



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DOTTORATO DI RICERCA IN
BENI CULTURALI E AMBIENTALI

Ciclo 37

Settore Concorsuale: 10/C1- TEATRO, MUSICA, CINEMA, TELEVISIONE E MEDIA
AUDIOVISIVI

Settore Scientifico Disciplinare: L-ART/06 - CINEMA, FOTOGRAFIA E TELEVISIONE

TECHICHE IMAGE-BASED DI ACQUISIZIONE 3D E MODELLI DI CONDIVISIONE
DEI DATI GENERATI NELL'AMBITO DEL PATRIMONIO CULTURALE

Presentata da: Federica Giacomini

Coordinatore Dottorato

Donatella Restani

Supervisore

Alessandro Iannucci

Esame finale anno 2025

INDICE

Introduzione	1
Capitolo primo	6
1. Metodi di acquisizione image-based nei progetti di digitalizzazione del Patrimonio Culturale: protocolli, software, sviluppi recenti	6
1.1 Pianificazione del progetto e qualità del modello	8
1.2 Strumenti e schemi di ripresa	19
1.3 Elaborazione dei dati raccolti	23
1.4 Sviluppi recenti: NeRF e GS-3D	29
1.5 Studi sul software: black box, FOSS, Cloud Computing	31
2. Casi di studio	36
2.1 La torre tonda est della Rocca di Riolo nell'ambito del progetto "A cielo Aperto": obiettivi, metodi e dati acquisiti	37
2.2 "L'Arca di Bertrando" nell'ambito del progetto dedicato alla ricostruzione del Duomo di Udine: obiettivi, metodi e dati acquisiti.	42
2.3 Il Basilisco nel contesto del progetto PE5 Changes del PNRR e della ricostruzione eseguita per la mostra temporanea su Ulisse Aldrovandi "L'altro Rinascimento. Ulisse Aldrovandi e le meraviglie del mondo" (Bologna, Museo di Palazzo Poggi (8 dicembre 2022 - 28 maggio 2023): obiettivi, metodi e dati acquisiti	46
Capitolo secondo	51
1. Archiviazione dei dati ottenuti a fini di conservazione, revisione, e riuso	51
1.1 Approcci alla metadaturazione per i modelli 3D del Patrimonio Culturale 3D	56
1.2 Interpretazione, paradata e immagini	63
2 Dai (meta)dati alle informazioni: infrastrutture per la conservazione e la condivisione del Patrimonio Culturale Digitale	67
2.1 Trusted Digital Repository (TDR)	70
2.2 Next Generation Repositories (NGRs)	72
2.3 Aggregatori e portali	78
Capitolo Terzo	82
1. Rappresentazione dei dati acquisiti in ambiente Web3D	82
1.1 Piattaforme e framework per la visualizzazione di modelli 3D	84
1.2 Service Platform	89
1.3 Framework e self-hosting viewers	90
2. Nuovi approcci per l'esplorazione "verticale" degli oggetti acquisiti con tecniche image-based	93
2.1 Test eseguiti e sviluppi futuri	95
Bibliografia	100
Raccomandazioni	122
Sitografia	123

Introduzione

Questa ricerca si inserisce nel più ampio contesto della transizione digitale che, da ormai un ventennio a questa parte, nell'ambito del Patrimonio Culturale ha visto convergere numerose iniziative, progetti di ricerca, nonché lo sviluppo di tecnologie e infrastrutture sempre più avanzate (Champion 2018, Nappi et al. 2024, Farella et al. 2024). A fronte delle problematiche evidenziate dalla letteratura di riferimento circa l'assenza di schemi condivisi per la comunicazione dei risultati (Remondino et al. 2017, Lauro & Lombardo 2023), la ricerca si propone anzitutto di analizzare i principali processi di acquisizione ed elaborazione reality-based adottati da esperti del settore, cercando di mettere in luce quali metodi e applicazioni vengano in genere adottati per comunicare la precisione e l'accuratezza dei risultati; dal momento che le tecniche basate su immagini rappresentano attualmente uno dei metodi più diffusi per la digitalizzazione dei beni culturali (Stathopoulou - Remondino 2019, De Paolis et al. 2020, Rahaman 2021, Agapiou 2023) è apparso opportuno concentrare lo studio su queste metodologie. Il rapido sviluppo di sensori digitali e delle tecniche di modellazione Structure from Motion (SfM) ha infatti portato negli ultimi due decenni a un uso sempre più intenso di tali metodologie sia da parte di esperti appartenenti ai settori dell'architettura, dell'ingegneria e dell'edilizia (AEC), sia, gradualmente, anche da parte degli studiosi appartenenti all'ambito umanistico (Remondino et al. 2017, Granshaw 2018, Bitelli et al. 2019). Occorre fin da subito sottolineare, tuttavia, che la comunità accademica e degli istituti di ricerca non sono gli unici soggetti interessati alla digitalizzazione dei beni culturali; accanto a ricercatori, studiosi e operatori specializzati sono emerse nuove comunità di professionisti non formali¹ potenzialmente capaci di contribuire ai processi di acquisizione e soprattutto di disseminazione da tempo in atto nelle istituzioni culturali e di ricerca.²

Al fine di promuovere una maggiore consapevolezza verso l'uso di queste tecnologie sono stati condotti diversi progetti basati su approcci crowd-sourced volti al coinvolgimento del pubblico (McCarthy 2014, Tucci et al. 2019, Tucci et al. 2020). Trovare un punto di incontro tra questi diversi gruppi è del resto anche uno degli obiettivi perseguiti dalle più recenti politiche europee.³ L'esigenza di spazi di condivisione e collaborazione adeguati si è tradotta in prima istanza in una serie di iniziative tese alla costruzione di infrastrutture in grado di interconnettere tra loro gli specialisti del settore ma anche di ampliare la portata dei contenuti digitali prodotti da questi ultimi presso un pubblico più ampio. La creazione di un cloud collaborativo europeo in grado di accogliere le risorse digitali generate nell'ambito dei numerosi progetti di digitalizzazione è in tal senso uno dei più importanti esiti della volontà di promuovere nuove forme di cooperazione tra i diversi stakeholder coinvolti nello studio del Patrimonio Culturale (Brunet et al. 2022). Come si legge nel rapporto redatto

¹ In linea con quanto riportato nella raccomandazione UE sulla convalida dell'apprendimento non formale e informale, si fa ricorso a questa espressione per indicare utenti che hanno intrapreso forme di apprendimento attraverso attività di formazione in azienda, corsi online o basati su risorse aperte o corsi organizzati da enti della società civile per i loro membri, il loro gruppo target o il pubblico in generale. *Council Recommendation of 20 December 2012 on the validation of non-formal and informal learning*, OJ C 398, 22.12.2012, p. 1–5 (2012/C 398/01) [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32012H1222\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32012H1222(01))

² Si veda a tal proposito il piano di comunicazione recentemente redatto dal team di Europeana Foundation per lo spazio comune europeo dei dati. Evans, G. et al. (2023).

³ Si vedano ad esempio le diverse raccomandazioni pubblicate dalla Commissione Europea, in particolare la Raccomandazione della Commissione UE, 2021, di cui si discuterà più avanti. *Commission Recommendation (EU) 2021/1970 of 10 November 2021 on a common European data space for cultural heritage* C/2021/7953, OJ L 401, 12.11.2021, 5–16, (2021/1970/EU) ELI: <http://data.europa.eu/eli/reco/2021/1970/oj>

dal gruppo di esperti incaricati dalla Commissione Europea, uno dei principali obiettivi del Cloud Europeo è infatti quello di offrire un supporto concreto alla comunità di ricercatori, curatori e professionisti museali quotidianamente coinvolti nello studio e nella tutela del patrimonio culturale, predisponendo uno spazio di lavoro giuridicamente sicuro e accessibile anche a quelle realtà che altrimenti non avrebbero le risorse necessarie per perseguire la transizione al digitale. Al contempo, come sottolineato nel report, questo spazio potrà essere una risorsa preziosa anche per le industrie creative e - indirettamente, attraverso la valorizzazione dei risultati della ricerca - per il pubblico europeo (Brunet et al., 2022).

Questo ambizioso progetto si inserisce in un più ampio quadro di strategie UE orientate alla creazione di un mercato unico europeo dei dati prodotti in diversi settori economici e domini di interesse pubblico, tra cui rientra anche il settore culturale.⁴

Uno dei documenti seminali in questa prospettiva è la Raccomandazione della Commissione Europea del 27 ottobre 2011 sulla conservazione digitale e sulla digitalizzazione e l'accessibilità in rete dei materiali culturali (2011/711/UE), dove, oltre ai temi della conservazione e della fruizione, viene posta particolare attenzione anche alle questioni di accessibilità e riutilizzo delle risorse “per usi quali lo sviluppo di contenuti educativi e istruttivi, documentari, applicazioni turistiche, giochi, strumenti di animazione e progettazione”. Nell’arco di un decennio le spinte prodotte dalle evoluzioni tecnologiche e sociali, soprattutto per quanto concerne il consolidamento delle politiche riguardanti gli Open Data,⁵ hanno condotto alla pubblicazione di una nuova raccomandazione, volta ad “aprire la strada” a uno spazio comune europeo di dati per il patrimonio culturale (2021/1970/EU). Il documento, nel riconoscere il mancato superamento di molte delle sfide già individuate nella raccomandazione del 2011, afferma chiaramente la necessità di aumentare gli sforzi verso la digitalizzazione e la conservazione dei beni del patrimonio culturale, ponendo stavolta particolare attenzione alle opportunità offerte dalle tecniche di acquisizione 3D.⁶ Contestualmente viene anche rinnovato l’appello a rendere disponibili i dati raccolti per il riuso da parte di un pubblico più ampio, al fine di generare nuovi servizi e applicazioni creative. Come emerge dalla letteratura di riferimento, tuttavia, affinché i risultati ottenuti possano essere adeguatamente riutilizzati è necessario che gli utenti finali siano in grado di decifrare la qualità degli output prodotti, anche in mancanza di competenze specializzate (Storeide et al. 2023). Sebbene, come accennato, siano stati avviati notevoli progetti di edutainment dedicati proprio al trasferimento di conoscenze nell’ambito della digitalizzazione 3D, occorre riconoscere che, per quanto fondamentali, queste iniziative sono in genere destinate a comunità ben precise.⁷ Allo stesso modo, nonostante siano stati pubblicati diversi vocabolari o guide molto dettagliate da parte di esperti e importanti istituzioni, c’è il rischio che tali

⁴ I principali documenti che compongono la recente strategia europea sui dati sono il Regolamento (UE) 2023/2854 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 13 dicembre 2023, riguardante norme armonizzate sull’accesso equo ai dati e sul loro utilizzo, che modifica il regolamento (UE) 2017/2394 e la Direttiva (UE) 2020/1828 (Data Act) (GU L 2023/2854 del 22.12.2023) (ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2854/oj>). Per approfondimenti sulle attività relative allo spazio dati si veda inoltre *Commission staff working document on Common European Data Spaces*, SWD (2024) 21 final, Brussels, 24.1.2024 <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/second-staff-working-document-data-spaces>

⁵ Così come definiti nell’International Open Data Charter (2015) gli open data sono dati digitali che vengono messi a disposizione con le caratteristiche tecniche e legali necessarie per essere liberamente utilizzati, riutilizzati e ridistribuiti da chiunque, sempre e ovunque <https://opendatacharter.org/>

⁶ Gli obiettivi espressi negli allegati finali del documento esplicitano l’entità di questo impegno, stabilendo per ogni Stato membro i contributi minimi da raggiungere entro il medio (2025) e il lungo termine (2030). Le stime indicate risultano particolarmente ambiziose, soprattutto per quanto riguarda le risorse 3D, che come precisato nelle note a corredo delle tabelle dovrebbero costituire almeno il 40% del totale degli oggetti digitalizzati entro il 2030.

⁷ Si veda ad esempio il progetto “INNOVA CUBA – International and intersectoral intervention for the safeguard of the cultural heritage of the country” condotto dal Laboratorio di Geomatica per l’Ambiente e la Conservazione dei Beni Culturali (GECO - Università di Firenze): cfr. Tucci et al. (2018).

interventi possano essere facilmente ignorati dalle comunità online.⁸ Inoltre, come è possibile dedurre da alcuni recenti studi, la mancanza di standard per la trasmissione e la comunicazione dei risultati ottenuti attraverso tecniche 3D, si riflette inevitabilmente anche nella difficoltà di individuare schemi di metadazione adeguati a documentare esaustivamente le procedure impiegate (Moore et al. 2022, Lauro & Lomardo 2023, Storeide et al. 2023).⁹ Mentre gruppi di lavoro e task force continuano a riunirsi in ogni parte del mondo per affrontare queste complesse problematiche, tuttavia, la quantità dei progetti di digitalizzazione 3D del Patrimonio Culturale continua a moltiplicarsi, mettendo a dura prova i compiti di gestione dei dati prodotti. Come messo in luce da alcune indagini, gran parte degli utenti, siano questi appartenenti al settore GLAM (*Galleries, Libraries, Archives and Museums*) o a laboratori di ricerca, al fine di rendere disponibili i propri dataset si affidano ancora a soluzioni talvolta inadatte alla conservazione e alla presentazione di tali contenuti (Potenziani et al. 2018, Storeide et al. 2023).

Un caso esemplare è in tal senso rappresentato da Sketchfab,¹⁰ una delle piattaforme di sharing più popolari per la diffusione dei materiali 3D, molto spesso utilizzata anche per la condivisione di progetti di studio più elaborati (Potenziani et al. 2018, Boutsis et al. 2019, Champion & Rahman 2020, Scopigno 2021). Al fine di fornire delle alternative open-source specificatamente rivolte al settore dei beni culturali, diversi team e laboratori di ricerca hanno sviluppato sistemi di visualizzazione volti a una resa più accurata dei dettagli o alla visualizzazione immersiva degli scenari ricostruiti (Potenziani et al. 2015, Fanini et al. 2021). Queste soluzioni risultano particolarmente interessanti poiché da un lato permettono di mantenere un maggior controllo sui dati raccolti, senza che questi vengano trasferiti, ad esempio, ad aziende private¹¹ e dall'altro consentono di diffondere gli output elaborati con utenti potenzialmente interessati al loro riuso. Questi framework, inoltre, generalmente consentono agli utenti di creare interfacce personalizzate, più adatte agli scopi di comunicazione dei singoli progetti. Una delle esigenze frequentemente espresse nel campo della presentazione dei modelli 3D del Patrimonio Culturale riguarda la possibilità di integrare diversi media, al fine di trasmettere la grande ricchezza della documentazione sulla base della quale vengono realizzate le ricostruzioni virtuali (Scopigno 2021). Al contempo, sebbene queste soluzioni permettano di mostrare le numerose relazioni che solitamente caratterizzano i beni culturali, come sostengono altri autori, è ancora necessario svolgere un grande lavoro per quanto riguarda la corretta trasmissione delle informazioni al pubblico (Münster et al. 2024, Apollonio et al. 2024). L'accuratezza delle ricostruzioni può essere, infatti, "oscurata" da elaborazioni non opportunamente documentate o da texture ad alto dettaglio, al di sotto delle quali tuttavia vi sono modelli pesantemente ottimizzati (Potenziani et al. 2018). Inoltre, anche nei rari casi in cui i metadati relativi ai processi di ricostruzione siano presenti (Champion 2018), è possibile che un utente poco esperto non sia del tutto in grado di trovare e interpretare correttamente tali informazioni, seppure ciò possa essere di suo interesse.

Sebbene le opportunità attualmente offerte dalle moderne tecnologie permettano ormai di raggiungere un grado di immersività sempre maggiore, fornendo rappresentazioni molto realistiche e coinvolgenti, tali opportunità comportano anche una serie di sfide che occorre affrontare. I media visivi svolgono un ruolo fondamentale nella comunicazione dell'arte e del Patrimonio Culturale e

⁸ A questo proposito si vedano invece le numerose linee guida redatte dall'Historic England (<https://historicengland.org.uk/advice/find/latest-guidance/>), o ancora alcune iniziative promosse in ambito nazionale e internazionale, tra cui lo stesso Piano di Digitalizzazione del Patrimonio Culturale (PND), che ha dedicato una breve sezione delle linee guida anche alla digitalizzazione 3D (<https://docs.italia.it/>)

⁹ In particolare si veda lo studio promosso dalla Commissione Europea relativo al miglioramento della qualità dei progetti di digitalizzazione 3D. VIGIE 2020/645, *Final Study Report* (<https://data.europa.eu/doi/10.2759/471776>)

¹⁰ <https://sketchfab.com/>

¹¹ Si fa riferimento a servizi cloud per lo più commerciali offerti da "giganti dell'IT" come ad esempio Amazon Drive, Microsoft Azure, Dropbox, Mega (Brunet et al. 2022)

permettono di semplificare o rafforzare la comunicazione (Scopigno 2021). Come bene espresso in Münster et al. (2024), la visualizzazione è uno degli aspetti fondamentali della ricostruzione 3D perché è il mezzo più efficace per sintetizzare dati complessi rendendo i risultati più accessibili e comprensibili non solo ai professionisti ma anche ai non addetti ai lavori; come sottolinea l'autore, l'uso di interfacce diverse può infatti cambiare radicalmente il modo in cui percepiamo, presentiamo, sperimentiamo e interagiamo con i modelli, tanto che le scelte fatte possono migliorare la comunicazione dello studio o fuorviare o distorcere fortemente l'interpretazione dei dati che presentiamo (Münster et al. 2024). Queste potenzialità non dovrebbero essere sfruttate solo per diffondere gli importanti risultati delle ricostruzioni prodotte; proprio in ragione della loro efficacia nel trasmettere le informazioni, gli stimoli visivi dovrebbero essere maggiormente indagati anche come strumento di analisi, nonché per comunicare in un modo più ampiamente comprensibile i processi intermedi che conducono agli output finali. Come ben spiegato da Ware (2004), la visualizzazione può supportare la ricerca in diversi modi, favorendo ad esempio la percezione di proprietà che non erano state previste o evidenziando problemi relativi alla qualità dei dati. Sebbene alcuni autori abbiano evidenziato l'opportunità di utilizzare le immagini per documentare i processi di ricerca eseguiti (Huvila 2022, Rodrigues & Lopez 2023) e altri riconoscano l'importanza delle rappresentazioni grafiche quali strumenti utili all'interpretazione dei dati (Karatas & Lombardo 2020), sembra tuttavia che questo tipo di documentazione, paradossalmente, sia stato ancora poco esplorato nel contesto della comunicazione dei processi di ricostruzione virtuale. Eppure, riprendendo Münster et al. (2024), modellazione 3D e visualizzazione sono concetti talmente interconnessi che si potrebbe dire che l'uno non abbia ragione di esistere senza l'altro, poiché senza un feedback visivo probabilmente non sarebbe nemmeno possibile generare il modello finale (Münster et al. 2024). D'altra parte, l'affidabilità e l'accessibilità dei dati condivisi sono temi che oggi hanno assunto un'importanza tale¹² che risulta sempre più difficile progettare forme di valorizzazione efficaci, senza al contempo fornire una lettura appropriata delle rappresentazioni create.

Gli aspetti di acquisizione, conservazione, condivisione e infine comunicazione dei contenuti prodotti attraverso le tecnologie digitali non possono essere analizzati senza considerare le ricadute che ogni processo ha sulle altre parti. In tal senso, al fine di individuare metodi capaci di trasmettere con maggiore trasparenza la complessità delle ricostruzioni eseguite e rendere gli output maggiormente comprensibili a un'utenza estesa, si è ritenuto funzionale adottare un approccio altamente trasversale, basato sulla revisione della letteratura riguardante tutte le principali fasi legate alla creazione e alla condivisione dei modelli 3D; al contempo, si è tuttavia anche cercato di mettere in luce in che modo le tecnologie attuali vengono utilizzate per documentare graficamente i processi intermedi delle ricostruzioni eseguite per restituirli infine alle comunità connesse.

