Condividere i dati 3D del patrimonio culturale: OpenHeritage3D.org

Filiberto Chiabrando[1], Beatrice Tanduo[1], Scott McAvoy[2]

[1] Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (Lab G4CH), Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli 39, 10125, Torino (TO) (filiberto.chiabrando; beatrice.tanduo)@polito.it

[2] Cultural Heritage Engineering Initiative (CHEI), Qualcomm Institute, University of California San Diego, smcavoy@ucsd.edu

Abstract. OpenHeritage3D.org è una piattaforma open-source per archiviare, pubblicare e condividere dati 3D del patrimonio culturale. Conserva dati grezzi e prodotti derivati, consentendo la visualizzazione online di grandi nuvole di punti. Formati aperti, DOI, metadati e paradati garantiscono tracciabilità e favoriscono il riuso scientifico, tecnico e divulgativo, sostenendo la conservazione digitale e l'accessibilità dei rilievi 3D per attività di ricerca, tutela, didattica e valorizzazione.

Parole chiave: patrimonio culturale; rilievo 3D; archivi digitali.

1 Introduzione

La documentazione 3D costituisce oggi una risorsa per conoscere e documentare la geometria dei beni culturali, supportare la valutazione del loro stato di conservazione e fornire basi informative per interventi successivi. Tecniche *image-based* (fotogrammetria terrestre e aerea da drone) e *range-based* (sensori LiDAR fissi e mobili) permettono di acquisire superfici e contesti complessi, producendo immagini, nuvole di punti e modelli 3D con diversi gradi di accuratezza e livelli di dettaglio. La crescente accessibilità di sensori e software amplia la comunità dei produttori, ma rende più eterogenee le procedure di acquisizione, elaborazione e controllo. Un modello visivamente convincente può quindi derivare da processi molto diversi, con implicazioni per la sua accuratezza, l'affidabilità metrica e le analisi quantitative che è possibile condurre a partire dai dati acquisiti.

La pubblicazione del solo prodotto finale risponde a esigenze di comunicazione, ma conserva soltanto una parte del patrimonio informativo del rilievo. Immagini originali, scansioni strutturate, coordinate dei punti di controllo e informazioni sul processo di elaborazione possono diventare difficili da reperire una volta concluso il progetto. La perdita di questi elementi limita la verifica dei risultati, l'integrazione con nuove campagne di rilievo e la possibilità di riprocessare le osservazioni mediante strumenti più evoluti. Il problema riguarda dunque non soltanto la conservazione dei file, ma anche la disponibilità delle informazioni necessarie a interpretarli e riutilizzarli.

OpenHeritage3D affronta questa criticità integrando la conservazione dei dati con la loro accessibilità attraverso il web. Il presente contributo esamina l'organizzazione dell'infrastruttura archivistica della piattaforma e i criteri adottati per documentare i rilievi 3D, con particolare attenzione al ruolo dei metadati e dei paradati [1, 2]. L'obiettivo è evidenziare come questi elementi possano favorire l'interpretazione, la verifica e il riuso scientifico e operativo dei dati nel tempo.

2 Una piattaforma per la pubblicazione di dati 3D

Il progetto OpenHeritage3D.org (OH3D) è una piattaforma open-source per l'archiviazione scientifica e la condivisione di dati 3D del patrimonio culturale, avviata nel 2019 e progettata in collaborazione con architetti, ingegneri, esperti di geomatica, archivisti digitali e specialisti nell'elaborazione e nella visualizzazione di dati 3D. Si tratta di un progetto congiunto sostenuto dalla University of California San Diego, da CyArk e dal Politecnico di Torino.

