing of OneMore).

communication among individuals with different roles and areas of expertise. Moreover, the model's semantic-ready structure provides the basis for integrating descriptive metadata, information sheets, and textual or audio narratives, enabling an interactive and customizable user experience. Technical interoperability, ensured by exporting the model in open formats compatible with graphic engines and collaborative environments, allows for dynamic updates and integration into interdisciplinary workflows. Finally, the digital nature of the twin supports remote co-presence, enabling multiple users to simultaneously explore the virtual environment, share observations and content in real time, and build a collective experience of the cultural asset.

It is therefore a matter of framing the present work within a broader scientific effort in which the photogrammetric model represents the common ground for historical and art-historical simulations, which could lead to appropriate narratives aimed at expanding the cultural perception of the artwork or the context in which it intervenes.

Acknowledgments

The study presented here is part of the activities of the Cultural Connections project, funded by the Ministry of Enterprises and Made in Italy, involving the organizations we thank: Fondazione Il Vittoriale degli Italiani, MAXXI Museo nazionale delle arti del XXI secolo, One More Pictures, TIM Enterprise, Lynx International, SMACT Competence Center, Move2AI, and Rai Cinema. We also thank our scientific partners Michele Monego, Massimo Fabris, and Andrea Menin.

Credits

Andrea Giordano is the author of the chapter *Introduction*, Paolo Borin is the author of the chapters *Challenges* and *Summary and Conclusions*, Rachele A. Bernardello is the author of the chapter *Survey Pipeline*.

Note

[1] European Commission, *The Cultural Heritage Cloud*. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/social-sciences-and-humanities/cultural-heritage-and-cultural-and-creative-industries-ccis/cultural-heritage-cloud_en.

Reference List

- Abergel, V., Manuel, A., Pamart, A., Cao, I., De Luca, L. (2023). Aioli: A reality-based 3D annotation cloud platform for the collaborative documentation of cultural heritage artefacts. In *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 30, e00285. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00285>.
- Apollonio, F. I., Fantini, F., Garagnani, S., Gaiani, M. (2021). A Photogrammetry-Based Workflow for the Accurate 3D Construction and Visualization of Museums Assets. In *Remote Sensing*, 13(3), pp. 1-39. <https://doi.org/10.3390/rs13030486>.
- Apollonio, F. I., Gaiani, M., Bertacchi, S. (2019). Managing cultural heritage with integrated services platform. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Proceedings of the 2nd International Conference of Geomatics and Restoration. Milano, May 8-10, 2019. XLII-2/W11, pp. 91-98. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-91-2019>.
- Börner, K., Boyack, K. W., Milojević, S., Morris, S. (2012). An Introduction to Modeling Science: Basic Model Types, Key Definitions, and a General Framework for the Comparison of Process Models. In A. Scharnhorst, K. Börner, P. Van Den Besselaar (Eds.). *Models of Science Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 3-22. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23068-4_1.
- Bruno Guerri, G. (2016). *Il Vittoriale degli Italiani*. Milano: Silvana Editore.
- D'Annunzio, G. (1916). *La Leda senza cigno*. Tomo Primo. Milano: Fratelli Treves.
- Davis, E., Heravi, B. (2021). Linked Data and Cultural Heritage: A Systematic Review of Participation, Collaboration, and Motivation. In *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 14(2), pp. 21:1-21:18. <https://doi.org/10.1145/3429458>.
- De Luca, L. (2024). A digital ecosystem for the multidisciplinary study of Notre-Dame de Paris. In *Journal of Cultural Heritage*, 65, pp. 206-209. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.09.011>.
- Fanini, B., Ferdani, D., Demetrescu, E., Berto, S., D'Annibale, E. (2021). ATON: An Open-Source Framework for Creating Immersive, Collaborative and Liquid Web-Apps for Cultural Heritage. In *Applied Sciences*, 11(22), 11062. <https://doi.org/10.3390/app112211062>.
- Frigg, R., Hartmann, S. (2024). Models in Science. In E. N. Zalta, U. Nodelman (Eds.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2024). Stanford, CA: Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2024/entries/models-science/>.
- Maldonado, T. (1993). *Reale e virtuale*. Milano: Feltrinelli.
- Rosenblueth, A., Wiener, N. (1945). The Role of Models in Science. In *Philosophy of Science*, 12(4), pp. 316-321. <https://doi.org/10.1086/286874>.
- Terraroli, V. (2013). *Il Vittoriale. Percorsi simbolici e collezioni d'arte di Gabriele D'annunzio*. Losanna: Skira.

Authors

Rachele A. Bernardello, University of Padova, rachele.bernardello@unipd.it
Paolo Borin, University of Brescia, paolo.borin@unibs.it
Andrea Giordano, University of Padova, andrea.giordano@unipd.it

To cite this chapter: Rachele A. Bernardello, Paolo Borin, Andrea Giordano (2025). *Immersive Digital Twin. Strategies for the Survey for some Rooms for the Vittoriale degli Italiani*. L. Carlevaris et al. (Eds.). *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 261-276. DOI: 10.3280/oa-1430-c771.