Partendo dall'analisi delle procedure di acquisizione ed elaborazione condotte su alcuni casi di studio, si cercherà dunque di indagare più approfonditamente non solo gli output finali ma anche e soprattutto la documentazione tecnica riguardante, ad esempio, le stime di errore. Parallelamente nel lavoro vengono esaminati temi altrettanto significativi ed essenziali per le finalità dello studio, tra cui gli schemi di metadattazione e i sistemi di archiviazione più idonei alla conservazione dei dati 3D del Patrimonio Culturale. Ciò permetterà di capire anche quali sono le informazioni ritenute essenziali per la corretta trasmissione dei dati raccolti ed elaborati all'interno dei progetti di digitalizzazione. Il panorama attuale, come brevemente illustrato, è molto complesso e sempre più orientato a una visione tecnocentrica della cultura. Come ben illustrato in Drucker (2011) per ribaltare i presupposti che strutturano le convenzioni acquisite da altri domini è necessario riesaminare i fondamenti intellettuali delle digital humanities, ponendo le tecniche di visualizzazione grafica su un fondamento che è

¹² Come riportato nel PND, l'accessibilità non deve essere pensata solo nei termini di uno spazio fisico in cui è possibile entrare ma anche come possibilità di rendere i dati intellegibili da un punto di vista cognitivo Ministero della Cultura. 'Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale | Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale'. Agenzia per l'Italia Digitale, 2022 (<https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html>)

umanistico alla base. L'indagine umanistica riconosce il carattere situato, parziale e costitutivo della produzione di conoscenza, il riconoscimento che la conoscenza è costruita, presa, non semplicemente data come una rappresentazione naturale di un fatto preesistente (Drucker 2011).¹³ Sebbene le considerazioni espresse dall'autrice risalgano ad anni non più recenti, appaiono rilevanti nel contesto attuale, dove forse occorre più che mai trovare uno spazio, non solo per “consegnare” la conoscenza, ma anche per coltivare modalità di pensiero che permettano di accettarne l'ambiguità e trasmettere i limiti delle tecnologie e dei processi adottati.

¹³ L'autrice per parlare dei dati suggerisce infatti di riconcepire i dati come “capta” presi attivamente; mentre si presume che i dati siano un “dato” in grado di essere registrato e osservato, il capta è frutto di interventi basati su scelte, contesti e obiettivi. Drucker 2011

Capitolo primo

1. Metodi di acquisizione image-based nei progetti di digitalizzazione del Patrimonio Culturale: protocolli, software, sviluppi recenti

Negli ultimi decenni, gli studi rivolti al miglioramento delle tecnologie e delle procedure di ricostruzione e acquisizione 3D sono aumentati esponenzialmente; un'imponente mole di articoli pubblicati in conferenze e riviste internazionali, dimostra il grado di sviluppo della ricerca nel campo (Peinado-Santana et al. 2022, Pepe et al. 2022, Zhou 2024).

I lavori specificamente rivolti all'ambito del Patrimonio Culturale certo beneficiano delle ricerche condotte in questo settore, soprattutto per ciò che concerne i metodi di ricostruzione basati su dati reali. In tutti gli ambiti del settore dei beni culturali (oggetti museali mobili, architettura, siti archeologici), il rilievo 3D è infatti ormai un supporto essenziale per una serie di attività: la documentazione dell'oggetto, i diversi tipi di analisi (dall'analisi statistica alle interpretazioni e ricostruzioni storiche), la conservazione e la diagnostica e, naturalmente, la comunicazione e la valorizzazione (Aicardi et al. 2018). A differenza della modellazione 3D assistita da computer, le tecnologie di ricostruzione reality-based partono dallo studio e dalla registrazione degli oggetti attraverso diversi input, tra cui immagini, nuvole di punti e/o coordinate spaziali (Zhou 2024); tali input possono essere generati da una varietà di tecnologie, come sensori di telecamere o scanner di diverse categorie, o attraverso una combinazione di entrambi (Verykokou 2023). Il laser scanner terrestre (TSL), ad esempio, permette di acquisire in tempi brevi una quantità molto densa di dati con grande accuratezza; in questo senso, viene spesso impiegato nei progetti di ricostruzione di beni culturali su larga scala (Stylianidis et al. 2016).

La ricostruzione basata su immagini, seppure possa apparire tecnologicamente meno avanzata o performante, si presenta ancora oggi come un campo di ricerca molto attivo e continua a essere largamente adottata in numerosi settori per la misurazione e la rappresentazione di oggetti tridimensionali. La fotogrammetria, in particolare, può essere considerata il primo metodo di misurazione basato sull'acquisizione di immagini¹⁴. Durante il XX secolo, le tecniche utilizzate in fotogrammetria si sono evolute verso metodi di ricostruzione sempre più raffinati, che hanno condotto al progressivo perfezionamento dei procedimenti impiegati (Atkinson 2001, Paris 2012). Alcune delle soluzioni attualmente implementate nelle applicazioni di foto-sintesi e corrispondenza di immagini provengono infatti da questa procedura, il cui impiego era prevalentemente legato alla mappatura topografica ed edilizia (Granshaw 2018, Poroykov et al. 2023).

Nel corso del tempo, l'applicazione dei procedimenti fotogrammetrici si è gradualmente estesa a numerosi campi di applicazione ed alcune delle soluzioni proposte per l'analisi delle immagini fotografiche sono confluite nelle strategie di matching automatico elaborate nell'ambito della Computer Vision (Eltner & Sofia 2020, Szeliski et al. 2022). Una serie di fattori, tra cui soprattutto l'evoluzione dei sistemi informatici e la diffusione delle immagini digitali, ha condotto a una graduale integrazione delle teorie e degli approcci formulati nell'ambito di queste due aree di ricerca. Come ben evidenziato da diversi studiosi, è quasi impossibile tracciare una linea di confine netta tra le due applicazioni per quanto riguarda la definizione degli algoritmi impiegati e i loro risultati (Gruen 2012, Aicardi et al. 2018). Tali ricerche evidenziano tuttavia delle differenze. Sebbene entrambi i procedimenti sfruttino il modello della proiezione centrale per ottenere le informazioni contenute nelle immagini, essi presentano priorità e approcci diversi; in particolare, la fotogrammetria

¹⁴ Le prime applicazioni e strumenti fotogrammetrici risalgono al 1850 e iniziano a diffondersi soprattutto durante i primi anni del XX secolo, con la costituzione nel 1910 della Società Internazionale di Fotogrammetria. La nascita e lo sviluppo delle tecniche di fotogrammetria viene descritta in diversi testi di riferimento tra cui Atkinson 2001, Luhmann 2023.

tende a porre maggiore attenzione all'accuratezza e all'affidabilità dei risultati, mentre la computer vision mira a un'automatizzazione totale dei metodi di riconoscimento delle caratteristiche comuni tra le immagini (Barazzetti et al. 2011, Aicardi et al. 2018, Schindler 2021). La convergenza tra i due approcci si è tradotta nella messa a punto di sistemi in grado di elaborare in maniera efficiente grandi insiemi di immagini e restituire in output ricostruzioni tridimensionali di grande impatto, seppure con livelli di dettaglio e accuratezza variabili (Remondino et al. 2017).

I processi di ricostruzione fotogrammetrica, oggi, vengono affrontati attraverso pipeline prevalentemente automatizzate, basate su algoritmi *Structure-from-Motion* (SfM) e *Multi-View-Stereo* (MVS); questi ultimi, per poter elaborare il set di immagini, prevedono che gli oggetti vengano prima acquisiti da diversi punti di osservazione con strumenti che possono variare a seconda delle risorse disponibili (Eltner & Sofia 2020). Oltre alle comuni macchine reflex digitali (DSRL) possono infatti essere utilizzati sistemi aerei forniti di controllo remoto, come droni o anche dispositivi mobili ampiamente diffusi, come tablet e smartphone (Nocerino et al. 2017, Gaiani et al. 2019). L'input, dunque, è principalmente rappresentato da una serie di fotografie che possono essere poi elaborate attraverso software commerciali o open source. I bassi costi in termini di investimento iniziale e la relativa facilità d'uso hanno reso quindi la ricostruzione basata su immagini una delle tecniche di acquisizione di maggior successo, adottata sia da professionisti che utenti non specializzati (Bitelli et al. 2019).

Anche nel campo dei Beni Culturali, l'automazione del procedimento fotogrammetrico ha fatto crescere enormemente l'interesse della comunità verso questo metodo di rilievo, tanto che l'uso delle tecniche di registrazione multi-vista può essere ormai considerata una prassi comune per l'analisi e la documentazione del Patrimonio (Bitelli 2002, Verhoeven 2017). Si tratta di una metodologia che può essere impiegata sia per la digitalizzazione di grandi volumi e aree, come nel caso di edifici storici e beni paesaggistici, sia per la misurazione di reperti di piccole dimensioni, raggiungendo precisioni sub-millimetriche (Cabrelles et al. 2020, De Paolis et al. 2020). Come si evince dalla letteratura di riferimento e dai casi applicativi che verranno descritti in seguito, mentre per strumenti di registrazione attivi le distanze di acquisizione sono dettate dalle case produttrici, per le tecniche basate sulle immagini si ha maggiore possibilità di variare il campo di ripresa in base a specifiche necessità (Rong et al. 2021). Ciò rende queste metodologie particolarmente adatte ad affrontare l'eterogeneità che solitamente caratterizza gli oggetti indagati nell'ambito del Patrimonio Culturale.

I processi per la raccolta dei dati attraverso metodi image-based o tecniche fotogrammetriche integrate con laser scanner e strumenti di misurazione classica, come Total Station,¹⁵ sono stati esaminati e schematizzati in numerose ricerche nel corso degli anni.¹⁶ Tuttavia, come rilevato da studi più recenti, permane ancora una sostanziale frammentarietà rispetto alla definizione di standard comuni per gli output prodotti, con la conseguente impossibilità di classificarne i risultati in modo coerente (Storeide et al. 2023). Gran parte delle ricerche riguardano per lo più approcci specifici e le pipeline sviluppate sono fortemente connesse all'uso di risorse hardware e software disponibili o necessari a soddisfare determinati requisiti; ciò può vanificare lo scopo di fornire degli schemi di lavoro ampiamente condivisi e replicabili, rendendo difficoltosa l'individuazione di standard di riferimento per la classificazione dei risultati (Lauro & Lombardo 2023).

Rispetto alle modalità di acquisizione ed elaborazione, una delle maggiori problematiche sollevate riguarda la qualità degli output prodotti. Nonostante siano state promosse nel corso degli

¹⁵ Una stazione totale è uno strumento di rilevamento che utilizza la luce laser. È considerata una tecnica di rilievo diretto perché l'operatore sceglie manualmente i punti acquisiti e li definisce in anticipo. Il grado di accuratezza di ciascun punto è generalmente molto elevato e i dati prodotti possono essere utilizzati per misurare grandi distanze, come quelle che solitamente caratterizzano i rilievi su larga scala dedicati a siti archeologici, complessi architettonici o per il rilievo del paesaggio: cfr. Ditta & Colson 2018

¹⁶ Remondino & El Hakim 2006, Barazzetti et al. 2011, Eltner et al. 2016, Barszcz et al. 2020, Verykokou & Ioannidis 2023

anni alcune iniziative volte alla formulazione di principi e pratiche comuni, i processi di raccolta dei dati del Patrimonio Culturale risultano ancora prevalentemente legati agli obiettivi dei singoli progetti;¹⁷ di conseguenza, i requisiti di dettaglio e accuratezza variano da caso a caso e sulla base dei costi e delle tempistiche dettate dagli attori coinvolti (Ioannides & Patias 2023). Come evidenziato già nel 2016 in Münster et al., esiste pertanto un divario tra gli approcci teorici e la realtà pratica stabilita dalle esigenze progettuali (Münster et al. 2016).

In particolare, anche se le procedure di raccolta ed elaborazione attraverso fotogrammetria o scanner abbiano raggiunto un buon livello di automazione e vengano utilizzate anche al di fuori della comunità geomatica, l'analisi dei risultati è spesso affidata al singolo utente e mancano template comuni per la comunicazione dei livelli di qualità (Remondino et al. 2017, Granshaw 2018); soprattutto nel campo dei Beni Culturali, dove queste tecniche vengono frequentemente utilizzate per documentare i manufatti oggetto di studio, è necessario stabilire dei chiari standard di affidabilità geometrica o almeno creare una rete di controllo che possa restituire dei feedback rispetto ai procedimenti adottati e ai dati ottenuti in fase di elaborazione (Aicardi et al. 2018, Bitelli et al. 2019).

Considerata la necessità di identificare un quadro di riferimento per i materiali prodotti attraverso processi di documentazione differenti, in questa prima parte, verrà posta particolare attenzione agli studi e ai protocolli volti a definire delle linee guida applicabili ai processi di acquisizione image-based nel campo dei Beni Culturali. Si cercherà, tuttavia, di astrarre possibili riferimenti anche da casi studio specifici, con la finalità di individuare le analogie e le maggiori tendenze rispetto all'uso di attrezzature, software e formati di esportazione.

1.1. Pianificazione del progetto e qualità del modello 3D

La documentazione geometrica di un oggetto del patrimonio culturale può essere definita come il processo di raccolta, elaborazione e rendering dei dati per determinare la posizione, lo stato delle forme e delle dimensioni di un manufatto in un determinato momento storico (Ioannides et al. 2005, Chatzistamatis 2023). Si tratta, più in particolare, di una serie di misurazioni che consentono di restituire prodotti visivi come disegni vettoriali, immagini raster, visualizzazioni 3D (Stylianidis et al. 2016). Indipendentemente dalle strategie di acquisizione adottate, la letteratura e le linee guida di riferimento individuano nella fase di pianificazione uno dei primi e fondamentali step del processo di documentazione di un bene culturale.¹⁸

Nel 1996, l'ICOMOS (*International Council of Monuments and Sites*), durante la sua 11^a Assemblea Generale, ha ratificato un rapporto contenente alcuni principi riguardanti la documentazione dei siti e dei monumenti del Patrimonio Culturale (*Principles for the Recording of Monuments, Groups of Buildings and Sites*); le ultime quattro sezioni del testo coprono una serie di considerazioni legate alla pianificazione del progetto ed esprimono la necessità di identificare i responsabili della documentazione, le modalità di acquisizione, i contenuti e infine le pratiche di gestione delle informazioni raccolte. Nella scelta dei metodi di registrazione appropriati, tra i criteri

¹⁷ Si fa riferimento soprattutto alle linee guida prodotte a livello internazionale di natura per lo più teorica come *La Carta di Londra* (Denard, 2016) e i principi FAIR elaborati nel 2014 dal Lorentz Center per migliorare l'infrastruttura che produce e gestisce i dati accademici (Wilkinson et al., 2016). Più recentemente nell'ambito del Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale (PND), sono state redatte diverse linee guida dedicate ai processi di acquisizione e gestione dei dati del Patrimonio Culturale. Ministero della Cultura. Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale | Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale'. Agenzia per l'Italia Digitale, 2022. <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html>.

¹⁸ In Stylianidis et al. (2016), la pianificazione viene definita una fase "cruciale"; altre linee guida come quella redatta da Historic England indicano la "Pianificazione" come il primo punto del flusso di lavoro fotogrammetrico: Historic England 2017, *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice*, Swindon, Historic England.

chiave vengono inclusi la natura del patrimonio da registrare e la consultazione di eventuali fonti di informazione preesistenti, nonché gli scopi dell'attività di documentazione e le risorse disponibili. Già in questo rapporto vengono sollevate questioni relative all'identificazione di standard per il futuro scambio di contenuti e, seppure non approfonditamente, alla qualità e all'affidabilità dei dati ottenuti.¹⁹

Come specificato anche in altre linee guida, la pianificazione del rilievo di un bene culturale deve partire, anzitutto, dalla ricerca di informazioni storiche e dalla complessiva documentazione raccolta in precedenza (Robin et al. 2007); in questo senso, occorre far riferimento ad alcuni dati essenziali che riguardano l'oggetto stesso. Nel corso degli anni '90, diverse istituzioni internazionali hanno contribuito all'identificazione di queste informazioni chiave, in seguito raccolte in una serie di modelli standard finalizzati a facilitare non solo le attività inventariali ma anche quelle di documentazione.²⁰ Le schede formulate, infatti, raccolgono moltissimi dati, alcuni dei quali fondamentali per qualsiasi attività di rilevamento; tra questi compaiono ad esempio coordinate geografiche, materiali e tecniche di fabbricazione, condizioni e integrità del manufatto, oltre alla segnalazione di eventuali indagini pregresse e prove documentali. In una visione più ampia, l'adozione di questi standard avrebbe dovuto costituire una base comune per lo scambio di informazioni tra diversi progetti di documentazione (Bold & Thornes 1999).

Poter contare su queste conoscenze costituisce infatti un buon punto di partenza per la programmazione della campagna di rilievo; in particolare, l'archiviazione dei dati grezzi può evitare che gli utenti futuri debbano ripartire da zero. Tuttavia, se i dati raccolti non seguono degli standard condivisi, o sono archiviati e presentati secondo una "grammatica" individuale, le informazioni non saranno pienamente decodificabili e utilizzabili da tutti (Ioannides et al. 2005).

In questa prospettiva, la pianificazione di un progetto di documentazione non riguarda solo gli aspetti più immediati, come stabilire le tempistiche o la strumentazione da utilizzare; prima di compiere qualsiasi intervento occorre infatti affrontare tutte quelle questioni che permetteranno al modello di essere recepito ed eventualmente riutilizzato in modo corretto. In letteratura esistono diversi protocolli contenenti raccomandazioni su come affrontare il processo di acquisizione di un bene culturale; numerose guide fanno riferimento in special modo alla documentazione su larga scala, anche se molti dei principi descritti possono essere estesi anche a oggetti mobili o di minore dimensione (Malian, A. 2000, Wenzel et al. 2013).

In ambito fotogrammetrico, una delle prime guide formulate è il protocollo noto come "3x3 Rules"; si tratta di un documento elaborato nel 1994 da Waldhaus e Ogleby a partire da alcuni test condotti dal CIPA (*International Committee of Architectural Photogrammetry*) con camere non metriche.²¹ Seppure anche queste indicazioni, come quelle descritte dall'ICOMOS, possano apparire datate, esse contengono molte linee guida ancora valide. Le regole sono divise in tre sezioni riguardanti la geometria di ripresa, le proprietà della camera e infine gli aspetti procedurali. Rispetto

¹⁹ ICOMOS (1996). Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites. Sofia 11th ICOMOS General Assembly <https://www.icomos.org/en/charters-and-texts/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/387-principles-for-the-recording-of-monuments-groups-of-buildings-and-sites-1996>

²⁰ Il *Core Data Index to Historic Buildings and Monuments of the Architectural Heritage* (1992) è stato creato per identificare le categorie di informazioni necessarie a registrare gli edifici di interesse storico e architettonico, mentre l'*International Core Data Standard for Archaeological Sites and Monuments* (1995) per identificare le categorie necessarie a documentare il patrimonio archeologico immobile. L'*Object 1D* (1997) infine è stato sviluppato per fornire uno standard internazionale per le informazioni necessarie all'identificazione dei beni culturali, in risposta alla minaccia rappresentata dal commercio illecito del patrimonio mobile. Bold, & Thornes 1999.

²¹ Oggi rinominato CIPA Heritage Documentation (<https://www.cipaheritagedocumentation.org/>); si tratta di uno dei più antichi comitati scientifici internazionali dell'ICOMOS, fondato nel 1968. L'area di azione del CIPA è in realtà molto ampia e comprende attività di coordinamento tra esperti, nonché di disseminazione, con l'organizzazione di conferenze, seminari e la pubblicazione di studi scientifici che affrontano diverse questioni riguardanti la documentazione del Patrimonio Culturale.

alla pianificazione i due autori fanno riferimento a questioni relative alla registrazione e al controllo di tutti i dati riguardanti il lavoro di rilievo; in particolare, viene sottolineata la necessità di eseguire degli schizzi annotando misure, direzioni delle foto, punti di appoggio, eventuali rapporti di calibrazione, parametri fotografici utilizzati e inoltre tutte le informazioni riguardanti l'oggetto, la sua storia e suoi proprietari (Waldhaus & Ogleby 1994). Se si osservano alcuni riadattamenti di questo protocollo, è possibile notare come gran parte delle regole siano rimaste sostanzialmente invariate; le modifiche consistono soprattutto in un aggiornamento del linguaggio e delle tecnologie adottate. La parte di pianificazione, ad esempio, è stata rimodulata adottando termini più contemporanei; anziché riferirsi solamente al controllo finale e a protocolli appropriati, si adottano termini come metadati e archiviazione (Waldhäusl et al. 2013, Stylianidis et al. 2016).