OH3D collabora con ricercatori, organizzazioni senza scopo di lucro, singoli professionisti ed enti pubblici che realizzano rilievi 3D di importanti siti del patrimonio culturale, offrendo anche a chi non dispone di infrastrutture dedicate la possibilità di conservarne e pubblicarne i dati. Nonostante la crescente diffusione delle tecnologie di rilievo 3D, la condivisione dei dati originali e dei prodotti intermedi rimane meno consolidata rispetto alla pubblicazione di modelli destinati prevalentemente alla visualizzazione. L'aumento delle capacità di elaborazione grafica dei computer, la disponibilità di potenti strumenti open-source per la visualizzazione e il miglioramento dei software di elaborazione hanno favorito il riuso di dati pregressi, a condizione che i file originali e la relativa documentazione fossero stati conservati.

OH3D consente attualmente la pubblicazione aperta, la diffusione, la visualizzazione e il riuso di oltre 500 dataset LiDAR e fotogrammetrici a scala architettonica. Questi dataset riguardano siti distribuiti in 36 Paesi, tra cui 47 siti iscritti nella Lista del Patrimonio Mondiale UNESCO, e provengono da quasi 400 soggetti privati, pubblici e accademici. La distribuzione geografica dei progetti può essere esplorata attraverso l'interfaccia cartografica della piattaforma, mentre la sezione dedicata ai dataset ne consente la consultazione attraverso un elenco e una funzione di ricerca (Fig. 1).

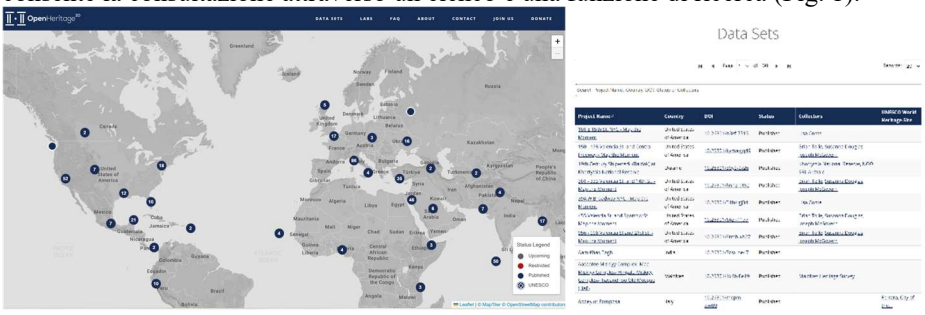

Fig. 1. Modalità di esplorazione dei dataset disponibili su OpenHeritage3D.org: interfaccia cartografica della landing page (sinistra); catalogo dei dataset con elenco tabellare e funzione di ricerca (destra).

La piattaforma adotta formati aperti e uno schema di metadati e paradati che tiene conto delle caratteristiche dei dati prodotti dalle diverse tecniche di acquisizione 3D. L'obiettivo è documentare la provenienza, le modalità di produzione e le caratteristiche tecniche dei dataset, favorendone l'interpretazione e il riutilizzo anche per finalità diverse da quelle originarie.

OH3D utilizza il software Potree, che consente la visualizzazione di nuvole di punti di grandi dimensioni mediante il caricamento progressivo dei dati e la gestione dei livelli di dettaglio [3]. I dataset sono organizzati in progetti che possono comprendere rilievi realizzati con tecniche differenti. L'archivio è stato sviluppato inizialmente per i dati provenienti da laser scanner terrestre (TLS) e aereo (ALS), conservati come nuvole di punti nei formati E57 e LAS/LAZ, ed è stato successivamente esteso ai dati da scansione mobile e ai dataset fotogrammetrici aerei e terrestri, per i quali possono essere conservate anche le immagini originali in formati come JPEG, TIFF e DNG.

Tutti i dataset devono essere resi disponibili con una licenza Creative Commons le cui condizioni di riutilizzo sono stabilite dal titolare dei dati. Per ogni progetto sottoposto a OH3D, il proponente fornisce le informazioni necessarie a completare la descrizione del dataset, mentre il Digital Object Identifier (DOI) viene assegnato dal gruppo di lavoro di OH3D. L'architettura generale della piattaforma e l'organizzazione dei metadati associati ai progetti e ai dataset sono illustrate nella Fig. 2, che sintetizza le principali componenti funzionali del sistema e le relazioni tra le informazioni archiviate.