Questi due aspetti sono ormai da diversi anni oggetto di studio e riflessione; in particolare gli sforzi sono stati indirizzati verso la messa a punto di pratiche di gestione in grado di garantire, oltre che una corretta documentazione, anche una conservazione a lungo termine dei dati e dei modelli tridimensionali prodotti.²² Ciò è ben esemplificato dalla sempre più frequente richiesta da parte delle organizzazioni finanziatrici di piani di gestione dei dati (*Data Management Plan* - DMP,) come condizione preliminare allo sviluppo del progetto di digitalizzazione. Come riportato in Smale et al. (2018), sebbene l'adozione del DMP sia in realtà una pratica adottata già a partire dagli anni '60, l'attenzione per la gestione dei dati di ricerca è aumentata significativamente a partire dagli anni 2000, in concomitanza al progredire dei sistemi di produzione e archiviazione di tipo digitale. Secondo gli autori, prima di questa data i DMP venivano utilizzati per lo più in progetti di grande complessità tecnica e comunque con scarsa consapevolezza del concetto di "ciclo di vita dei dati di ricerca"; nella maggior parte dei casi si trattava di un mezzo usato per risolvere i problemi legati alle attività di acquisizione, elaborazione e archiviazione immediata (Smale et al. 2018). Oggi, al contrario, il DMP è diventato uno strumento fortemente orientato alla conservazione a lungo termine dei dati prodotti. Come dimostrano i piani redatti per alcuni progetti europei di ampia portata, una delle sfide principali consiste nel garantire che i dati vengano resi disponibili secondo i principi FAIR, e siano quindi facilmente reperibili, accessibili, interoperabili e riutilizzabili (Wilkinson et al. 2016).²³

Per questo motivo, la compilazione del DMP comporta la definizione di una serie di aspetti strettamente connessi ai dati che devono essere prodotti, permettendo di delineare già in una fase preliminare una traccia dell'intero flusso di lavoro. Secondo le linee guida nazionali ed europee, come quelle formulate nell'ambito del Piano nazionale di digitalizzazione (PND) e di Science Europe, un DMP dovrebbe contenere tutti i principali aspetti legati al processo di digitalizzazione, dalle

²² Esempi di questi approcci ci vengono forniti dalle numerose iniziative intraprese a livello europeo, tra cui DARIAH-EU (*Digital Research Infrastructure for Arts and Humanities*), un'infrastruttura di ricerca i cui primi lavori risalgono al 2006 e che ha tra i suoi principali obiettivi quello di promuovere forme di archiviazione e di gestione dei dati scientifici relativi al Patrimonio Culturale (<https://www.dariah.eu/>). Romary 2006. ARIADNE (*Advanced Research Infrastructure for Archaeological Dataset Networking*) orientata allo sviluppo di infrastrutture di ricerca per il settore dell'archeologia, che ha svolto nel corso dell'ultimo decennio un ruolo fondamentale nel garantire a diversi istituti servizi e strumenti per l'accesso integrato ai dataset del Patrimonio Culturale presenti in tutta Europa (<https://portal.ariadne-infrastructure.eu/>). Bardi et al. 2024. E-RIHS (*European Research Infrastructure for Heritage Science*), un'infrastruttura di ricerca paneuropea entrata nel 2016 nella Roadmap ESFRI, analogamente mira a garantire la conservazione a lungo termine e un maggiore riutilizzo dei dati promuovendo lo scambio di tecnologie e competenze all'interno di contesti europei più ampi (<https://www.e-rihs.eu/>) Wright et al. 2020.

²³ Si fa riferimento ai piani redatti, ad esempio, per INCEPTION, un vasto progetto di ricerca europeo volto allo sviluppo di sistemi all'avanguardia per lo studio e la fruizione del Patrimonio Culturale 3D (<https://www.inception-project.eu/en>) o per CHANGES (*Cultural Heritage Active Innovation for Sustainable Society*), un ente no profit nato nel 2022 con l'obiettivo di coordinare, in qualità di Hub, il progetto di Partenariato Esteso del PNRR "CHANGES: Cultural Heritage Innovation for Next-Gen Sustainable Society", in risposta al Bando MUR D.D. n. 341 del 15 marzo 2022 (<https://www.fondazionechanges.org/chi-siamo>); ulteriori esempi provengono dai diversi piani di gestione sviluppati per H-RIHS. Cfr.; Maietti F., Medici M. Ferrari F., *Data Management Plan*, Deliverable 7.6, v. 3.00, Giugno 2018; Gualandi, B., and Peroni S. *Data Management Plan: Second Version*, Febbraio 2024 doi.org/10.5281/ZENODO.10727879; Padfield, J. (2024). D.5.2 *Data Management Plan for E-RIHS ERIC*, Giugno 2024. doi.org/10.5281/zenodo.12607922

informazioni amministrative fino alle tipologie di dati e metadati, al rispetto dei requisiti di qualità, accessibilità, riuso, conservazione, sicurezza; occorre quindi prevedere non solo la quantità e il tipo di formati ma anche le tecnologie e le misure che verranno utilizzate per assicurare la qualità, la conservazione e la disseminazione delle informazioni raccolte. D'altronde, come precisato nelle linee guida del PND, lo scopo della pianificazione della gestione dei dati e degli oggetti digitali è anche testimoniare e documentare le metodologie impiegate per la realizzazione del processo stesso.²⁴

Sebbene il DMP faccia per lo più riferimento alla gestione del flusso dati, la sua applicazione dovrebbe garantire che tali dati siano anche affidabili e ben documentati, selezionando ad esempio i formati più idonei per la loro condivisione e riuso. In questo senso, la pianificazione del rilievo rientra all'interno della più generale pianificazione del progetto. Rispetto a quest'ultimo punto, Pfarr-Harfst (2016) ha elaborato un piano di lavoro basato su una logica di tipo "input-output" costituito da quattro fasi:

- 1) Preparazione;
- 2) Raccolta dati;
- 3) Processamento dei dati;
- 4) Pubblicazione.

In questo modello il risultato di ogni fase costituisce l'input per la tappa successiva. Relativamente alla fase di pianificazione, occorre anzitutto stabilire quali sono gli obiettivi del progetto, poiché questi a loro volta influenzeranno la scelta degli strumenti hardware e software. Prima di effettuare qualsiasi intervento, altri criteri da considerare e definire riguardano le risorse umane ed economiche, il tempo a disposizione, nonché il livello di dettaglio da acquisire. Quest'ultimo aspetto è particolarmente rilevante ai fini della valutazione della qualità del modello, assieme ad altri fattori tra cui la strategia adottata per documentare il progetto stesso (Pfarr-Harfst 2016).

Come accennato, tuttavia, determinare il grado di accuratezza di un rilievo può non essere semplice dal momento che si tratta di un criterio relativo, che va stabilito tenendo conto dei fattori descritti in precedenza. In particolare, si rilevano due esigenze che talvolta possono apparire in contrasto. Da un lato, i modelli digitali prodotti dovrebbero costituire una registrazione esatta da tramandare alle generazioni future; in questo senso, l'obiettivo primario dovrebbe essere la creazione di dataset il più possibile accurati e affidabili poiché un giorno, potrebbero costituire l'unica testimonianza esistente dei manufatti e delle opere originali (Robin et al. 2007, Ioannides & Patias 2023). Da qui, ad esempio, il principio per cui, seppure sia essenziale determinare il grado minimo di qualità rispetto all'uso previsto, occorre sempre cercare di ottenere il miglior livello di accuratezza possibile (DCHE *Report on Basic principles and tips for 3D digitisation of cultural heritage* 2020).²⁵

D'altra parte, nonostante questa raccomandazione sia ormai condivisa dalla maggior parte degli specialisti che si occupano di documentare il Patrimonio Culturale, la possibilità di generare il più alto livello di accuratezza non è sempre un obiettivo raggiungibile. Se, ad esempio, il progetto di rilievo prevede la restituzione di un disegno in scala 1:100, mirare a una scala superiore comporterebbe, probabilmente, un aumento dei tempi di acquisizione senza che ciò sia espressamente richiesto per quel particolare caso. Ciò potrebbe generare inoltre un sovraccarico di dati da archiviare (Pfarr-Harfst 2016, Brumana 2023).

²⁴ Science Europe (2021), *Practical Guide to the International Alignment of Research Data Management*, Extended Edition. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4915862>; *Linee guida per la redazione del piano di gestione dei dati (Data Management Plan)*, Versione n.1.0 - giugno 2022 <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-dmp-docs/it/consultazione/index.html>

²⁵ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/basic-principles-and-tips-3d-digitisation-cultural-heritage>

Idealmente, ogni progetto di digitalizzazione dovrebbe mirare alla creazione di una rappresentazione ‘olistica’ dell’oggetto di interesse;²⁶ tuttavia, nella pratica, ogni campagna di rilievo spesso è frutto di un compromesso, dettato dalla complessità del contesto in cui questa si inserisce. Come accennato in precedenza, non esiste ancora uno standard accettato a livello internazionale per definire la qualità dei dettagli e l’accuratezza della digitalizzazione nel campo del Patrimonio Culturale. Per questo è ancora più importante che i risultati vengano trasmessi con trasparenza, condividendo tutte le informazioni e le conoscenze disponibili (Brumana 2023). Come ben evidenziato in Lauro & Lombardo (2023) sebbene i metadati relativi al processo di acquisizione siano citati in letteratura, essi vengono solitamente “staccati” dal modello 3D e ciò può invalidare la legittimità scientifica dell’oggetto ricostruito. Inoltre, la variabilità delle strumentazioni e delle tecniche utilizzate implica non di rado il ricorso a metodi di valutazione soggettivi; spesso, pertanto, l’unico modo per misurare l’accuratezza di un rilievo risiede proprio nella tracciabilità di ogni fase e nella ricchezza delle testimonianze registrate (Lauro, & Lombardo 2023).

A tal proposito, la matrice di classificazione proposta in Münster et al. (2016) (Fig. 1) potrebbe essere un buon punto di partenza per lo sviluppo di un paradigma di valutazione delle ricostruzioni 3D prodotte nell’ambito della ricerca umanistica. Sulla base di un’indagine condotta su 2.584 pubblicazioni, gli autori hanno cercato di individuare le caratteristiche di un tipico progetto di ricostruzione digitale dedicato a un oggetto storico. Tali caratteristiche vengono mappate attraverso un modello di correlazione basato su due elementi principali: contesto di ricerca e qualità del modello 3D. Per quanto riguarda il contesto di ricerca gli autori propongono un’ulteriore distinzione tra oggetti e obiettivi della ricerca. Tra le proprietà fondamentali degli oggetti vengono incluse la tipologia (potrebbe ad esempio trattarsi di un oggetto architettonico), proprietà generali riguardanti il suo stato (se tangibile o intangibile, statico o dinamico), data o periodo di origine e infine l’ubicazione (o nel caso di oggetti mobili l’attuale luogo di conservazione e i precedenti). Secondo lo studio, gli obiettivi della ricerca possono invece essere:

- la documentazione,
- la valutazione della coerenza delle fonti,
- la visualizzazione, intesa anche come formulazione di ipotesi o “verifica non invasiva”,
- la concettualizzazione (per definire ad esempio le funzioni delle parti di un oggetto),
- la contestualizzazione (geo-localizzazione, relazione con altri oggetti e l’identificazione di caratteristiche archetipiche),
- la simulazione (di processi o oggetti ipoteticamente possibili).

A queste categorie vengono poi aggiunti altri sei elementi chiave volti a descrivere più in dettaglio gli aspetti legati alla qualità del processo di ricostruzione; tra questi gli autori includono:

- fonti,
- qualità del modello,
- modalità di documentazione,
- dominio tecnologico,
- collaborazione.

Ognuna di queste categorie comprende al suo interno diverse declinazioni. Relativamente alle fonti, possono essere usate fonti primarie, come oggetti originali, e fonti secondarie, come testi, immagini o fonti logiche, utili a supportare l’interpretazione in mancanza di informazioni dirette; un altro aspetto significativo per la valutazione delle fonti riguarda inoltre la loro conoscenza intrinseca, cioè il loro livello di accuratezza, dettaglio e comprensibilità. Similmente la qualità del modello può essere descritta in base a fedeltà geometrica, radiometrica e temporale (segnalando eventuali

²⁶ Con il termine olistico si fa riferimento a una visualizzazione capace di trasmettere non solo il livello di accuratezza e affidabilità del modello ma anche i valori e i significati intangibili che quell’oggetto rappresenta; cfr. Brumana et al. 2019

variazioni). La documentazione fa invece riferimento ai metodi usati per descrivere il processo (registrazione del flusso di lavoro attraverso note e rapporti) e i risultati (attraverso ontologie e metadati). Il dominio tecnologico comprende naturalmente le tecniche utilizzate (ad esempio GIS, VR, BIM, CAD ecc), così come i software e il tipo di dati utilizzati e generati (come nuvole di punti, modelli poligonali, shapefile). Infine, con il termine collaborazione si fa riferimento alla scala del progetto in termini di risorse umane e finanziarie, data di inizio e fine, competenze coinvolte (Münster et al. 2016).

Come segnalato dagli autori, lo schema proposto mira a fornire un quadro per organizzare e comprendere diversi progetti di ricostruzione 3D. Al fine di valutare le possibilità di applicazione dello schema appena descritto, gli autori hanno richiesto a cinque operatori con diversi background disciplinari di utilizzare la classificazione proposta per la descrizione di progetti di ricostruzione del Patrimonio Culturale (Münster et al. 2016a); sebbene le categorie individuate siano state giudicate molto flessibili e semplici da compilare, parametri qualitativi come il livello di dettaglio o la conoscenza intrinseca sono state interpretate dai tester in modi diversi e potrebbero in tal senso necessitare di ulteriori standard o casi di “ancoraggio”. Un altro importante feedback fornito dagli operatori ha infine sottolineato la mancanza della scala spaziale, ovvero l'estensione dello spazio indagato (Münster et al. 2016a).

Nonostante le limitazioni evidenziate, la matrice formulata in questo studio offre uno strumento di classificazione molto valido, non solo per la sua praticità ma anche per la possibilità di individuare agilmente i numerosi aspetti che caratterizzano un progetto di ricostruzione dedicato a oggetti culturali. Allo stesso tempo questo schema pone alcuni interrogativi importanti, relativi alla definizione delle tipologie di oggetti da acquisire. Nell'ambito del Patrimonio Culturale tangibile esistono diversi modi per classificare gli oggetti; una disposizione comune, ripresa ad esempio nei database gerarchici sviluppati dal Getty Research Institute, vede da un lato il patrimonio monumentale o “costruito”, e dall'altro le cosiddette opere “mobili”, così chiamate per identificare le opere che possono essere spostate da un luogo all'altro.²⁷ Questa distinzione consente di classificare più facilmente i diversi scenari di impiego delle tecniche di acquisizione e le implicazioni che ne derivano in termini di procedure e strumentazioni adottate. Tuttavia, al fine di scegliere le strumentazioni e le configurazioni più adatte, sono spesso necessarie analisi più approfondite relative a caratteristiche specifiche degli oggetti di studio, riguardanti le loro proprietà geometriche e materiali.

A tal proposito, in Apollonio et al. (2021), vengono riportati una serie di parametri utili a definire queste caratteristiche (Fig. 2); le proprietà individuate, suddivise tra estrinseche e intrinseche, possono essere utilizzate per stimare il livello di complessità che caratterizza ogni manufatto. Le proprietà estrinseche riguardano:

- la distribuzione spaziale, che può esprimersi nell'equilibrio tra le dimensioni (x, y, z) o la preponderanza di una di queste rispetto alle altre (ad esempio con $x \approx y \ll z$);
- la complessità topologica, dovuta alla presenza di cavità o forti discontinuità nella forma;

²⁷ Si fa riferimento in particolare al Cultural Objects Name Authority (CONA), il quarto vocabolario sviluppato dal Getty Research Institute che contiene nomi, titoli e altre informazioni fondamentali sulle opere d'arte (2010); nel CONA le opere “costruite” sono rappresentate da “tutte le strutture o parti di strutture relativamente stabili e permanenti [...] progettate da un architetto e realizzate con manodopera qualificata”. L'espressione opere “mobili” è mutuata dal gergo giuridico e si riferisce invece a “quelle opere che sono tipicamente collocate in un deposito, hanno un numero di identificazione e possono provenire da luoghi differenti”; sono incluse in questa categoria le arti visive e altre opere culturali che sono del tipo raccolto da musei d'arte e collezioni speciali, o da un museo etnografico, antropologico o altro, o di proprietà di un collezionista privato. Infine anche vetrate, sculture architettoniche, affreschi, sculture monumentali autoportanti e altre opere di grandi dimensioni possono essere concepite come opere mobili, perché le loro caratteristiche (tipi di artisti, materiali, progetti, ecc.) hanno più in comune con le opere mobili che con l'architettura; tali opere dovrebbero in ogni caso essere collegate all'opera costruita a cui sono associate, se presente; al riguardo si veda Harpring 2020.

- i limiti spaziali che definiscono l'area di lavoro (ovvero i lati liberi e privi di ostacoli o *boundary conditions*).

Le proprietà intrinseche fanno invece riferimento al livello di dettaglio, o meglio al rapporto tra la diagonale del parallelepipedo che delimita lo spazio complessivo occupato dall'oggetto e la distanza media tra i vertici che compongono la superficie (D/d). Un altro parametro molto importante riguarda le caratteristiche della superficie, intese come comportamento dei materiali in risposta alla luce; in questo senso, l'oggetto può presentare una superficie prevalentemente opaca oppure speculare, traslucida, se non trasparente. Infine, un ultimo aspetto da considerare è quello che viene definito "rapporto di cavità" (*cavity ratio* - CR), che consente di individuare eventuali incavi di difficile acquisizione; in questo caso, se il valore dato dal rapporto tra la profondità della cavità e la larghezza della stessa è contenuto in un range tra 0 e 1, il rilievo può essere considerato relativamente semplice mentre valori superiori indicano una maggiore complessità (Apollonio et al. 2021). Problematiche simili vengono riportate in Menna et al. 2016 e in Aicardi et al. 2018.

Sebbene questa classificazione risulti in effetti funzionale alla descrizione preliminare degli oggetti di interesse, come affermato in un più recente studio promosso dalla Commissione Europea, la definizione di molti degli aspetti relativi alla complessità di un oggetto può essere solitamente formulata solo una volta che la digitalizzazione del manufatto è stata completata. In questo senso, il modello di gestione del processo di acquisizione dei dati (DAPMS) sviluppato nell'ambito dello studio promosso dalla Commissione Europea (VIGIE2020/654) propone di spostare l'attenzione dalla "complessità dell'oggetto alla complessità del modello".²⁸ Ciò significa adottare una sorta di procedimento inverso, partendo dalle specifiche tecniche dettate dallo scopo dell'attività di digitalizzazione. In questo modo il focus non riguarda più la complessità dell'oggetto reale bensì la complessità del modello prodotto, direttamente legata al processo di acquisizione ed elaborazione dei dati. Seguendo questo approccio, il rapporto fornisce una vera e propria infrastruttura di riferimento, in grado di definire e organizzare i numerosi aspetti che caratterizzano un processo di acquisizione dei dati finalizzato alla creazione di modelli tridimensionali. In particolare, in questo studio vengono individuati una serie di parametri che possono essere utilizzati per stimare la complessità e la qualità di un progetto di digitalizzazione. Tali aspetti, come si evince dal report, sono strettamente connessi l'uno all'altro e vengono mappati in due pie-chart per un totale di 15 parametri diversi (Fig. 3).²⁹

Secondo gli autori, la complessità è influenzata principalmente dalla quantità e dalla qualità di informazioni ricercate, dai vincoli finanziari, dalle difficoltà poste dalla superficie dell'oggetto e dalla posizione del monumento; essa può essere valutata in base a:

- Software (open source, commerciale, personalizzato, a seconda delle esigenze di affidabilità e compatibilità);
- Hardware (uso di strumentazioni per rilievi interni o esterni, memoria, capacità di archiviazione e potenza di calcolo delle macchine usate);
- Pre-elaborazione (ulteriori procedimenti e applicazioni per la pulizia e/o la fusione dei dati provenienti da sensori diversi);
- Requisiti degli stakeholder (limiti di tempo, budget, scopo della digitalizzazione, livello di dettaglio e luogo del rilievo);

²⁸ European Commission, Directorate-General for Communications Networks, *Content and Technology. Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: Mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines: Final Study Report*, Publications Office of the European Union (2022). <https://doi.org/10.2759/581678c>

²⁹ Come risultato dello studio, è in fase di sviluppo un'applicazione chiamata DAPMS (Data Acquisition Process Management System), che potrebbe rendere più facile per le istituzioni fornire valutazioni dei parametri proposti per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati 3D.

- Oggetto (stato di conservazione, proprietà fisiche, dimensioni, peso e permessi per il trasporto);
- Progetto (coordinamento, diritti di proprietà intellettuale, deliverables – sia in termini di tempo che di risultati - formati, standard, accuratezza, trasferibilità e conservazione a lungo termine);
- Team (esperienza, qualifiche, licenze);
- Ambiente (condizioni atmosferiche, compresi ad esempio livelli di visibilità, vento, umidità, temperatura, inquinamento dell'aria).

All'interno dello studio la qualità viene associata alle caratteristiche dei materiali (come composizione chimica, corrosione, resilienza, porosità), allo stato di conservazione (considerando ad esempio stabilità e integrità degli oggetti), all'accuratezza e alla precisione della geometria 2D e 3D (valutando la densità dei punti acquisiti, la completezza, la risoluzione); relativamente alla qualità dell'immagine vengono invece considerate le caratteristiche della texture (opacità, nitidezza, contrasto, profondità colore), caratteristiche spettrali (livelli di trasmittanza e riflettanza) e qualità della scala (grandezza del sensore e del pixel, risoluzione, distanza di acquisizione). Sono inoltre fornite indicazioni circa gli attuali limiti di registrazione delle soluzioni hardware maggiormente utilizzate e soprattutto vengono definiti i massimi livelli di risoluzione in base alle principali forme di utilizzo dei modelli; in particolare per repliche 1:1 di oggetti di piccola dimensione è possibile raggiungere una risoluzione di ~ 0.002 mm; per la replica 1:1 di oggetti di grandi dimensioni viene indicata una soglia di ~ 1 cm; infine per la visualizzazione web viene suggerito un livello di dettaglio massimo di ~ 0.2 mm per una distanza media di osservazione di 30 cm.

Questi criteri sono stati identificati prendendo in considerazione le opinioni di 420 intervistati che fanno parte della comunità rivolta alla digitalizzazione del Patrimonio Culturale; le risposte fornite rivelano punti vista spesso diversi riguardo ai concetti di qualità e complessità andando talvolta oltre le classiche considerazioni relative al budget o alla precisione e all'accuratezza dei dati. Per quanto riguarda il concetto di qualità, una prospettiva ricorrente che emerge dallo studio riguarda la gestione dei dati prodotti e la possibilità di integrarli in un unico archivio di facile accesso e visualizzazione. In più di un caso la qualità viene ricondotta alla possibilità di eseguire dei confronti tra diversi modelli 3D sapendo in base a quali standard o protocolli sono stati creati.

Nell'ambito della ricerca vengono sollevate, dunque, questioni relative anche alla conservazione dei dati, alla registrazione di metadati e paradatai, all'interoperabilità dei formati, nonché alla definizione di standard per l'elaborazione e la rappresentazione dei risultati. Anche in questo caso, al fine di valutare l'applicabilità del modello elaborato, i parametri individuati sono stati considerati nel contesto di 43 casi studio; l'allegato 2 del rapporto contiene una selezione dei progetti più significativi, scelti per fornire degli esempi di applicazione delle pie-chart messe a punto dal gruppo di studio. In particolare vengono descritti sei progetti (tre per oggetti mobili e tre per oggetti immobili); le tabelle riportate nell'allegato permettono di identificare subito la maggior parte degli aspetti essenziali dei progetti, inclusi specifici margini di incertezza e risoluzione. Tuttavia non vengono fornite informazioni relativamente alla documentazione storica, alle licenze (IPR) e alle modalità di archiviazione dei dati.³⁰

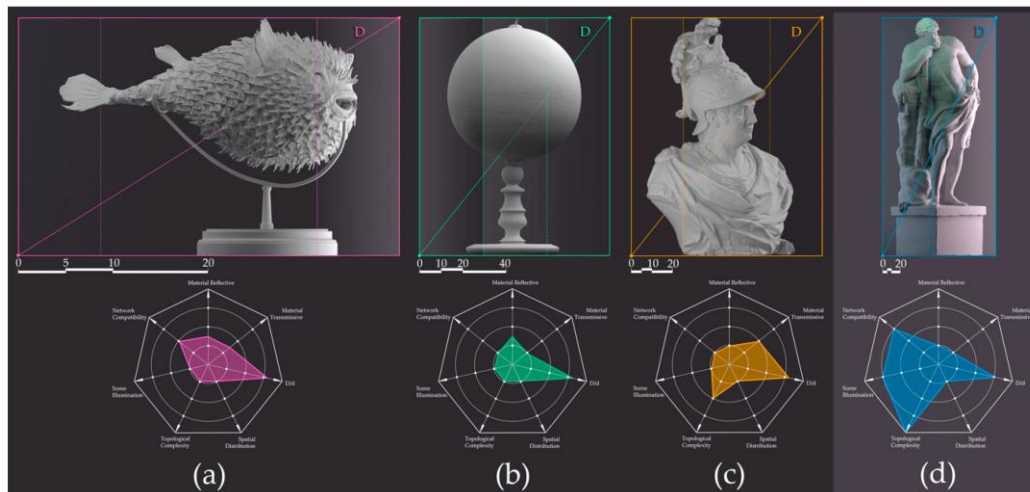
Dall'analisi comparativa degli approcci descritti, emergono sia elementi di convergenza che lievi differenze, dovute alle diverse prospettive adottate. Il modello proposto da Münster et al. 2016 si focalizza prevalentemente su aspetti legati alla ricerca umanistica, attribuendo particolare importanza alla qualità delle fonti storiche e al contesto di ricerca. Questo approccio valorizza le

³⁰ European Commission, Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: Mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines: Annex 2 – Exemplifications of Complexity, Publications Office of the European Union (2022).

caratteristiche storico-culturali dell'oggetto, come la sua origine, la tipologia, ponendo enfasi sulla fedeltà e sulla coerenza delle informazioni utilizzate. I parametri individuati in Apollonio et al. 2021, invece fanno specifico riferimento alle proprietà fisiche dei manufatti reali, nonché allo spazio di lavoro. Infine, lo schema DAPMS adotta un approccio di natura più operativa, all'interno del quale viene evidenziata l'importanza, ad esempio, delle specifiche hardware-software così come dei parametri di valutazione della qualità del modello finale (ad esempio densità di punti, precisione e accuratezza geometrica, risoluzione). In tal senso ciascuno di questi approcci offre un contributo importante e la loro integrazione permette di osservare gli oggetti acquisiti considerando la loro natura storica, fisica e virtuale.

Category	Project 5: Freiberg Cathedral – First Coder (involved)	Project 5: Freiberg Cathedral – Second Coder (not involved)
Sources		
Type of source	remains, terrestrial laser scans, photographs, texts, pictures, plans	physical/ material evidence, iconographical interpretations
Inherent knowledge	primary source: remaining late Gothic building from ~1500 and several other remaining objects, lost building from 1180 secondary historical sources: pictures, photographs, plans secondary contemporary sources: photographs, plans, texts, architectural investigations by e.g., Magirus (1972)	primary source
Model quality		
Geometrical fidelity	LOD3 for exterior of both buildings, Simplified reconstruction of interior, Detailed modeling of relevant objects	very accurate due to 3D scanning technology (exact measurements or fidelity data not available)
Radiometric fidelity	generalized color scheme	non color scan
Temporal fidelity	9 different models with no temporal changes within one model	one state, no changes
Documentation		
Process doc.	textual within student assignment	further documentation besides text and images not available on the website
Results documentation	not indexed by metadata	unknown
Technology		
Technological domain	VR modeling based on acquired data and plans/pictures	semi-automated genesis on the basis of scan data; manual rework for illustrational purposes.
Model genetic workflow	human-driven modeling of obstacles, semi-automated for triangulation of point clouds (ceiling, Goldene Pforte [Golden Portal]), photo texture for ceiling	unknown
Tools	RiScanPRO, FARO SCENE, Maxon Cinema 4D	most probably polygon model based on point cloud.
Geometry data type	polygon models	semi-automated genesis on the basis of scan data; manual rework for illustrational purposes.
Project Cooperation		
Project scale	~400 man hours for acquisition, modeling and output	3 university professors, unknown number of technical professionals and a group of students
Project dates	2014	April 1, 2014 – September 30, 2014
Involved Competencies	art history, linguistics, geodesy, cartography	art history, German studies, geodesy, cartography, 3D design
Historic Site		
Original Location	Freiberg, Germany	Freiberg, Saxony, Germany
Time of origin	1180–2014	around 1225-1230, deconstructed and rebuilt at the end of 15 th century
General object properties	(partially) no longer extant tangible object	tangible object
Type of object	building, building parts and smaller objects (e.g., pulpit)	sculpting and stonemasonry, sandstone, original color lost
Research context		
Research function	visualization, conceptualization of functions	visualization, illustration of iconography and architectural concepts process investigation (change of use of buildings and devastation due to WWII)

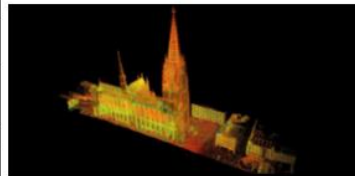
Figura 1 - Münster et al. 2016



Collection Pieces	D/D Ratio	Cavity Ratio (CV)	Material Reflective	Material Transmissive	Texture	Topological Complexity (TC) (TC)	Spatial Distribution (SC) (SD)	Boundary Condition (BC)	Preesence of Movable Parts	Score
(a) Hercules	1527.15	<1 (1)	Lambertian (1)	Opaque (1)	Even distribution (1)	4 hole (5)	3D (1)	3 sides free (3)	No (1)	14
(b) Porcupine fish	2404	<1 (1)	Mixed (1), (2), (3)	Opaque (1)	Even distribution (1)	0 hole (1)	3D (1)	5 sides free (1)	One degree of freedom (rotation) (2)	9-11
(c) Horn d'Arturo Globe	322.5	<1 (1)	Dielectric (2)	Opaque (1)	Even distribution (1)	0 holes (1)	3D (1)	5 sides free (1)	One degree of freedom (rotation) (2)	10
(d) Marsili bust	2536	<1 (1)	Dielectric (2)	Translucent (2)	Even distribution (1)	1 hole (2)	3D (1)	5 sides free (1)	No (1)	11

Figura 2 - Apollonio et al. 2021

COMPLEXITY		Cologne Cathedral	
Stakeholder	Object type	Immovable	
	Dimension	145x86x157 metres	
	Purpose of 3D digitization	Detailed interior and exterior recording	
	Location	UNESCO Site Cologne Cathedral, Cologne, Germany	
	Type	Terrestrial	
Object		Immovable touchable	
Project		Study	
Team		High experience in scanning Professional climbing Amateur ground staff	
Environment		Typical urban conditions	
Hardware		Phase-shift Scanner, HDR RGB camera, DSLR camera	
Software		Multiple commercial off-the-shelf	
Pre-processing		Multi images point cloud and 3D meshes	
QUALITY			
Geometry	2D		
	3D, accuracy	<10 cm	
	3D, precision	<1 cm	
	3D, resolution	High/variable	
	Number of points	53+ billion (+/-)	
Image	Texture	High/medium	
	Scale	1:1	
	Spectral	Visible	
Material		Sandstones Concrete, brick, wood, glass, metal (plomb, copper, etc.)	
Structural health monitoring		High	



Copyright by Douglas Pritchard



Copyright by Douglas Pritchard

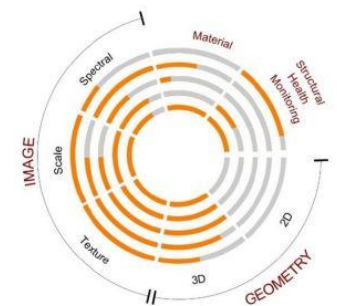


Figura 3 - Caso di applicazione dello schema DAPMS 2022

1.2 Strumenti e schemi di ripresa

I parametri appena descritti rappresentano alcune delle criticità più frequentemente incontrate nel rilievo dei beni culturali, la cui complessità richiede spesso soluzioni ad hoc per ottenere un'elevata accuratezza geometrica (Girelli et al. 2019).

Per quanto riguarda la distribuzione e la risoluzione spaziale, non è raro incontrare oggetti caratterizzati da scarsa omogeneità e da dettagli minuti. Alcuni casi esemplari sono in questo senso gli oggetti prevalentemente planari rappresentati da prospetti di edifici, superfici decorate (musive, affrescate o dipinte) o modellate (bassorilievi); per tali oggetti è in genere possibile utilizzare una configurazione mutuata dagli schemi di acquisizione stereoscopica ad assi paralleli, prevalentemente usata per la mappatura del territorio e per la generazione di ortofoto (Spanò 2012, Lo Brutto 2016, Menna et al. 2016, Angheluță et al. 2019, Cutugno et al. 2022). Come dimostrato, questa configurazione oggi può essere integrata con una serie di immagini oblique per aumentare l'accuratezza e consentire una più completa copertura del soggetto (Wackrow & Chandler 2008, Aicardi et al. 2016, Ahmed et al. 2022). Le immagini oblique si rivelano infatti utili per ridurre le zone d'ombra in cui l'acquisizione dei dati risulta più difficoltosa, soprattutto quando si tratta di oggetti complessi (Cutugno et al. 2022).

Dal punto di vista delle dimensioni e degli ostacoli fisici che possono sfavorire il lavoro di acquisizione, i rilievi condotti su larga scala, come quelli dedicati agli edifici storici o alla mappatura di siti archeologici, costituiscono forse i casi più complessi da affrontare; fattori ambientali come le condizioni meteorologiche e la presenza di vegetazione possono infatti influire sull'accuratezza dei risultati o in alcune circostanze rendere impossibile il rilievo di alcune parti dell'oggetto di interesse (Rahman et al. 2019). In termini di acquisizione fotogrammetrica, uno degli approcci comunemente utilizzati prevede l'uso di Sistemi a pilotaggio remoto (SAPR), i quali consentono di documentare ampie aree di interesse in tempi relativamente brevi e di coprire altezze e punti di osservazione difficilmente raggiungibili con camere terrestri (D'Eredità 2020, Kovanič et al. 2023). Relativamente al flusso di lavoro, come già affermato, i protocolli sottolineano anzitutto l'importanza della pianificazione dello schema di volo, che permette di stimare in anticipo aspetti essenziali come il livello di dettaglio, il grado di sovrapposizione tra i fotogrammi e di conseguenza i tempi necessari al completamento della missione (Eisenbeiss 2009, Nex & Remondino 2014, Federman et al. et al. 2017, Murtiyoso 2017). Uno dei primi requisiti che occorre stabilire è la risoluzione spaziale delle immagini; nell'ambito della fotogrammetria aerea essa viene indicata come impronta a terra (*Ground Sampling Distance* – GSD) e dipende dal rapporto tra la lunghezza focale, la distanza di volo e la grandezza del sensore usato per l'acquisizione (Bedford 2017, D'Eredità 2020).³¹ Come accennato in precedenza, lo schema di presa va stabilito in base al caso specifico; ad esempio, per i progetti che prevedono l'acquisizione di interi edifici o complessi architettonici, oltre a effettuare riprese con camera nadirale e obliqua, può essere utile eseguire dei voli ravvicinati attorno all'area o all'oggetto di interesse (Wenzel et al. 2013, Chiabrando et al. 2019, Luhmann et al. 2020). Schemi analoghi vengono descritti anche nel protocollo proposto nell'ambito del progetto BeArcheo.³² In particolare vengono elencati quattro possibili scenari di acquisizione:

³¹ Si tratta della distanza misurata a terra tra due pixel adiacenti nell'immagine (Stylianidis et al. 2016). Il calcolo della GSD può essere applicato anche in presenza di variazioni di scala ma è necessario impostare la distanza del dettaglio più lontano che si intende acquisire, altrimenti alcune porzioni potrebbero non essere visibili. Federman 2017

³² BeArcheo (*Beyond Archaeology*) è un progetto iniziato nel 2019 supportato da finanziamenti del programma Horizon 2020 dell'Unione Europea e dedicato all'analisi di tumuli funerari di epoca Kofun; si tratta di un'iniziativa portata avanti da un consorzio di numerosi ricercatori europei (Università di Torino, Università di Lisbona, IRIAE) privati (TecnArt, Terra-Marine e Visual Dimension) e dall'Università di Okayama, in Giappone <https://bearchaeo.unito.it/omeka-s/s/bearchaeo-resources-site/page/welcome>

- 1) Acquisizione in linea retta, prevalentemente adottata per facciate di grandi edifici e basata su un sistema di ripresa parallela con asse della camera perpendicolare alla struttura;
- 2) Acquisizione “a spirale”, che consiste nel mantenere la camera orientata verso un punto focale, prima ruotata perpendicolarmente e poi con successive inclinazioni di 45° e 75°;
- 3) Acquisizione aerea, una variante del tipo a linea retta ma con orientamento della camera nadirale;
- 4) Acquisizione verticale, ancora una variante dello schema ad assi paralleli ma utilizzata per rilievi che si sviluppano in altezza e per i quali è spesso necessario l’uso di un drone (Lauro & Lombardo 2023).

Altro parametro da considerare riguarda il grado di sovrapposizione tra le immagini; la distanza tra uno scatto e l’altro (*baseline*) dovrebbe essere sia abbastanza ampia da evitare intersezioni con angoli di parallasse molto piccoli, sia sufficientemente elevata da garantire il riconoscimento dei punti omologhi sulla superficie dell’oggetto (Remondino & El-Hakim 2006, Eltner & Sofia 2020). Nelle guide e nei casi studio esaminati tale percentuale di sovrapposizione è solitamente compresa in un range tra il 60-80% o più per le prese trasversali e il 50-70% per quelle longitudinali (Kingsland 2020, Lehoczy & Abdurakhmonov 2021, Cutugno et al. 2022). Per ridurre la propagazione di errori sistematici può essere inoltre utile acquisire l’area di interesse da distanze diverse così da registrare una maggiore varietà di informazioni per il futuro lavoro di calibrazione (Micheletti et al., 2014).