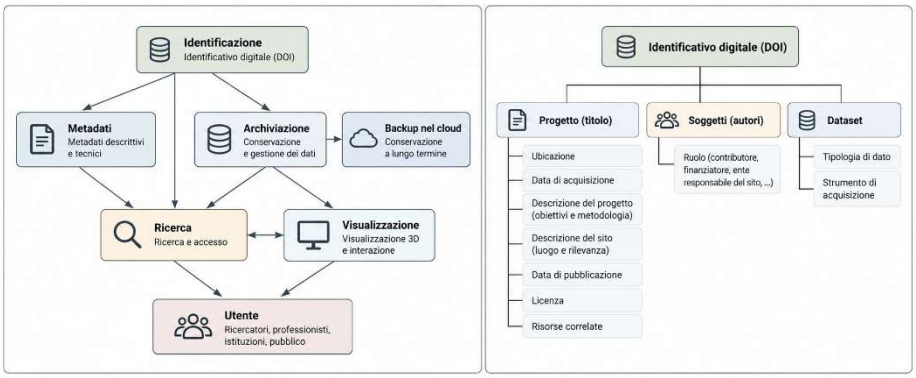

Fig. 2. Architettura funzionale della piattaforma OpenHeritage3D.org (sinistra) e organizzazione dei metadati associati ai progetti e ai dataset (destra). Rielaborazione grafica da McAvoy et al. (2023).

3 Metadati e paradati

Come ampiamente consolidato e noto in letteratura, I metadati [4] descrivono le risorse digitali e ne facilitano l'identificazione e la ricerca, mentre i paradati [5] documentano le procedure e le scelte attraverso cui esse sono state prodotte. Per un rilievo, conoscere la data, il sensore e il sistema di riferimento è necessario, ma può non bastare. Occorre comprendere come siano state registrate le scansioni, quali punti abbiano vincolato il

modello, quali filtraggi siano stati applicati e quali parti siano rimaste escluse. Queste informazioni permettono di interpretare tanto la geometria disponibile quanto le sue lacune e di valutarne l'affidabilità per successive applicazioni scientifiche.

In OpenHeritage3D, la documentazione associata ai dataset comprende informazioni descrittive relative ai progetti, ai soggetti coinvolti e alle risorse disponibili, insieme a parametri riguardanti le fasi di acquisizione ed elaborazione. In fase di conferimento vengono richiesti, in funzione delle tecniche utilizzate, elementi quali distanza di presa e GSD per la fotogrammetria, modello e impostazioni dello scanner, informazioni sui riferimenti topografici, software e relative versioni, operazioni di editing e indicatori degli errori. La documentazione può essere integrata con report di elaborazione, monografie dei punti e schemi delle posizioni strumentali, utili a ricostruire le procedure adottate e a interpretare eventuali limitazioni dei dati.

Le informazioni fornite dai proponenti sono attualmente inserite manualmente dai gestori della piattaforma. Lo schema dei metadati, sviluppato con riferimento al CIDOC-CRM e all'Europeana Data Model, è stato esteso per includere attributi specifici dei dataset spaziali 3D. Tale impostazione si inserisce nel quadro dei principi FAIR [6], orientati a favorire la reperibilità, l'accessibilità, l'interoperabilità e il riutilizzo dei dati. La Fig. 2 (destra) ne sintetizza l'organizzazione, evidenziando le relazioni tra progetti, soggetti coinvolti e dataset.

4 Innovazione e applicazioni interdisciplinari

Il contributo più significativo consiste nella possibilità di visualizzare e interrogare, mediante streaming e caricamento progressivo, dataset di nuvole di punti 3D contenenti miliardi di punti tramite un comune browser web, senza la necessità di software client dedicati o di autenticazione istituzionale. La rappresentazione ottimizzata per la consultazione online si affianca alla conservazione dei dati originali, disponibili per successive elaborazioni e analisi quantitative.