Sempre in riferimento alle procedure adottate in fase di acquisizione, un ulteriore passaggio riguarda l’inserimento e la misurazione di punti di controllo nella scena da rilevare; in questo modo è possibile allineare e scalare correttamente il modello (Federman et al. 2017, Kovanič et al. 2023). La precisione e la distribuzione dei dati di riferimento, cioè dei punti di controllo a terra (GCPs) e dei punti di controllo (CPs) non implementati durante la regolazione fotogrammetrica, sono importanti per garantire e controllare la qualità del modello finale (Eltner & Sofia 2020).³³

Solitamente per ottenere un buon grado di accuratezza e al contempo fornire una copertura adeguata, i dati prodotti con i sistemi fotogrammetrici vengono integrati con metodi di misurazione convenzionali come Stazione Totale o il Sistema Globale di Navigazione Satellitare (Global Navigation Satellite System - GNSS); anche i dati acquisiti con Laser Scanner Terrestre (*Terrestrial Laser Scanner* – TLS) possono essere usati per produrre delle misure di controllo e aumentare la qualità del progetto di rilievo (Klapa et al. et al. 2017, Murtiyoso & Grussenmeyer 2017, Orihuela & Molina-Fajardo 2020). Riguardo all’integrazione di tecnologie fotogrammetriche e TLS, diversi lavori confermano che l’unione delle due metodologie consente di ottenere una precisione geometrica costante e, al contempo, texture ad alta definizione per una rappresentazione fotorealistica degli oggetti di interesse (Remondino 2011, Klapa et al. 2017, Piemonte et al. 2018, Girelli et al. 2019, Bruno et al. 2022). Naturalmente, la complessità che caratterizza tali rilievi necessita di una pianificazione e una gestione dei flussi di lavoro particolarmente accurata; gran parte dei progetti di digitalizzazione condotti su larga scala richiedono spesso l’intervento di numerosi specialisti e infrastrutture adeguate; per far fronte a queste esigenze, nell’ultimo decennio il settore dell’architettura, dell’ingegneria e dell’edilizia (AEC) ha adottato, non a caso, lo standard dell’*Heritage Building Information Modeling* (HBIM).³⁴

³³ Il numero e i metodi di misurazione dei punti di controllo possono variare in base alle necessità e alla complessità dell’oggetto da rilevare; se si desidera utilizzare i punti di controllo per affinare l’allineamento del blocco fotogrammetrico quattro punti di controllo a terra sono considerati il minimo, rilevando inoltre misure aggiuntive (*Control Points* – CPs) per verificare l’accuratezza. Bedford 2017

³⁴ La Direttiva UE (EUPPD 24/2014) sugli appalti pubblici ha chiesto ai 28 Paesi dell’Unione Europea di adottare la “modellazione informativa degli edifici” entro febbraio 2016 per supportare l’intero LCM (*Life Cycle Management*).

In generale, ogni progetto finalizzato al monitoraggio e alla conservazione di un monumento richiede la combinazione di strumentazioni e competenze diverse, comprese quelle specializzate nelle analisi diagnostiche; tali rilievi mirano infatti alla creazione di modelli 3D molto accurati, sulla base dei quali possono essere condotti, ad esempio, analisi strutturali o lavori di restauro (Garzia et al. 2015, Girelli et al. 2019). In letteratura è molto raro trovare procedure di rilievo dedicate a monumenti di ingenti dimensioni basati sull'uso delle sole immagini come input. A titolo di esempio, nei casi studio riportati nelle linee guida pubblicate da 3D-ICONS, tra i 28 progetti di digitalizzazione descritti nella seconda parte del documento, solo 8 sono basati sull'uso esclusivo di macchine fotografiche, senza il supporto di altra strumentazione; di questi soltanto 2 sono dedicati a edifici (un'abbazia e un santuario).³⁵

Sebbene le regole e i principi seguiti per la documentazione di strutture di grandi dimensioni possano essere estesi anche all'acquisizione di oggetti più piccoli o "mobili" (Wenzel et al. 2013), per questi ultimi l'uso della sola camera, come principale strumento di lavoro, risulta più frequente; come affermano alcuni autori, la fotocamera di un telefono e un computer dotato di una scheda grafica di fascia media sono di base sufficienti per produrre ed elaborare manufatti di piccole dimensioni (Rahaman 2021). Le minori dimensioni in effetti consentono di circoscrivere l'oggetto entro una rete di immagini molto densa e ravvicinata, utile a rafforzare la geometria di presa per la successiva fase di allineamento del blocco fotogrammetrico; la configurazione e la geometria delle immagini risultano particolarmente importanti, soprattutto se si desidera ottenere dei risultati accurati sfruttando i processi di calibrazione automatica disponibili nei software di ricostruzione fotogrammetrica (Remondino & Fraser 2006, Menna et al. 2016, Eltner & Sofia 2020, Luhmann et al. 2023).³⁶ Inoltre, la possibilità di muovere gli oggetti permette spesso di adottare strategie di ripresa in grado di rendere il processo di digitalizzazione più fluido e omogeneo. Una pratica comune è ad esempio quella di collocare l'oggetto sopra una base rotante (*turntable*) e mantenere la camera fissa durante l'acquisizione; questo approccio può essere molto efficiente e consente di catturare gli oggetti in modo controllato e uniforme (Lauria et al. 2022, Tang et al. 2022, Barzaghi et al. 2024). Tuttavia, la maggiore vicinanza della camera può comportare problemi di messa a fuoco e profondità di campo (DoF); pertanto la necessità di ottenere lo stesso grado di definizione per ogni area dell'oggetto comporta spesso la rinuncia a ottenere una più alta risoluzione sul singolo dettaglio (Guery et al. 2018, De Paolis et al. 2020). Ciò si verifica per lo più nel caso di oggetti di dimensione molto ridotta, per i quali vengono spesso utilizzate ottiche macro e tecniche di *focus stacking* (Clini et al. 2016, Marziali & Marziali 2019, Antinozzi et al. 2020).³⁷

Per quanto riguarda oggetti come sculture e altri manufatti monumentali, nonostante questi possano essere considerati come opere mobili per le modalità di realizzazione e per il fatto che talvolta possano essere "liberati" dalla loro posizione abituale, ad esempio per motivi di restauro (Harpring 2010, Menna et al. 2016), da un punto di vista degli strumenti e delle procedure adottate, si possono

Direttiva 2014/24/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 26 febbraio 2014, sugli appalti pubblici e che abroga la direttiva 2004/18/CE Testo rilevante ai fini del SEE GU L 94 del 28.3.2014, p. 65–242

ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/24/oj>

³⁵ Il progetto 3D-ICONS è stato finanziato nell'ambito del Programma di sostegno alle politiche ICT della Commissione europea. <http://3dicons-project.eu/guidelines-and-case-studies/guidelines>

³⁶ Lo scopo della calibrazione della telecamera è quello di determinare con esattezza la geometria del sistema di ripresa adottato (sensore-camera-obiettivo) in modo che sia possibile confrontarlo e adattarlo al modello ideale basato sulla proiezione centrale. Per eseguire una ricostruzione dell'oggetto più accurata è in tal senso necessario calcolare i parametri interni della camera. Tali parametri riguardano la distanza principale, le coordinate (e quindi l'offset) del punto principale e le distorsioni introdotte dall'obiettivo e dalla non planarità del sensore (Remondino & Fraser 2006, Stylianidis 2016, Luhmann et al. 2023 Durgut & Maras 2023); i valori possono essere calcolati prima dell'acquisizione, mediante diverse procedure effettuate su un campo di prova, o durante l'acquisizione, sostituendo il campo di prova con l'oggetto stesso. Per una panoramica sui metodi di calibrazione si rimanda a Stylianidis et al. 2016 e Luhmann et al. 2023.

³⁷ Il *focus stacking* è una tecnica fotografica che consiste nell'acquisire una serie di immagini a diversi piani di messa a fuoco per ogni posa della fotocamera in base a una determinata apertura del diaframma. Ray 2002.

cogliere forse maggiori analogie con gli approcci adottati per i rilievi su larga scala. Ciò è dovuto a una diversa concezione del progetto di rilievo; la difficoltà di variare il contesto di acquisizione costringe infatti l'operatore ad adattarsi all'opera, la quale solitamente pone maggiori limiti per quanto riguarda lo spazio di lavoro e richiede consistenti risorse per essere illuminata, misurata ed acquisita correttamente (Guidi & Atzeni 2004, Menna et al. 2016, Luhmann et al. 2023).

È bene sottolineare, tuttavia, che una rigida classificazione dei contesti e degli approcci adottati, soprattutto nel campo dei Beni Culturali, oltre a essere poco fruttuosa risulta quasi impossibile poiché, come detto, ogni oggetto è a sé stante così come il progetto in cui viene condotta la sua digitalizzazione. Vi sono però alcuni aspetti che dovrebbero essere considerati in ognuno degli scenari descritti. Ad esempio, anche nella fotogrammetria dedicata a oggetti museali, prevedere la risoluzione finale della texture può essere un elemento importante in termini di stima della qualità del modello (Stylianidis et al. 2016, Menna et al. 2016). In questo senso, gran parte delle pubblicazioni dedicate alla valutazione delle procedure image-based continuano a sottolineare, nonostante possa risultare scontato, l'importanza della qualità delle immagini (Es Sebar et al. 2020, Eltner & Sofia 2020); quest'ultima dipende da una serie di fattori che comprendono le caratteristiche del dispositivo stesso (come la grandezza del sensore, la profondità del colore, il sistema di lenti utilizzato), i parametri adottati in fase di acquisizione (ISO, Diaframma, Tempi di Scatto) e la distribuzione dei punti di controllo (Moyano et al. 2020). Inoltre, affinché le immagini possano essere utilizzate per produrre modelli 3D di alta precisione è necessario in ogni caso che i processi di ricostruzione vengano combinati con misure topografiche o empiriche molto accurate (Lopez et al. 2018). Come accennato, un aspetto che va attentamente considerato riguarda la pianificazione e l'uso in fase di acquisizione di un sistema di controllo che consenta, una volta effettuate le riprese, di verificare le accuratèzze ottenute e stimare il grado di incertezza dei dati raccolti. Per ottenere una maggiore precisione possono essere impiegate procedure di calibrazione della camera basate su matrici planari o preferibilmente 3D con punti oggetto noti e ben distribuiti (Remondino & Fraser 2006, Luhmann et al. 2016, De Paolis et al. 2020, Luhmann et al. 2023).

Le procedure di calibrazione possono essere eseguite prima oppure durante l'acquisizione vera e propria; in entrambi i casi, affinché sia possibile ottenere delle stime accurate, è necessario prestare attenzione ad alcuni aspetti. Le regole da seguire per una corretta calibrazione della camera generalmente comportano la ripresa di una matrice di calibrazione con punti oggetto chiaramente definiti (ad esempio attraverso target codificati) e dalle posizioni note; tali punti dovrebbero essere distribuiti in modo uniforme in tutte le dimensioni e poi acquisiti variando l'angolazione e la rotazione di alcune immagini intorno all'asse ottico ($\pm 90^\circ$). La geometria di acquisizione dovrebbe essere caratterizzata da un'alta convergenza, con buoni angoli di intersezione e possibilmente adottando diverse distanze di ripresa; in ogni caso, al fine di determinare parametri di distorsione validi per ogni parte del fotogramma, è bene riprendere i punti di riferimento occupando l'intero formato dell'immagine. In questo modo dovrebbe essere possibile stimare con una buona accuratezza i principali parametri del sistema di imaging utilizzato.³⁸

Nonostante i software basati su algoritmi SfM consentano di stimare automaticamente i parametri interni della camera senza bisogno di target artificiali o griglie di calibrazione, è buona pratica valutare la qualità della ricostruzione con valori di riferimento indipendenti dalla scena (*Ground Truth*) (Luhmann et al. 2023, Durgut & Maraş 2023). Il metodo Zhang è forse uno dei più noti e prevede l'uso di una scacchiera planare composta da due serie di linee parallele perpendicolari tra loro; l'immagine viene fotografata da diverse prospettive per determinare i parametri della camera e i coefficienti di distorsione dell'obiettivo (Zhang 2000). Alcuni approcci recenti propongono l'uso

³⁸ L'introduzione di almeno un'informazione di scala lungo la direzione di osservazione permette di stimare la distanza principale c (ovvero la distanza tra il centro prospettico della camera e il piano di proiezione) mentre i diversi orientamenti sono utilizzati per determinare le coordinate dei punti principali x_0 e y_0 (ovvero la proiezione del centro prospettico sull'immagine). (Remondino 2006, Stylianidis 2016, Luhmann 2016, Luhmann 2023).

di target bidimensionali in cui ogni bersaglio è circondato da una banda di codice univoca che consente l'identificazione del target con una precisione inferiore al pixel (Yu et al. 2022). In altri casi viene invece proposto l'uso di oggetti e strutture con coordinate note ("test field") appositamente creati sia per calibrare i modelli sia per verificare l'accuratezza dei dati ricostruiti (Apollonio et al. 2021; si veda in particolare Es Sebar et al. 2020).

Come sottolineato da diversi autori, se da un lato la diffusione di macchine fotografiche digitali e strumenti software automatici, rende i processi di ricostruzione image-based ampiamente accessibili, dall'altro ciò ha introdotto una serie di problemi legati al controllo e all'affidabilità delle elaborazioni (Remondino et al. 2017, Es Sebar et al. 2020). Le questioni sollevate riguardano in particolare la possibilità di generare rappresentazioni basate su elevato realismo ma caratterizzate al contempo da informazioni metriche errate; tale preoccupazione riguarda talvolta anche la scarsa chiarezza delle procedure di calcolo adottate da diversi programmi, i quali possono produrre stime di accuratezza poco veritiere e portare gli utenti meno esperti a sovrastimare la qualità degli output prodotti (Luhmann et al. 2016, Remondino et al. 2017, Eltner & Sofia 2020, Durgus & Maras 2023). Sebbene si riconosca che tali soluzioni stiano gradualmente raggiungendo standard di qualità elevati, si rileva tuttavia la mancanza di schemi condivisi per la comunicazione dei risultati (Remondino et al. 2017, Lauro & Lomardo 2023). Per queste ragioni si prenderà ora in esame il processo di elaborazione con l'obiettivo di individuarne in modo rigoroso e sistematico le diverse fasi della ricostruzione fotogrammetrica e le procedure tipiche utilizzate dai software *Structure for Motion* (SfM).

1.3 Elaborazione dei dati raccolti

Le tecniche scelte per il processamento delle immagini possono influire in maniera decisiva sulla qualità dell'output finale (James et al. 2019). Al fine di garantire che i dati raccolti siano processati in modo appropriato, la selezione dei sistemi di elaborazione dovrebbe essere effettuata con attenzione, considerando le specifiche caratteristiche del dataset acquisito (Menna et al. 2016, Eltner & Sofia 2020, Verykokou & Ioannidis 2023).

La tipica pipeline di ricostruzione 3D può essere generalmente suddivisa in due parti principali: l'orientamento dell'immagine (la cosiddetta Structure from Motion - SfM) e la corrispondenza delle immagini dense (spesso chiamata Multi-View Stereo - MVS) (Remondino et al. 2014; Furukawa e Hernandez 2015). Gli algoritmi SfM si riferiscono alla stima della posa della fotocamera e alla generazione di nuvole di punti radi basate sul rilevamento accurato e sulla corrispondenza di caratteristiche omologhe dell'immagine. Gli algoritmi MVS si occupano invece dell'ultima parte del flusso di lavoro, con l'obiettivo di generare una nuvola di punti densificata attraverso la corrispondenza a coppie o multi-vista di ogni pixel delle immagini e la successiva triangolazione nello spazio 3D (Stathopoulou & Remondino 2019).

Oggi i software sviluppati per l'elaborazione fotogrammetrica si avvalgono di tecniche di analisi avanzate, basate sull'integrazione di molteplici algoritmi in grado di estrarre e mettere in relazione le corrispondenze rilevate su un elevato numero di immagini (Stentoumis 2017, Sinha 2021, Rong et al. 2021). La maggior parte di queste soluzioni si basa su procedure di ricostruzione SfM e permette di stimare le coordinate 3D dell'oggetto o della scena di interesse anche in assenza di immagini pre-calibrate (Remondino et al. 2017, Aicardi et al. 2018, De Paolis et al. 2020, Rahaman 2021, Verykokou & Ioannidis 2023). Come già anticipato, se l'oggetto è stato acquisito adottando una geometria di ripresa adeguata, i parametri della fotocamera e dell'obiettivo possono essere

calcolati automaticamente durante la fase di allineamento come parte della matrice di proiezione di ogni immagine (Luhmann et al. 2016).³⁹

Secondo la letteratura di riferimento, la combinazione degli algoritmi SfM e delle procedure fotogrammetriche basate sulla regolazione del fascio (*Bundle Adjustment* - BA) consente di recuperare con una buona accuratezza sia la posa che i parametri interni della maggior parte delle camere utilizzate oggi per le acquisizioni image-based (Remondino & Fraser 2006, Luhmann et al. 2016, Aicardi et al. 2018). In questo modo, le immagini di ingresso, prima di essere utilizzate per la corrispondenza *Multi-View Stereo* (MVS), possono essere modellate rimuovendo gran parte delle deviazioni introdotte dal sistema di imaging (Sinha 2021). In mancanza di punti di riferimento noti, il sistema può utilizzare anche i metadati EXIF, come la lunghezza focale e la dimensione del sensore, per calcolare le deviazioni in modo automatico; questi dati forniscono un'approssimazione dei valori relativi alla distanza principale e alla grandezza del pixel favorendo l'analisi preliminare della geometria e della struttura delle immagini (Bianco et al. 2018, Lehoczky, M., & Abdurakhmonov, Z. 2021, S. Peña-Villasenín et al. 2020, Zhou 2024).

In genere il processo di ricostruzione SfM-MVS inizia con l'estrazione in ogni immagine dei punti di interesse (o regioni che possono essere costituite anche da linee o aree) per i quali vengono calcolati dei descrittori che permettono di abbinare alcune delle caratteristiche rilevate sulla base di misure di somiglianza (Stentoumis 2017, De Paolis et al. 2020). Il rilevamento dei punti caratteristici viene solitamente eseguito con algoritmi molto robusti, in grado di gestire variazioni di rotazione, prospettiva e scala: SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) elabora le immagini introducendo una sfocatura gaussiana che permette di individuare variazioni di intensità significative, date ad esempio da bordi o altri elementi distintivi, mantenendo i punti che si rivelano più stabili. Si tratta di uno degli operatori maggiormente diffusi e più precisi, tuttavia, come segnalato in diversi studi, richiede una grande quantità di calcoli e di memoria (Alcantarilla 2013, Liu et al. 2018 et al. Rong et al. 2021).⁴⁰ SURF (*Speeded-up Robust Features*), e FAST (*Features from Accelerated Segment Test*) mirano a un'estrazione delle feature più rapida mantenendo una buona gestione dei cambiamenti di scala e rotazione (Rong et al. 2021, Zhou 2024). FAST, in particolare, è un rilevatore di angoli ad alta velocità che permette di escludere un elevato numero di caratteristiche classificando come angoli solo i punti circondati da un sufficiente numero di pixel con maggiore o minore intensità luminosa; può essere quindi utile per il riconoscimento in tempo reale, ad esempio per l'estrazione di feature da flussi video, ma risulta meno robusto davanti a elevati livelli di rumore (Rosten 2006). L'algoritmo di Harris è un rilevatore classico usato per identificare variazioni locali nella scala dei grigi attorno a ciascun pixel; tuttavia, almeno nella sua versione originale, risulta meno performante rispetto alle variazioni di scala e tende a estrarre i punti con brusche variazioni nel gradiente (Liu et al. 2018, Wu & Feng 2019). Altre soluzioni che rappresentano un buon compromesso tra velocità e precisione sono ad esempio gli algoritmi BRISK (*Binary Robust Invariant Scalable Keypoints*) e A-KAZE (*Accelerated-KAZE*). L'algoritmo BRISK comprende tre moduli principali: rilevamento dei punti chiave, descrizione dei punti chiave e matching dei descrittori; per il rilevamento utilizza a sua volta l'algoritmo AGAST (*Adaptive and Generic Accelerated Segment Test*), una variante più stabile di FAST che permette di individuare i possibili angoli presenti nell'immagine attraverso la costruzione di una serie di livelli piramidali ("scale space pyramid"), in cui l'immagine viene gradualmente ricampionata in scale inferiori rispetto all'originale. Dopo aver rilevato i punti più stabili, crea un descrittore binario per ogni keypoint che permette di rappresentare eventuali variazioni di intensità in scala di grigi e di identificare la direzione tipica di ogni caratteristica; infine confronta le stringhe

³⁹ Se è possibile ottenere una buona rete di telecamere, l'auto-calibrazione non dovrebbe differire dalla calibrazione su un apparecchio con target (Remondino & Fraser 2006).

⁴⁰ Il lavoro principale di Lowe su SIFT è stato pubblicato nel 2004 in un articolo intitolato "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". Lowe 2004.

prodotte per ogni punto individuato ed esegue il matching per i descrittori più simili (Leutenegger et al. 2011, Liu et al. 2018, Zhang 2024). A differenza di approcci come SIFT e SURF, A-KASE (una versione più efficiente del precedente KASE), non applica la sfocatura in modo uniforme a tutta l'immagine ma introduce un filtro di "diffusione non lineare" che tiene conto di eventuali cambiamenti di intensità prodotti da bordi o altri dettagli; in questo modo, cerca di preservare le caratteristiche più significative rendendole facilmente distinguibili anche in seguito all'introduzione di diverse variazioni di scala o rotazione (Alcantarilla et al. 2012, Alcantarilla et al. 2013).

Infine ORB (*Oriented FAST and Rotated BRIEF*) è un ulteriore algoritmo che può essere efficacemente usato per il riconoscimento dei punti caratteristici, sebbene sia valutato come meno stabile ai cambiamenti di scala (Rong et al. 2021). Si basa su una combinazione di altri operatori, utilizzando una variante di FAST per il rilevamento e una variante di BRIEF (*Binary Robust Independent Elementary Features*) per produrre dei descrittori in forma binaria; dal momento che il metodo di descrizione di BRIEF non è particolarmente stabile ai cambiamenti di rotazione, l'algoritmo è stato modificato per renderlo più robusto rispetto a questo genere di variazioni (Liu et al. 2018, Tareem & Saleem 2018, Zhou 2024). Vi sono diverse strategie per la corrispondenza dei punti rilevati; in generale se due punti hanno la medesima descrizione possono essere considerati uguali, così come se due immagini presentano una soglia di punti comuni è molto probabile che ritraggano la stessa parte della scena (Bianco et al. 2018). Una volta identificate, le corrispondenze vengono codificate come "tracce", collegando i punti di legame geometricamente coerenti (Furukawa 2015 & Hernández, Verykokou et al. 2021). La precisione con cui vengono identificate le corrispondenze tra punti nelle immagini influisce notevolmente sulla qualità della ricostruzione 3D poiché sulla base delle caratteristiche rilevate vengono stimate le relazioni geometriche tra ciascuna vista;⁴¹ poiché non tutte le corrispondenze trovate sono corrette, le correlazioni individuate vengono filtrate eseguendo una stima delle trasformazioni prospettiche attraverso metodi come RANSAC (*RANdom SAMple Consensus*) che individua e rimuove gli outlier, cioè i punti che non seguono il modello geometrico previsto; in questo modo è possibile eliminare false corrispondenze causate da rumore o occlusioni (Furukawa & Hernández 2015, Luhmann et al. 2016, Bedford 2017, De Paolis et al. 2020). Anche in questo caso sono state sviluppate delle alternative di RANSAC che permettono di ridurre i tempi di elaborazione come LO-RANSAC (Chum et al. 2003). Come accennato il risultato di questa fase è un grafo (Scene Graph), che rappresenta le relazioni tra le immagini geometricamente verificate, sulla base del quale è possibile stimare la posa di ogni camera (Bianco et al. 2018, Liang et al. 2023).

Per ricostruire l'orientamento delle immagini, i processi SfM possono seguire strategie differenti; diverse soluzioni introducono le immagini mediante un metodo incrementale, orientando prima le due immagini che presentano un elevato numero di corrispondenze o le cui posizioni possono essere registrate con un più alto grado di affidabilità, in modo da offrire un punto di partenza stabile. Dopo questa stima iniziale, vengono gradualmente aggiunte, una alla volta, ulteriori immagini, la cui introduzione comporta un aggiornamento continuo delle relazioni stabilite in precedenza (Aicardi et al. 2018, Rong et al. 2021, Verykokou & Ionnadides 2018). Si sono in realtà evidenziati alcuni limiti rispetto a questo approccio, tra cui la forte dipendenza dalla coppia di immagini iniziale e una bassa efficienza causata dalla sequenzialità del processo, il quale impedisce generalmente di condurre altre

⁴¹ In base alla configurazione con cui sono state acquisite le immagini si possono usare diversi metodi per descrivere la loro relazione geometrica; nel caso di due immagini dello stesso oggetto prese da punti di vista diversi, le posizioni relative dei punti di corrispondenza possono essere stimate sulla base dei vincoli imposti dalla geometria epipolare. La geometria epipolare di una coppia di telecamere può essere definita come la geometria proiettiva tra due viste; dipende dai parametri interni delle camere e dalla loro posa relativa ma può essere approssimata a partire da sette o più corrispondenze di punti utilizzando la matrice fondamentale (cinque o più punti per la matrice essenziale calibrata). Una volta calcolata questa geometria, possiamo usare la linea epipolare corrispondente a un pixel in un'immagine per limitare la ricerca dei pixel corrispondenti nell'altra immagine: cfr. Bianco et al. 2018, Szeliski 2022

elaborazioni in parallelo (Xu et al. 2021). I metodi globali registrano tutte le camere contemporaneamente, calcolando e ottimizzando le coordinate spaziali in un'unica interazione e separando in alcuni casi il calcolo delle rotazioni da quello delle traslazioni (Jiang et al. 2013, Wilson & Snavely 2014); tuttavia si tratta di un procedimento che può richiedere una grande quantità di memoria e può produrre risultati meno accurati con i grandi dataset utilizzati per le ricostruzioni su larga scala (Xu et al. 2021, Rong et al. 2021).

Infine, i procedimenti gerarchici scompongono il problema dell'orientamento e della creazione della nuvola rada in unità di ricostruzione parziali, procedendo poi alla fusione dei cluster ottenuti in un unico modello finale (Verykokou & Ionnadides 2023, Liang et al. 2023); diversi autori si sono concentrati su questo approccio al fine di ottimizzare il processo di fusione mentre studi più recenti propongono soluzioni ibride che consentono di velocizzare e migliorare l'accuratezza del processo di clustering (Xu et al. 2021). Come accennato, se la geometria interna della camera non è nota a priori, può essere stimata durante le procedure descritte assieme al calcolo delle coordinate dei punti; nel caso dei metodi globali ciò avviene all'interno di un processo finale di regolazione del fascio, che in questo contesto prende il nome di auto-calibrazione (Gruen & Beyer 2001, Remondino et al. 2017, Cutugno et al. 2022, Durgut & Maras 2023). Nei metodi incrementali e gerarchici, invece, l'elaborazione graduale delle immagini comporta, oltre alla regolazione finale, processi intermedi di aggiustamento locale (Verykokou et al. 2021). Al di là dell'approccio utilizzato, l'auto-calibrazione tramite procedure BA rappresenta ancora oggi uno dei metodi più utilizzati per minimizzare gli errori di riproiezione causati dall'uso di camere non-metriche o per affinare i parametri di ampi dataset debolmente calibrati (Szeliski 2022, Kamran & Pishhesari 2024).⁴²

Questo processo di ottimizzazione implica la formazione e la risoluzione di sistemi di equazioni che consentono di compensare le deviazioni dal modello ideale rappresentato dalla condizione di collinearità,⁴³ la regolazione generalmente viene eseguita con aggiustamenti ai minimi quadrati, ovvero minimizzando la media dei "residui" al quadrato dei punti omologhi osservati (Remondino & Nocerino 2017, Granshaw 2020). Il sistema viene solitamente ampliato con l'aggiunta di alcuni parametri relativi alle distorsioni introdotte dalle lenti e dai sensori impiegati; sebbene siano stati pubblicati numerosi set di parametri aggiuntivi, il modello "fisico" a 8 termini introdotto da Brown negli anni '70 (Brown 1971), viene ancora citato in letteratura come uno standard di riferimento (Lumahn et al. 2016, Remondino et al. 2017, Saponaro et al. 2020, Apollonio et al. 2021, Pepe-Costantino 2021, Durgut & Maras 2023).⁴⁴ In alcuni degli studi dedicati alle procedure di auto-calibrazione, viene evidenziato il problema legato a un'eccessiva correlazione tra alcuni di questi parametri (in particolare posizione del punto principale e distanza principale) e i parametri di orientamento esterno; in tal senso, la misura di punti di controllo indipendenti e ben distribuiti, potrebbe permettere un maggiore controllo e aiutare a compensare gli effetti prodotti dalle correlazioni (Remondino 2006, Luhmann et al. 2016). Poter verificare i valori di correlazione permette quindi di ridurre eventuali errori dovuti a una sovrapparametrizzazione, causata ad esempio dall'implementazione di parametri inadeguati o non necessari (Stylianidis et al. 2016, Eltner & Sofia

⁴² L'errore di riproiezione è la distanza euclidea tra un punto dell'immagine misurato manualmente o automaticamente e la posizione retroproiettata del punto 3D corrispondente nella stessa immagine. Remondino et al. 2017

⁴³ Le equazioni di collinearità formano la relazione tra lo spazio dell'oggetto e quello dell'immagine e affermano che un punto dell'oggetto $P(X, Y, Z)$, il centro di proiezione $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ e il punto dell'immagine $p_0(x_0, y_0)$ si trovano su una linea retta, con la rotazione della telecamera descritta da una matrice di rotazione R . Esse sono utilizzate come equazioni di osservazione nell'aggiustamento del fascio autocalibrante e sono estese da termini $\Delta x_0, \Delta y_0$ che sono funzioni di parametri aggiuntivi della telecamera. Luhmann et al. 2016

⁴⁴ Questo modello comprende, oltre ai parametri di orientamento interno della distanza principale (o lunghezza focale calibrata) e dello spostamento del punto principale (f, C_x, C_y), tre coefficienti di distorsione radiale (k_1, k_2, k_3) e i due di distorsione di decentramento (p_1, p_2); questo set può essere ulteriormente esteso includendo altri due parametri (b_1, b_2) relativi all'inclinazione assiale (non ortogonalità tra gli assi delle coordinate x e y dell'immagine) e all'incertezza sulla forma del pixel. (Stylianidis et al. 2016, Saponaro et al. 2020, Durgut & Maras 2023).

2020). Per valutare l'accuratezza delle stime prodotte dalle regolazioni eseguite le metriche interne sono in genere MSE (Mean Square Error) e RMSE (Root Mean Square Error), utilizzate per indicare la distanza tra le coordinate stimate dal BA e valori di riferimento rappresentati dai punti di controllo (CPs) (Furukawa & Hernández 2015, Aicardi et al. 2018, Granshaw 2020). Normalmente le misure di controllo dovrebbero essere ottenute tramite una tecnica di rilievo indipendente e, se possibile, in grado di produrre valori di riferimento di accuratezza superiore (ad esempio GNSS) (Remondino et al. 2017, Luhmann et al. 2023). La deviazione standard (σ) e la varianza (σ^2) forniscono invece una stima della variabilità dei punti ricostruiti rispetto alla media delle sue posizioni e viene usata come misura della precisione (Granshaw 2020, Moyano et al. 2020).⁴⁵

Una volta stabilite le caratteristiche ottiche delle camere e definite le relative pose, i dati prodotti con le tecniche SfM possono essere utilizzati come base per la ricerca e la restituzione di tutti i possibili punti contenuti nelle immagini (Bedford 2017, Eltner & Sofia 2020). Anche le tecniche usate durante questa fase ricorrono all'analisi dei valori e delle caratteristiche al fine di stabilire delle corrispondenze dense e realizzare rappresentazioni dettagliate degli oggetti acquisiti. In generale l'obiettivo è quello di produrre una funzione che descriva al meglio la forma delle superfici della scena; ciò comporta, nella maggior parte dei casi, la selezione di criteri che consentano di stabilire il grado di somiglianza tra i pixel (Szeliski 2022). Una buona parte dei metodi impiegati in questa fase ricorre a misure di coerenza fotometrica, indicate anche come "matching cost", per verificare la correlazione tra due o più viste e definire la distanza tra la camera e le regioni dei pixel inquadrati. Nello spazio immagine, questo processo produce una mappa di disparità che assegna le profondità relative a ciascun pixel dell'immagine di riferimento (Remondino et al. 2014).⁴⁶ I costi di corrispondenza più comuni includono la somma delle differenze assolute o al quadrato (SAD / SSD) e la cross-correlazione normalizzata (NCC) (Hirschmuller & Scharstein 2007). Altre funzioni di corrispondenza più efficienti, ma anche più complesse, sono l'informazione reciproca, che può gestire in modo più efficace le differenze radiometriche, e la trasformazione non parametrica delle immagini che può produrre risultati più robusti (Stentoumis 2017).

Per classificare le tipologie di algoritmi utilizzabili sono state proposte delle tassonomie basate sull'individuazione di alcuni "elementi costitutivi", la cui combinazione permette di costruire ulteriori varianti. Sulla base della tassonomia introdotta da Seitz et al. (2006), tra i prodotti degli algoritmi MVS vengono inclusi diversi tipi di rappresentazione all'interno dello spazio 3D, basati su mappe di profondità, mesh poligonali, griglie voxel e sull'espansione di feature point (Seitz et al. 2006, Stentoumis 2017, Rong et al. 2021, Shina 2021). Tra questi metodi, le tecniche basate sulla fusione delle mappe di profondità hanno dimostrato una maggiore efficienza e la capacità di garantire stime di profondità robuste (Stathopoulou & Remondino 2023). Scharstein e Szeliski (2002) hanno identificato alcune operazioni principali eseguite dalla maggior parte degli algoritmi di ricostruzione densa; le fasi prevedono il calcolo dei costi di corrispondenza seguito, in alcuni casi, dall'aggregazione dei costi e dal calcolo delle disparità finali. Per eseguire queste operazioni possono essere adottati algoritmi di matching locali, globali o semi-globali.⁴⁷

I metodi locali, generalmente utilizzano delle finestre di supporto (o patch) intorno a ciascun pixel e calcolano la disparità utilizzando i valori di intensità che producono il costo di corrispondenza

⁴⁵ Più precisamente, la deviazione standard è la radice quadrata della varianza, ovvero la media dei residui al quadrato di una variabile casuale x dal suo valore medio μ . Mentre la deviazione standard indica l'ampiezza di una variabile intorno al suo valore medio, l'RMS fornisce una misura di quanto le differenze, cioè i residui, siano in media lontani da zero (Remondino et al. 2017, Granshaw 2020).

⁴⁶ Il termine disparità è stato introdotto per la prima volta nella letteratura sulla visione umana per descrivere la differenza nella posizione di caratteristiche corrispondenti viste dall'occhio sinistro e da quello destro. Nella computer vision, la disparità è spesso trattata come sinonimo di profondità inversa e in una scena rigida indica il movimento apparente dei pixel di un'immagine all'altra: cfr. Szeliski 2002.

⁴⁷ Scharstein & Szeliski 2002, Stentoumis 2017, Shina 2021, Stathopoulou & Remondino 2023, Verykokou & Ionnadides 2023.

minore o maggiore (a seconda della misura di somiglianza utilizzata); tuttavia gli algoritmi locali solitamente si basano sul presupposto che all'interno della finestra vi siano pixel con caratteristiche uniformi e ciò può portare all'aggregazione di pixel che in realtà appartengono a piani o superfici diverse (Remondino et al. 2014, Verykokou & Ionnadides 2023, Szeliski 2022). Al contrario i metodi globali, per il calcolo delle disparità, costruiscono una funzione di energia per l'intera immagine incorporando nella formulazione vincoli di uniformità espliciti che incoraggiano i pixel vicini ad assumere valori di profondità simili penalizzando le discrepanze (Shina 2021). In tal senso normalmente non hanno bisogno di aggregare i pixel all'interno della finestra di supporto poiché risolvono il problema di ottimizzazione su una scala maggiore (Roth e Mayer, 2019, Szeliski 2022). Gli approcci semi-globali eseguono una corrispondenza tra i pixel e consentono di modellare in modo efficiente i confini degli oggetti e i dettagli (Verykokou & Ionnadides 2023). Si tratta di uno dei metodi ritenuti più performanti, nonostante vengano evidenziate alcune limitazioni relative alla sua scalabilità e alla capacità di ricostruire in maniera ottimale superfici inclinate; tale limitazione è legata al presupposto che la disparità sia costante all'interno della finestra considerata per il calcolo del costo di corrispondenza, ossia che il piano dell'immagine e il piano dell'oggetto siano paralleli (Hirschmüller 2008, Stathopoulou & Remondino 2019, Roth & Mayer 2019). Un altro limite degli algoritmi MVS evidenziato riguarda la difficoltà di trovare corrispondenze affidabili per le aree con proprietà difficili, come superfici non lambertiane o con texture poco strutturate (Stathopoulou & Remondino 2023).

In letteratura vengono riportati numerosi lavori volti ad affrontare questi aspetti problematici, anche attraverso metodi basati sull'apprendimento automatico.⁴⁸ Tra questi, le ricerche condotte su Plane-Sweep e PatchMatch vengono indicate come quelle che hanno prodotto gli avanzamenti più significativi (Rong et al. 2021, Shina 2021, Stathopoulou & Remondino 2023).

L'algoritmo Plane-sweep proietta diversi piani nella scena paralleli a una camera virtuale ipotizzando per ognuno una diversa distanza; attraverso delle omografie 2D, i pixel delle immagini adiacenti vengono riproiettati sui piani calcolando il matching cost e selezionando infine la profondità che risulta ottimale e che massimizza la coerenza tra le immagini (Shina 2021, Szeliski 2022). Più vicini ai metodi di region-growing, gli algoritmi come PatchMatch introducono uno schema di ricerca randomizzato che adatta la tecnica di propagazione iterativa per individuare le corrispondenze più vicine lungo la linea epipolare, migliorando in modo significativo la velocità di calcolo. Si tratta di un approccio introdotto inizialmente da Barnes et al. (2009) per scopi di editing delle immagini e successivamente esteso da Bleyer et al. (2011) al dominio del matching stereo; nella variante proposta da Bleyer si propone di utilizzare come finestre di supporto delle patch orientate in 3D al fine di poter approssimare in modo più coerente anche le superfici inclinate (Barnes et al. 2009, Bleyer et al. 2011).

Dopo le sue prime formulazioni, PatchMatch è stato oggetto di ulteriori studi volti a migliorare l'efficacia e la velocità dell'algoritmo originale.⁴⁹ I lavori di Adão et al. (2014) e di Schoenberger et al. (2016) affrontano i problemi derivanti da vasti dataset non strutturati adottando un metodo di campionamento simile a quello di PatchMatch; più in particolare introducono un approccio probabilistico che cerca di mitigare errori dovuti ad esempio a occlusioni, geometrie o condizioni di ripresa eterogenee. In Schoenberger et al. (2016) oltre alla stima congiunta delle mappe di profondità e delle viste più idonee per ciascun pixel, viene incorporata nel processo di ottimizzazione anche la stima delle normali di superficie (Zheng et al. 2014, Schoenberger et al. 2016). Studi più recenti si concentrano sulla gestione di aree con texture povere sfruttando l'assunzione che tali regioni siano spesso planari (Romanoni & Matteucci 2019); in altre ricerche vengono applicati dei vincoli

⁴⁸ Si vedano ad esempio Burt et al. 1995, Collins 1996, Szeliski e Golland 1999, Yang e Pollefeys 2003, Gallup et al. 2007, Barnes et al., 2009, Bleyer et al. 2011, Einecke- Eggert 2013, Sinha et al. 2014, Ranft- Strauss 2014, Scharstein et al. 2017, Huang et al., 2018; Xu-Tao, 2020

⁴⁹ Una panoramica approfondita sugli sviluppi di PatchMatch, incluse le varianti basate su CNN, viene fornita in Stathopoulou & Remondino 2023.

semantici durante la fusione delle mappe di profondità per rimuovere le possibili discrepanze tra pixel che appartengono a classi diverse (Stathopoulou & Remondino 2019).