Prima della diffusione di piattaforme di questo tipo, le opzioni concrete per condividere grandi nuvole di punti del patrimonio culturale erano limitate al trasferimento su supporti fisici, a server FTP con accesso tramite credenziali o a piattaforme commerciali che potevano imporre limiti dimensionali e controlli di accesso proprietari. Storicamente, i dataset 3D del patrimonio culturale sono stati spesso pubblicati come oggetti isolati, privi di relazioni spaziali reciproche. All'interno della piattaforma il visualizzatore basato su CesiumJS [7] permette di collocare i dataset georiferiti all'interno di un contesto geografico comune, facilitando l'esplorazione dei siti e l'integrazione con altre informazioni territoriali. Le funzionalità di visualizzazione e interrogazione dei dati sono illustrate in Fig. 3 attraverso il caso studio di Salvation Mountain (California, USA), che mostra la scheda informativa del progetto e un esempio di misurazione geometrica e consultazione degli attributi della nuvola di punti.

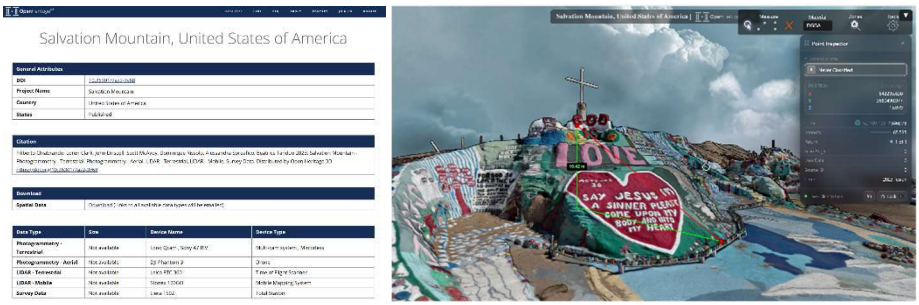

Fig. 3. Visualizzazione e interrogazione del dataset 3D di Salvation Mountain (California, USA) attraverso OpenHeritage3D.org: scheda informativa del progetto, con metadati e informazioni sui dati disponibili (sinistra); visualizzazione interattiva della nuvola di punti, con esempio di misurazione geometrica e interrogazione degli attributi mediante lo strumento Point Inspector (destra).

La disponibilità di dataset relativi a contesti differenti offre opportunità per studi comparativi di ambito architettonico e archeologico. In presenza di rilievi ripetuti sullo stesso sito, può inoltre costituire una base per analisi multitemporali e valutazioni di eventuali variazioni geometriche.

In questa prospettiva, il valore di OpenHeritage3D.org risiede anche nella possibilità di prolungare la vita scientifica dei rilievi oltre le finalità per cui sono stati originariamente acquisiti. Un dataset reso accessibile e adeguatamente documentato può essere riutilizzato per formulare nuove domande di ricerca, sperimentare metodi di elaborazione e sviluppare letture del patrimonio che coinvolgono geomatica, archeologia, architettura e scienze della conservazione. L'apertura dei dati contribuisce inoltre a valorizzare le risorse investite nelle campagne di acquisizione, favorendo collaborazioni tra istituzioni con competenze e disponibilità tecnologiche differenti. Componenti e strumenti sviluppati per la piattaforma sono stati inoltre applicati a contesti di monitoraggio ambientale, come gli incendi in California, e alla gestione di infrastrutture costruite, evidenziando la trasferibilità delle soluzioni tecnologiche anche al di fuori dell'ambito del patrimonio culturale [8].

Affinché queste opportunità si traducano in risultati scientificamente affidabili, l'accessibilità deve essere accompagnata da una documentazione chiara della qualità e della provenienza dei dati. Questo aspetto è particolarmente importante nei confronti multitemporali, per i quali accuratezza, risoluzione, sistemi di riferimento, condizioni di acquisizione e procedure di elaborazione devono essere valutati in modo coerente. Occorre inoltre quantificare le incertezze, così da distinguere le trasformazioni effettive del bene dalle differenze riconducibili ai sensori e ai metodi impiegati.