Le mappe di profondità vengono infine fuse in una nuvola di punti o possono essere utilizzate per la creazione di rappresentazioni poligonali o volumetriche; tra i metodi più comuni per generare la superficie 3D vengono generalmente inclusi la triangolazione di Delaunay, il diagramma di Voronoi, la tecnica del “Convex Hull”, l’“a-shape” (o Alpha Shape) e la ricostruzione basata sull’algoritmo di Poisson (Stylianidis et al. 2016, Romanoni & Matteucci 2019, Verykokou & Ionnadides 2023).

Tra questi uno dei metodi più diffusi è la triangolazione di Delaunay che prevede diverse fasi:

- pre-elaborazione, durante la quale vengono eliminati i punti errati;
- determinazione della topologia globale della superficie, che permette di stabilire le relazioni tra le varie aree delle caratteristiche rilevate;
- generazione della superficie poligonale caratterizzata da mesh triangolari o tetraedi; post- processing, con la quale il modello 3D viene modificato e perfezionato (Pepe et al. 2021, Stylianidis et al. 2016).

Attraverso questa tecnica viene dunque costruito un grafo che collega i punti formando dei triangoli (nello spazio 2D) e dei tetraedi (nello spazio 3D) iscritti in un cerchio che non deve contenere ulteriori punti al suo interno (Verykokou & Ionnadides 2023); il risultato è una maglia irregolare (Triangular Irregular Network – TIN), formata da triangoli non sovrapposti e la cui somma dei lati è minima (Stylianidis et al. 2016, Guery et al. 2017).

La generazione delle superfici può inoltre essere eseguita utilizzando le mappe di profondità; si tratta di un procedimento che consente di ottenere generalmente prestazioni più efficienti poiché si basa sulle informazioni già contenute nelle immagini di input, rendendo il processo di ricostruzione meno impegnativo rispetto all’uso dei punti della nuvola densa (Verykokou & Ionnadides 2023). Sulla base della geometria ricostruita, vengono isolate le regioni delle immagini che meglio si adattano a ciascun poligono per creare infine una texture ad alto dettaglio. In questa fase ogni triangolo viene proiettato in ciascuna immagine in cui dovrebbe essere visibile; sulla base di alcuni criteri, come l’assenza di occlusioni, l’angolo di visione e la risoluzione dell’area, vengono selezionate le porzioni ottimali delle fotografie e infine a ogni vertice vengono assegnate delle coordinate specifiche basate sui vertici di ogni triangolo. In questo modo, le facce poligonali della mesh vengono convertite in un’immagine bidimensionale nota come “mappa UV” che permette di migliorare in maniera significativa il realismo della ricostruzione (De Paolis et al. 2020, Zhou 2024).

1.4 Sviluppi recenti: NeRF e GS-3D

Studi più recenti nel campo dell’intelligenza artificiale (AI) e del Deep Learning, hanno contribuito ad accrescere l’interesse per le tecniche di ricostruzione basate su immagini. Il progressivo perfezionamento degli algoritmi di computer vision e apprendimento automatico sta aprendo la strada a metodi di elaborazione basati sul rendering neurale. In questi approcci, le reti neurali vengono addestrate affinché imparino a convertire i parametri rilevati in una scena in un’immagine fotorealistica (Tewari et al. 2022). Come nel caso della fotogrammetria digitale, tali metodi permettono di generare visualizzazioni 3D a partire da alcune immagini di input; tuttavia, a differenza degli approcci tradizionali, la rappresentazione complessiva della scena si affida ai campi di radianza, generando una sintesi delle immagini di grande realismo. Si delineano due tipi principali di rappresentazioni dei campi di radianza: implicita, come NeRF, che utilizza reti neurali per un rendering accurato ma impegnativo dal punto di vista computazionale; ed esplicita, come quella

introdotta dal Gaussian Splatting (GS) che impiega strutture discrete per un accesso più rapido ai dati ma al costo di un maggiore utilizzo della memoria (Rabby, & Zhang 2024, Zhou 2024).⁵⁰

Un campo di radianza implicito descrive la distribuzione della luce in una scena senza specificarne la geometria; ciò significa che la radianza non viene memorizzata ma viene calcolata “al volo” interrogando la rete neurale per produrre una rappresentazione volumetrica continua delle forme (Chen & Wang 2024, Cai et al. 2024). I modelli neurali Radiance Field (NeRF), presentati per la prima volta da Mildenhall et al. all'European Conference on Computer Vision (ECCV) 2020 costituiscono a tal proposito una delle maggiori innovazioni introdotte nelle applicazioni di computer grafica (Gao et al. 2022). Nella sua forma iniziale NeRF rappresenta la scena come una funzione vettoriale 5D basata sulla posizione di un punto 3D e sugli angoli di visione della telecamera (x, y, z, θ, ϕ); questa coordinata 5D costituisce l'input per la rete neurale (indicata come Multi-Layer Preceptron), che produce in output il colore (r, g, b), emesso in funzione di quella posizione spaziale, e una densità volumetrica σ (Mildenhall et al. 2020, Gao et al. 2022). Invece di memorizzare l'intera geometria della scena 3D, NeRF sfrutta quindi la rete neurale per calcolare in tempo reale la rappresentazione volumetrica, approssimando i valori di colore e densità per ogni punto all'interno del relativo spazio 3D (Rabby & Zhang 2024, Chen & Wang 2024). Una volta addestrato, il modello può simulare molteplici punti di vista di una scena, anche in mancanza di fotografie che la ritraggono da ogni prospettiva. Dopo la pubblicazione dello studio di Mildenhall et al. 2020, l'interesse per i modelli NeRF è gradualmente cresciuto, registrando un numero sempre più consistente di pubblicazioni tese a migliorare la velocità e la qualità delle visualizzazioni. Tra le problematiche affrontate si registrano in particolare il sovraccarico computazionale, soprattutto nella fase di addestramento e la mancanza di interpretabilità di alcuni risultati. Tale approccio permette infatti di rappresentare scene complesse in modo differenziabile e compatto, sebbene spesso a discapito di un'intensa richiesta computazionale durante il rendering dovuta al ray marching volumetrico (Cai et al. 2024). Tewari et al. 2022, Gao et al. 2022, Rabby & Zhang 2023 hanno offerto delle dettagliate rassegne al riguardo.

Più vicina alle tecniche di acquisizione convenzionali, Gaussian Splatting (3D-GS) utilizza entità geometriche fisiche (Gaussiane 3D) e flussi di lavoro altamente ottimizzati che consentono tempi di rendering più rapidi rispetto a NeRF (Chen & Wang 2024, Basso et al. 2024). A differenza dei modelli impliciti basati sulle coordinate, 3D-GS si basa su una rappresentazione esplicita, come accade nei metodi di ricostruzione tradizionali, ma anziché utilizzare dei piccoli punti, le posizioni della camera vengono descritte da funzioni gaussiane continue che incorporano parametri quali il colore, la diffusione e la posizione, risultando in una rappresentazione volumetrica che fornisce colore e densità per ogni punto nello spazio 3D (Dalal et al., 2024, Zhou et al. 2024). La sua popolarità deriva dalla capacità di fondere abilmente le proprietà dei campi di radianza volumetrici continui, essenziali per la sintesi di immagini di alta qualità e le velocità di rendering dei metodi tradizionali, evitando al contempo il sovraccarico computazionale dovuto al rendering neurale, in cui solitamente vengono elaborati anche i campi vuoti delle viste (Chen & Wang 2024).

Anche le immagini elaborate con Gaussian Splatting, prima di essere inizializzate, vengono calibrate attraverso tecniche SfM. Successivamente le gaussiane vengono ottimizzate iterativamente affinché corrispondano nel miglior modo possibile alle immagini di riferimento; viene quindi eseguito il rendering in cui si confrontano le viste prodotte con le immagini originali e i parametri delle gaussiane sono gradualmente modificati per migliorare posizioni, orientamenti e dimensioni (Wu et al. 2024). Al fine di mantenere la coerenza nella visualizzazione, viene inoltre introdotto un metodo di controllo della densità delle gaussiane che permette di individuare le regioni che mancano di dettagli e quelle che al contrario soffrono di un sovra-campionamento; nel primo caso le gaussiane vengono clonate mentre nel secondo vengono divise e riadattate in modo da aumentare la fedeltà della

⁵⁰ Un campo di radianza è una rappresentazione della distribuzione della luce in uno spazio tridimensionale, che cattura il modo in cui la luce interagisce con le superfici e i materiali dell'ambiente (Chen & Wang 2024).

ricostruzione; le gaussiane con un'opacità inferiore a una soglia prestabilita vengono infine rimosse. Per fare questo viene sfruttato un classico algoritmo di Machine Learning, chiamato “Discesa del Gradiente”, che consente di ridurre gli errori regolando i parametri verso valori di perdita più piccoli (Kerbl et al. 2023).

Un aspetto chiave di GS è l'uso di "Splats", ovvero piccoli ellissoidi distribuiti per generare delle linee volumetriche; in questo contesto l'illuminazione globale della scena viene modellata mediante armoniche sferiche che permettono di rappresentare il colore in funzione della vista, secondo le prassi descritte in Fridovich-Keil et al. 2022. Ciò significa che in base alla loro posizione e alle qualità cromatiche, gli splats generano una rappresentazione composita in cui ogni regione ha un'opacità e una rappresentazione cromatica che può variare a seconda della direzione di osservazione. Infine, tutte le particelle proiettate sullo schermo vengono renderizzate come gaussiane bidimensionali, velocizzando il processo di ricostruzione (Basso et al. 2024).

La rappresentazione esplicita di 3D-GS offre un controllo significativo sulla dinamica della scena, un fattore cruciale in scenari complessi che coinvolgono geometrie intricate e condizioni di illuminazione variabili; a differenza degli approcci NeRF, l'elaborazione con Gaussian Splatting consente l'editing della nuvola, a differenza dei modelli neurali che richiedono di essere nuovamente addestrati (Cai et al. 2024, Wu et al. 2024, Rabby & Zhang 2024). Gli splats gaussiani sono inoltre memorizzati in un formato compatto che rappresenta ogni splat come una collezione di parametri.

Questi parametri includono tipicamente:

- Posizione (ovvero la posizione 3D del centro dello splat);
- Scala (dimensione dello splat);
- Opacità (quantità di influenza che lo splat ha sull'immagine renderizzata);
- Colore;
- Proprietà del materiale (come lucentezza, riflessione e rifrazione).

Memorizzando gli splat in questo formato compatto, è possibile rappresentare un gran numero di informazioni con un consumo relativamente basso di dati. Questo rende gli splats gaussiani adatti al rendering di scene complesse ad alta risoluzione (Dalal et al. 2024, Chen & Wang 2024).

1.5 Studi sul software: black box, FOSS, Cloud Computing

Oggi sono disponibili moltissime soluzioni software per eseguire in modo automatico o semi-automatico le complesse funzioni descritte in precedenza. A tal riguardo sono già state condotte numerose rassegne volte alla valutazione e al confronto dei procedimenti adottati da diversi pacchetti, sia commerciali, sia open source. Riguardo ai primi, le soluzioni più spesso citate in letteratura sono Agisoft Metashape Pro⁵¹, Reality Capture⁵², 3DZephir⁵³, Autodesk Recap Pro⁵⁴ e Pix4D,⁵⁵ tra questi Metashape appare come uno dei software maggiormente utilizzati nei casi studio esaminati e viene spesso scelto nelle analisi comparative per la valutazione di risultati.⁵⁶ Relativamente ai pacchetti

⁵¹ <https://www.agisoft.com/>

⁵² <https://www.capturingreality.com/>

⁵³ <https://www.3dflow.net/it/>

⁵⁴ <https://www.autodesk.com/>

⁵⁵ <https://www.pix4d.com/> ; Queste soluzioni commerciali vengono discusse ad esempio in Remondino et al. 2017, Murtiyoso et al. 2017, Bianco et al. 2018, Rahaman & Champion 2019, Kingsland 2020.

⁵⁶ Ad esempio in Aicardi et al. 2018, Barbasiewicz et al., 2018, Peña-Villasenín et al. 2018, Rahaman & Champion 2019, Vacca 2019, Kingsland 2020, Verykokou et al. 2021, Cutugno et al. 2022

liberi e open source (FOSS) nel corso degli anni sono state sviluppate moltissime soluzioni, seppure, come è possibile immaginare, con aggiornamenti non sempre costanti; MicMac,⁵⁷ COLMAP,⁵⁸ Meshroom,⁵⁹ Regard3D,⁶⁰ VisualSfM,⁶¹ OpenMVG,⁶² OpenDroneMap (ODM),⁶³ Python Photogrammetry Toolbox⁶⁴ sono alcuni degli esempi più spesso riportati in letteratura (De Paolis et al. 2020, Eltner & Sofia 2020, Rahaman & Champion 2020, Djuric et al. 2021).

Stanno inoltre emergendo ulteriori soluzioni basate sul cloud computing per elaborare da remoto grandi insiemi di dati (Peña-Villasenín S. et al. 2020); molte di queste sono versioni cloud delle applicazioni desktop già citate tra cui Px4DCloud,⁶⁵ Agisoft Metashape Cloud,⁶⁶ WebODM,⁶⁷ ReCap Photo.⁶⁸ Vi sono poi anche diverse applicazioni sviluppate per le elaborazioni tramite dispositivi mobili o basate su browser tra cui ad esempio Polycam⁶⁹ e KIRI Engine.⁷⁰

Come discusso nelle sezioni precedenti, una delle questioni spesso sollevate sulle elaborazioni condotte con questi strumenti è che la pipeline SfM-MVS è per lo più gestita come una soluzione black-box e il controllo sulle operazioni da parte degli utenti, solitamente, è molto limitato (Luhmann et al. 2016, Remondino et al. 2017, Es Sebar et al. 2020, Durgut & Maras 2023). Questa considerazione viene per lo più associata ai software commerciali, per i quali in genere non vengono fornite descrizioni dettagliate degli algoritmi implementati (Murtiyoso et al. 2017, Cutugno et al. 2022). Nonostante ciò, queste applicazioni vengono ampiamente utilizzate per scopi scientifici, come lo studio e la ricostruzione di oggetti appartenenti al Patrimonio Culturale. In Remondino et al. (2017), al fine di confrontare le prestazioni di tre diversi software commerciali (Metashape, RealityCapture e Pix4D) vengono utilizzati sei dataset relativi a scenari di acquisizione eterogenei (beni architettonici, scultorei e city models); per ogni elaborazione vengono riportati i risultati dell'orientamento in termini di numero di camere allineate, errore di riproiezione, RMSE sulle coordinate dei punti di controllo (CPs), ridondanza dei punti 3D, tempi di processamento; inoltre per ogni gruppo vengono indicate le percentuali relative al numero di punti prodotti con 2,3 e 4 viste.⁷¹

Al di là dei valori di ogni voce, è possibile notare che ReCap, sebbene dimostri tempi di elaborazione più bassi e nuvole spesso più dense, non è sempre in grado di allineare le immagini in un unico blocco; inoltre il software non permette di verificare, a differenza degli altri due, le stime relative alla ridondanza delle osservazioni. Dal punto di vista degli errori di riproiezione, Pix4D tendenzialmente registra residui più bassi; tuttavia, come segnalato nello studio, per Metashape viene

⁵⁷ <https://github.com/micmacIGN/micmac>

⁵⁸ <https://colmap.github.io/>

⁵⁹ <https://alicevision.org/>

⁶⁰ <https://www.regard3d.org/>

⁶¹ <http://ccwu.me/vsfm/>

⁶² <https://github.com/openMVG>

⁶³ <https://opendronemap.org/>

⁶⁴ <https://github.com/decentropy/photogrammetry>

⁶⁵ <https://cloud.pix4d.com/demo>

⁶⁶ <https://www.agisoft.com/features/cloud/>

⁶⁷ <https://opendronemap.org/webodm/>

⁶⁸ <https://help.autodesk.com/view/RECAP>

⁶⁹ <https://poly.cam/>

⁷⁰ <https://www.kiriengine.app/>

⁷¹ La ridondanza, viene definita come l'eccesso di osservazioni (ad esempio, punti immagine) rispetto al numero di incognite (ad esempio, coordinate di oggetti 3D) da calcolare in un processo di regolazione. Indicata anche come $r = m - u$, dove m il numero di osservazioni e u il numero di parametri da stimare: cfr Remondino 2017, Granshaw 2020.

utilizzata una metrica di valutazione più robusta.⁷² Anche altri lavori segnalano maggiori difficoltà di allineamento dei dati per Reality Capture; Kingsland (2020) evidenzia la necessità di aggiungere dei punti di controllo per ottenere un'elaborazione in un unico blocco. Nel caso di studio le valutazioni vengono effettuate su un vaso greco proveniente dalla collezione Farid Karam, attraverso i software Reality Capture, Agisoft Metashape e Bentley Context Capture.⁷³ L'oggetto è stato acquisito in due posizioni distinte per ottenere la ricostruzione di tutti i lati (superiore e inferiore); a tal proposito l'autrice segnala che la possibilità offerta da Metashape di gestire le immagini come chunks separati da combinare poi in un secondo momento permette un maggiore controllo sui singoli dataset, consentendo inoltre di ridurre i tempi di lavoro manuale. A differenza di Metashape, Capture Reality e Context Capture non offrono questa opzione; per quest'ultimo inoltre viene evidenziata l'impossibilità di scalare con successo manufatti di piccole dimensioni o privi di dati GPS già codificati nelle immagini (Kingsland 2020). Lehoczky & Abdurakhmonov (2021) propongono un confronto tra tre software commerciali (3DSurvey,⁷⁴ Agisoft Metashape, Autodesk Recap Photo) e quattro open source (VisualSfM, Regard3D, COLMAP, OpenDroneMap/WebODM); tuttavia gli aspetti valutati dagli autori riguardano solo i tempi di calcolo e le dimensioni della nuvola di punti. I dataset utilizzati in questo caso descrivono 5 scene su larga scala acquisite con 3 diversi sistemi UAV. Sulla base delle elaborazioni, gli autori affermano che tra i software testati, WebODM e Metashape presentano, in generale, prestazioni migliori, sebbene dalle tabelle pubblicate la maggiore densità di punti tra i software viene raggiunta da COLMAP (Lehoczky & Abdurakhmonov 2021). In Duric et al. (2021) il software open-source AliceVision Meshroom viene confrontato con Agisoft Metashape. In questa indagine sono utilizzati due oggetti con materiali e dimensioni simili (~ 1m), ma con geometrie diverse: la base onoraria in onore dell'imperatore Valeriano, di forma compatta e tridimensionale e la lapide in marmo bianco, caratterizzata da una forma prevalentemente piatta. La prima opera è stata acquisita con un approccio convergente mentre la seconda è stata rilevata con un metodo combinato di rilievo fotogrammetrico parallelo e convergente. Gli autori hanno confrontato le nuvole prodotte da Meshroom con quelle generate da Metashape per entrambi gli oggetti.

Per il primo oggetto sono stati prodotti valori RMSE molto simili (con uno scarto di circa 0.004 mm) mentre per il secondo sono stati registrati residui maggiori (circa 0.6 mm). Anche nell'analisi condotta da Aicardi et al. (2018) viene evidenziata l'influenza della tipologia di oggetto sull'accuratezza della ricostruzione; in particolare, in questo caso, l'obiettivo è stato quello di confrontare pipeline fotogrammetriche tradizionali con quelle invece orientate all'approccio SfM; sono stati utilizzati Leica Photogrammetric Suite – LPS,⁷⁵ Metashape, come rappresentante delle procedure SfM e MicMac come applicazione ibrida. I dataset fanno riferimento a un sito archeologico e a una volta barocca, entrambi ripresi con camere nadirali e utilizzati per produrre un'ortofoto finale. Gli RMSE riportati dagli autori indicano una maggiore efficacia delle procedure fotometriche classiche nel caso di superfici prevalentemente piane; al contrario, la complessa superficie della volta è meglio ricostruita dal software SfM, che presenta infatti un RMSE minore sui residui; anche riguardo ai risultati ottenuti con MicMac, si registrano deviazioni minori nel caso del rilievo della volta (Aicardi et al. 2018).