La prospettiva è quella di una documentazione digitale progressivamente aggiornabile, capace di collegare la conoscenza del patrimonio alle esigenze della sua conservazione. La disponibilità di osservazioni successive può fornire una base per riconoscere situazioni di vulnerabilità, orientare ulteriori indagini e supportare la programmazione degli interventi.

5 Prospettive di sviluppo

Le prospettive di sviluppo di OpenHeritage3D.org si orientano verso la realizzazione di un'infrastruttura distribuita, in grado di ampliare le possibilità di conservazione, accesso e utilizzo dei dati 3D del patrimonio culturale su scala internazionale. L'obiettivo è il progressivo passaggio dall'attuale configurazione prevalentemente centralizzata a una rete federata di nodi regionali, gestiti da università, istituti di ricerca ed enti responsabili della tutela e della documentazione del patrimonio Ciascun nodo potrebbe mantenere autonomia nella gestione e conservazione dei propri dataset, partecipando al contempo a un sistema comune di ricerca e accesso alle risorse distribuite. Tale approccio consentirebbe di distribuire le risorse necessarie alla gestione dei dati e di favorire una maggiore partecipazione delle istituzioni coinvolte, mantenendo criteri comuni di accessibilità e interoperabilità [8].

La realizzazione di questa architettura richiederà la definizione di standard condivisi per lo scambio dei metadati e lo sviluppo di interfacce di programmazione (API) che permettano l'individuazione e l'interrogazione dei dataset conservati presso i diversi nodi, senza richiederne la centralizzazione. In tale percorso è previsto il coinvolgimento di organismi internazionali di standardizzazione, tra cui l'Open Geospatial Consortium (OGC), per favorire l'integrazione della piattaforma con altre infrastrutture per la gestione dei dati spaziali. Il percorso di implementazione prevede una fase iniziale di sperimentazione con un numero limitato di nodi, seguita dalla progressiva estensione della rete e dei servizi disponibili. Le collaborazioni con il Politecnico di Torino e la Cyprus University of Technology rappresentano un punto di partenza per lo sviluppo dell'infrastruttura in ambito europeo, mentre il coinvolgimento di ulteriori istituzioni potrebbe favorirne l'espansione in altre aree geografiche.

Parallelamente all'evoluzione dell'architettura, sono previsti sviluppi degli strumenti di visualizzazione e analisi. L'integrazione di tecnologie WebXR potrebbe ampliare le modalità di fruizione dei dataset attraverso ambienti immersivi di realtà virtuale e applicazioni di realtà aumentata. Ulteriori funzionalità potrebbero supportare analisi quantitative avanzate direttamente in ambiente web, attraverso strumenti per l'estrazione di sezioni, il confronto volumetrico e l'analisi delle variazioni geometriche tra rilievi acquisiti in epoche differenti. È inoltre previsto lo sviluppo di servizi che consentano di interrogare ed elaborare porzioni specifiche delle nuvole di punti senza richiedere il trasferimento dell'intero dataset. Tra le prospettive tecnologiche rientra anche l'integrazione di sistemi di visualizzazione basati su Gaussian Splatting, da affiancare agli strumenti esistenti senza sostituire la conservazione delle nuvole di punti e degli altri dati originali, fondamentali per le analisi metriche e per eventuali elaborazioni successive.

Un ulteriore ambito di ricerca riguarda l'impiego dei dataset archiviati per applicazioni di intelligenza artificiale. La disponibilità di dati 3D ad alta risoluzione, georiferiti e accompagnati da metadati e paradati potrebbe favorire lo sviluppo di procedure di segmentazione semantica, riconoscimento degli elementi architettonici e individuazione automatizzata di anomalie o fenomeni di degrado. In questo contesto, l'evoluzione della piattaforma potrebbe comprendere strumenti per la selezione,

l'annotazione e l'esportazione di dati destinati all'addestramento di modelli di apprendimento automatico, nel rispetto delle condizioni di licenza e riuso.

Il consolidamento di queste prospettive dipenderà non soltanto dallo sviluppo tecnologico, ma anche dalla definizione di modalità condivise di gestione, aggiornamento e conservazione delle risorse digitali. In particolare, l'architettura federata richiederà una chiara attribuzione delle responsabilità per la manutenzione dei nodi, la continuità dei servizi e la tutela dei dati nel tempo.

6 Conclusioni

OpenHeritage3D.org rappresenta un esempio di infrastruttura aperta per la conservazione e la condivisione di dati 3D del patrimonio culturale, in risposta alle criticità associate alla gestione e alla distribuzione di dataset di grandi dimensioni. L'integrazione tra archiviazione dei dati originali, documentazione dei processi di acquisizione ed elaborazione, identificazione persistente delle risorse e visualizzazione interattiva attraverso il web consente di ampliare le possibilità di accesso e riutilizzo delle informazioni prodotte dalle attività di rilievo. In particolare, la disponibilità di metadati e paradati assume un ruolo essenziale per interpretare correttamente i contenuti geometrici, valutarne l'affidabilità e individuare possibili applicazioni successive.

Le prospettive di evoluzione verso una rete federata e l'integrazione di nuovi strumenti di analisi e visualizzazione potrebbero ampliare ulteriormente queste opportunità, ma richiederanno standard condivisi e forme di coordinamento tra i soggetti coinvolti. La sostenibilità di tale sviluppo dipenderà dalla capacità di mantenere accessibili i dati e le informazioni necessarie a interpretarli, anche oltre la durata dei singoli progetti di documentazione. In questo quadro, OpenHeritage3D.org costituisce un riferimento per la costruzione di archivi in cui i rilievi possano essere non soltanto consultati, ma anche verificati, confrontati e riutilizzati per attività di ricerca, monitoraggio e tutela del patrimonio culturale.

Riferimenti bibliografici

1. McAvoy, S., Ristevski, J., Rissolo, D., Kuester, F. (2023). OpenHeritage3D: Building an Open Visual Archive for Site Scale Giga-Resolution LiDAR and Photogrammetry Data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-M-1-2023, 215–222. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-1-2023-215-2023
2. McAvoy, S., Tanduo, B., Spreafico, A., Chiabrando, F., Rissolo, D., Ristevski, J., Kuester, F. (2024). An Archival Framework for Sharing of Cultural Heritage 3D Survey Data: OpenHeritage3D.org. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2-2024, 241–248. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-241-2024
3. Schütz, M. (2016). *Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers*. Master's Thesis, Vienna University of Technology. https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2016/SCHUETZ-2016-POT/

4. Baca, M. (Ed.). (2016). *Introduction to Metadata* (3rd ed.). Getty Research Institute, Los Angeles. https://www.getty.edu/publications/intrometadata/
5. Ioannides, M., Baker, D., Agapiou, A., Siegkas, P., Cassar, A. (2025). Quality Certification in Data Acquisition for Cultural Heritage: The Power of Paradata for High Quality Digital 3D Cultural Heritage Assets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-9-2025, 623–628. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-9-2025-623-2025
6. Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J. J., et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for Scientific Data Management and Stewardship. *Scientific Data*, 3, 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18
7. Cesium GS (s.d.). *CesiumJS: An Open-Source JavaScript Library for 3D Globes and Maps*. https://cesium.com/platform/cesiumjs/ (ultimo accesso: 19 ottobre 2026).
8. McAvoy, S., Agarwal, A., Rissolo, D., Chiabrando, F., Bent, G., Pfaff, D., Ristevski, J., Kuester, F. (2026). OpenHeritage3D.org: Digital Atlas Archival and Streaming Infrastructure for Open Cultural Heritage 3D Data. *Proceedings of World Internet Conference Digital Silk Road Development Forum*, 2026. https://escholarship.org/uc/item/5gr6n6bw