Verykokou et al. (2021) confrontano diverse soluzioni software per analizzare le loro prestazioni nella ricostruzione di siti naturali con geometrie complesse; nel caso di studio le immagini raccolte ritraggono una parte della roccia gigante di San Modesto, nel sito archeologico di Meteora (Kalambaka, Grecia). Le fotografie sono state elaborate con Metashape Pro, Reality Capture, Mic

⁷² Nel caso di ReCap e Pix4D viene registrata soltanto la media dell'errore di riproiezione, mentre per Metashape viene utilizzato l'RMS dell'errore di riproiezione.

⁷³ <https://it.bentley.com/>

⁷⁴ <https://3dsurvey.si/>

⁷⁵ <https://hexagon.com/>

Mac e Meshroom. Per quanto riguarda i residui medi sui punti di legame, i risultati migliori vengono registrati per Reality Capture, mentre Meshroom ha prodotto la deviazione più alta.⁷⁶ Metashape e MicMac riportano errori RMS sui GCPs simili mentre Reality Capture e Meshroom non forniscono questa informazione. Le nuvole sono state importate in Cloud Compare per calcolare la distanza media e assoluta rispetto alla nuvola prodotta da Metashape, assunta come riferimento; Reality Capture e il primo test condotto con MicMac registrano rispettivamente le deviazioni più alte e più basse (Verykokou et al. 2021). In Cutugno et al. (2022) vengono indagate più nel dettaglio le differenze tra i risultati prodotti da Metashape e MicMac, utilizzati per elaborare le immagini di un cavalcavia storico; data la complessità dell'oggetto, il rilievo è stato diviso in più sezioni registrate con distanze diverse. Poiché MicMac consente la scelta tra diversi modelli di calibrazione della camera, gli autori hanno eseguito diversi processamenti scegliendo infine il modello Fraser.⁷⁷

Gli errori di riproiezione sui punti legame e l'RMSE su GCPs e CPs indicano livelli di accuratezza comparabili; nel caso dei GCPs, MicMac mostra anzi statistiche di errore e deviazioni standard più ridotte. La distanza tra le nuvole viene calcolata anche in questo caso in CloudCompare⁷⁸ mentre ulteriori analisi statistiche vengono prodotte con Statistic Toolbox di Matlab.⁷⁹ I risultati riportati mostrano che più del 95% dei valori di distanza sono compresi nell'intervallo [-1,1] (Cutugno et al. 2022). In Bianco et al. (2018) viene fornito un confronto tra diverse pipeline SfM incrementali, valutando sia gli errori di stima delle pose delle camere sia, più in generale, le capacità di ricostruzione di ogni applicazione; dopo la descrizione di alcune delle soluzioni FOSS più popolari gli autori si concentrano su COLMAP, VisualSFM, Theia⁸⁰ e OpenMVG. Per la valutazione vengono utilizzati sia dataset reali misurati con strumentazioni di elevata accuratezza sia dataset sintetici, creati attraverso un plug-in per il software Blender;⁸¹ gli oggetti scelti presentano tutti delle geometrie piuttosto complesse e in alcuni casi texture uniformi.⁸²

I parametri considerati per quanto riguarda la ricostruzione delle nuvole rade sono la distanza media della nuvola di punti generata da ogni pipeline dal modello Ground Truth (GT) e la sua deviazione standard; in merito alla posa delle camere viene fornita una percentuale delle camere utilizzate, la distanza media dalla GT delle posizioni ricostruite dalle telecamere, la differenza media di rotazione negli orientamenti ricostruiti e le rispettive deviazioni standard. Osservando la tabella relativa alla ricostruzione della nuvola è possibile notare residui più bassi per COLMAP e Theia; quest'ultimo presenta inoltre deviazioni standard generalmente minori. I valori riportati per la valutazione delle pose indicano invece che COLMAP è in grado di ottenere, in media, risultati migliori; anche dal punto di vista dell'efficienza computazionale questa applicazione sembra essere la più veloce poiché utilizzando la maggior percentuale di camere riesce a ottenere tempi di elaborazione inferiori rispetto alle altre pipeline (Bianco et al. 2018). Rahman e Champion (2019) hanno presentato uno studio comparativo di quattro pacchetti software free e open source (FOSS) che

⁷⁶ Dal momento che gli strumenti disponibili in MicMac non consentono di impostare delle soglie massime per l'estrazione delle caratteristiche, gli autori hanno effettuato un'ulteriore elaborazione con le immagini ridimensionate, ottenendo nel primo caso deviazioni equiparabili a quelle di Reality Capture.

⁷⁷ Si tratta di un modello radiale per l'autocalibrazione in cui vengono presi in considerazione 12 gradi di libertà: 1 per la lunghezza focale (F), 2 per il punto principale (PP1 e PP2), 2 per il centro di distorsione (Cdist1 e Cdist2), 3 per i coefficienti di distorsione radiale (r3, r5 e r7), 2 per i parametri decentrati (P1 e P2) e 2 per i parametri affini (distorsione in piano) (b1 e b2) (Cutugno et al. 2022).

⁷⁸ <https://www.danielgm.net/cc/>; Cloud Compare è un'applicazione open source che consente di calcolare alcuni valori statistici come la distanza minima, la distanza massima, la distanza media e la deviazione standard tra due nuvole di punti o mesh.

⁷⁹ <https://it.mathworks.com/>

⁸⁰ <https://theia-ide.org/>

⁸¹ <https://www.blender.org/>

⁸² Per la descrizione del plug-in si rimanda a Bianco et al. 2018.

utilizzano tecniche SfM-MVS. Sulla base di criteri legati al costo, all'accuratezza, alla facilità d'uso e al tempo di elaborazione, gli autori hanno selezionato Visual SFM, Python Photogrammetry Toolbox (PPT GUI),⁸³ COLMAP e Regard3D. Per l'indagine sono stati utilizzati i set di due oggetti diversi, una scultura e la facciata di un edificio, mentre per determinare l'accuratezza delle elaborazioni è stato prodotto un modello di riferimento con Metashape, utilizzato, in questo caso, come fonte di dati GT. Il confronto finale è stato eseguito nell'applicazione CloudCompare registrando i dati prodotti con sistemi FOSS con la mesh di riferimento. Dal punto di vista delle operazioni eseguibili nei quattro software gli autori segnalano che solamente nel caso di Regard3D è possibile completare la classica pipeline fotogrammetrica, generando un modello texturizzato; inoltre nessuno dei programmi consente l'editing della nuvola di punti e della mesh all'interno dell'applicazione. Rispetto all'accuratezza dei risultati la deviazione più bassa è stata prodotta da COLMAP e Regard3D, mentre PPT GUI ha prodotto le nuvole più "rumorose" e non è riuscito a produrre un singolo set di nuvole di punti dal set di dati della scultura (Rahman e Champion 2019). Anche Vacca (2019) nel suo studio si concentra sui risultati prodotti da software FOSS confrontandoli con i dati GT ottenuti mediante TLS (un Faro Focus 3D con risoluzione di 7mm/10m) e le nuvole di punti elaborate con Metashape. Il dataset utilizzato in questo caso fa riferimento a un solo oggetto, ovvero la cupola della Basilica della Beata Vergine Assunta di Guasila (Sardegna), le cui immagini sono state elaborate con VisualSFM, OpenDroneMap e Regard3D. Le nuvole di punti dense prodotte dai questi software sono state confrontate con quelle di Metashape e del rilievo TLS per mezzo di CloudCompare. In base ai risultati riportati dagli autori VSFM riporta tempi di elaborazione inferiori mentre Regard 3D è il software per cui vengono calcolati residui più bassi. Dal punto di vista della ricostruzione, tuttavia, ODM fornisce risultati più completi e una maggiore densità di punti. Viene infine indicato un RMS per tutte le ricostruzioni di circa 3-4 cm (Vacca 2019). La maggior parte degli studi dedicati ai software fotogrammetrici basati su SfM sono dedicati alle applicazioni desktop; come accennato, tuttavia, anche l'uso di servizi di cloud computing sta aumentando insieme alla produzione di modelli 3D per mezzo di dispositivi mobili.

A tal proposito in Peña-Villasenín et al. (2020) viene condotta un'interessante analisi volta ad approfondire il grado di affidabilità offerto dall'elaborazione cloud; come sottolineato dagli autori, infatti, nonostante gli algoritmi usati siano simili a quelli delle soluzioni desktop, il controllo sul processamento dei dati può essere inferiore nelle controparti cloud. In questo lavoro vengono messi a confronto i risultati prodotti dall'applicazione Autodesk Remake con quelli ottenuti per mezzo di due software desktop, Agisoft Metashape e Pix4D Mapper; il processo di ricostruzione di queste soluzioni è stato testato sulla facciata del monastero di San Martín Pinario, in Spagna, caratterizzata da superfici eterogenee con alcuni ornamenti molto dettagliati. Gli aspetti valutati comprendono la qualità e l'accuratezza geometrica, i risultati visivi ed eventuali vantaggi operativi offerti dal software. Per misurare l'accuratezza dei modelli sono stati utilizzati 6 GCPs e 17 CPs misurati con Pentax R-325EX Total Station (± 5 mm). Nonostante vi siano minori possibilità di configurazione, Autodesk Remake consente l'introduzione dei GCPs permettendo di scalare e ottimizzare il modello come le soluzioni desktop; d'altra parte l'applicazione non consente di generare un'ortofoto, pertanto per questa operazione è necessario ricorrere a un software esterno. La relazione tra numero di punti e tempi di elaborazione offerta dagli autori mostra chiaramente la minore efficacia della soluzione cloud, che ha prodotto una nuvola con risoluzione inferiore impiegando un tempo maggiore. Per la valutazione dell'accuratezza geometrica è stata invece utilizzata una semplice media delle differenze tra coordinate GT e quelle misurate sui CPs. Le stime indicano un errore medio di pochi mm per tutte le soluzioni, con scarti di circa 1 mm tra un software e l'altro; la deviazione standard più bassa viene registrata per Pix4D mentre le altre applicazioni viene calcolato un valore leggermente più alto. Le limitazioni maggiori segnalate in Autodesk riguardano soprattutto il numero di foto che possono essere importate e la distribuzione poco omogenea dei vertici della mesh, sebbene gli autori

⁸³ <https://github.com/decentropy/photogrammetry>

confermino che la riproduzione di aree molto dettagliate risulti simile in tutti i software testati (Peña-Villasenín et al. 2020).

In generale, dagli studi appena descritti, le prestazioni e l'accuratezza dei software esaminati risultano comparabili. Tra le soluzioni commerciali Metashape risulta essere il software più utilizzato e solido dal punto di vista delle metriche usate per valutare le ricostruzioni (Remondino et al. 2017, Kingsland 2020, Duric et al. 2021, Aicardi et al. 2018, Peña-Villasenín et al. 2020). Relativamente alle soluzioni open source COLMAP e MicMac si presentano invece come le opzioni più interessanti; più in particolare COLMAP dimostra di essere un ottimo compromesso tra efficienza computazionale e accuratezza dei risultati, mentre MicMac, nonostante in alcuni casi riveli tempi di elaborazione molto lunghi, si distingue come una delle applicazioni più flessibili e controllabili (Aicardi et al. 2018, Verykokou et al. 2021, Cutugno et al. 2022). Per quanto riguarda la valutazione dei risultati, i parametri più frequentemente adottati riguardano l'errore di riproiezione nello spazio immagini, gli errori RMS sui punti di controllo, la densità dei punti e l'efficienza del processamento in termini di tempo impiegato per tutte le elaborazioni. Va notato infine il ricorso ad applicazioni esterne, in particolare CloudCompare, per ulteriori controlli relativi alla precisione delle misurazioni (Bianco et al. 2018, Vacca 2019, Rahman & Champion 2019, Duric et al. 2021, Cutugno et al. 2022).

2 Casi di studio

Sulla base della discussione critica sin qui svolta, si prenderanno ora in esame alcuni progetti nei quali si sono utilizzate le tecniche di documentazione digitale per migliorare la comprensione dei siti e degli oggetti del patrimonio culturale. Verranno presi in considerazione casi studio di oggetti acquisiti con tecniche reality-based, ponendo particolare attenzione alle metodologie che adottano dispositivi fotografici di ampia diffusione. I casi selezionati provengono da diversi progetti di digitalizzazione condotti all'interno del laboratorio di ricerca FrameLAB – Multimedia & Digital Storytelling del Dipartimento di Beni Culturali (DBC), dell'Università di Bologna, e sono prevalentemente orientati allo sviluppo di applicazioni per la valorizzazione e la comunicazione del Patrimonio Culturale. I campioni selezionati hanno in tal senso obiettivi simili ma presentano differenze significative per quanto concerne la loro dimensione e i contesti di acquisizione; ciascuno di essi va infatti inquadrato all'interno del progetto specifico per il quale è stato generato, con conseguenti variazioni metodologiche dettate dai tempi e dalle risorse disponibili. I casi sono 3 e riguardano:

- 1) l'acquisizione di un edificio storico per la creazione di un'applicazione da fruire con tecniche di realtà virtuale;
- 2) l'acquisizione di un complesso scultoreo all'interno di un progetto di ricostruzione storica di una cattedrale;
- 3) l'acquisizione di un campione proveniente da una raccolta museale nell'ambito di un progetto dedicato alla digitalizzazione di una mostra temporanea.

In questa sezione si cercherà pertanto di descrivere le procedure image-based applicate all'interno di progetti più ampi, con l'obiettivo di connettere il singolo oggetto al contesto entro il quale è stato generato. In questo modo si intende definire un metodo di analisi e di presentazione dei risultati che potrebbe essere utilizzato per descrivere, potenzialmente, tutti gli output SfM prodotti all'interno di un progetto di digitalizzazione. Per ciascun caso di studio verranno valutati gli output delle elaborazioni, tenendo in considerazione le metodologie di verifica emerse nel precedente paragrafo.

2.1 La torre tonda est della Rocca di Riolo nell'ambito del progetto "A cielo Aperto": obiettivi, metodo e dati acquisiti

Il progetto di riqualificazione della sala multimediale della Rocca di Riolo aveva tra le sue finalità quella di ricreare l'aspetto quattrocentesco della torre est, originariamente privo di copertura, e del paesaggio circostante. Si tratta di un progetto realizzato con il contributo della regione Emilia-Romagna e cofinanziato dal Comune di Riolo Terme nell'ambito del Piano Museale 2022 (LR 18/2000).⁸⁴ In questo caso di studio gli output sono stati concepiti con l'obiettivo di offrire dei percorsi di visita volti a evocare il contesto originale tramite forme di fruizione di tipo immersivo.

Nel dettaglio le richieste avanzate dagli enti coinvolti erano la ricostruzione dell'assetto della Rocca all'inizio del XV secolo e la creazione di un'applicazione in realtà estesa da fruire in loco tramite visore; inoltre, per rendere maggiormente accessibili contenuti del percorso museale era prevista la produzione di repliche tattili della torre est attraverso stampa 3D. La realizzazione del progetto ha coinvolto competenze diverse e si è inoltre avvalsa della consulenza di esperti di dominio laddove le fonti storiche e le tracce attuali non davano sufficienti notizie relative all'aspetto della Rocca nel suo assetto medievale. Al fine di raggiungere i risultati desiderati il lavoro ha comportato la messa in opera di un workflow basato su più fasi e strumenti, sia hardware che software.

Il primo passo è stato quello di costituire un team di lavoro che potesse, da un lato, approfondire la documentazione relativa agli sviluppi storici e architettonici della Rocca e del borgo circostante e dall'altro acquisire dati metrici necessari alla futura ricostruzione virtuale. Durante questa fase sono stati inoltre digitalizzati i modelli in legno raffiguranti alcune delle macchine da guerra utilizzate nel periodo storico di riferimento ed esposti all'interno del percorso museale allestito negli ambienti della Torre Est. Successivamente i dati raccolti sul campo e quelli d'archivio sono stati integrati per la creazione di un modello 3D della Rocca e del paesaggio circostante così come dovevano apparire alla fine del XIV secolo.⁸⁵ Una volta ricostruito il modello di riferimento, quest'ultimo è stato ulteriormente elaborato al fine di riprodurre nel modo più fedele possibile il contesto e i materiali costruttivi utilizzati all'epoca.

Prima di procedere alla creazione dell'app VR, da fruire tramite Oculus Quest 3,⁸⁶ sono stati delineati i possibili scenari di approfondimento da includere nel percorso immersivo; la progettazione di tali scenari intendeva valorizzare il ruolo militare svolto in passato dalla fortezza, nonché la vita quotidiana e i mestieri che caratterizzavano la società rioliese del XV secolo. In questo senso, sono stati immaginati tre percorsi narrativi di cui il primo dedicato alla funzione difensiva del Mastio e alle armi tipicamente utilizzate all'epoca durante i combattimenti e gli assedi (tra cui ad esempio armi da tiro come la catapulta o armi da fuoco come la bombarda); un secondo scenario è stato pensato per raccontare una delle attività artigianali più importanti del periodo di interesse, ovvero quella di armaiolo. Infine è stato progettato un ultimo percorso ambientato presso l'Abbazia di San Pietro in Sala, un monastero costruito dai monaci benedettini, di cui oggi rimangono solo pochi resti; quest'ultimo scenario, volto a descrivere le diverse erbe medicinali usate al tempo, ha richiesto la ricostruzione parziale dell'Abbazia, in particolare dell'orto dove venivano probabilmente coltivate diverse specie aromatiche, usate ad esempio per la cura delle malattie.⁸⁷ Tutti i modelli prodotti, sia quello raffigurante la Rocca e il borgo medievale, sia quelli relativi agli scenari appena descritti sono stati infine importati all'interno di Unreal Engine⁸⁸ (versione 5.3) al fine di creare un'applicazione interattiva che permettesse di esplorare la Rocca nel suo aspetto originale.

⁸⁴ <https://framelab.unibo.it/roccadiriolo/>

⁸⁵ Collina et al., in corso di stampa.

⁸⁶ <https://www.meta.com/>

⁸⁷ Il lavoro di modellazione, non eseguito personalmente, è stato condotto da altri membri esperti del team.

⁸⁸ <https://www.unrealengine.com/en-US>

Per quanto riguarda la documentazione raccolta in campo, nella fase iniziale è stata condotta una campagna di rilievo volta all'acquisizione tramite laser scanner della struttura dell'intera Rocca e alla produzione, tramite fotogrammetria, di un modello texturizzato della torre est. L'acquisizione condotta mediante TLS, condotta da Dipartimento di Architettura, ha prodotto un totale di 27 scansioni di media qualità (1 cm a 10 metri) confluite in una nuvola di punti finale di circa 200 milioni di punti, essenziale sia per la referenziazione del modello che per l'estrazione dei dati geometrici di riferimento. Nel caso dell'acquisizione fotogrammetrica le principali finalità erano quelle di ottenere una riproduzione maggiormente dettagliata di alcuni elementi architettonici della torre, come la merlatura e la sottostante fascia di archetti pensili, nonché rendere maggiormente visibile la tessitura muraria. Al fine di ottenere una buona restituzione di tali elementi, posti a un'altezza di circa 20 m, per l'acquisizione è stato utilizzato un DJI Mavic 2 Pro⁸⁹ con sensore CMOS 1" da 20 MP (pixel pitch di 2.41µm) ottica fissa Hasselblad L1D-20c 35 mm, f/2.8–f/11 e una risoluzione immagine di 5472x3648 pixels.

Durante la fase di pianificazione non è stato possibile eseguire un sopralluogo nei giorni antecedenti l'acquisizione; di conseguenza non è stato effettuato un rilievo preliminare per individuare eventuali problemi legati alla riflettanza, al taglio delle ombre e alla presenza di ostacoli, come suggerito ad esempio in Lauro & Lombardo (2023). Per poter progettare il rilievo in modo efficiente, l'area di interesse è stata comunque esaminata attentamente utilizzando la documentazione storica relativa all'edificio e alle sue fasi costruttive; in particolare, nel caso della Rocca di Riolo, è stato possibile reperire numerose informazioni e immagini dalla precedente campagna di rilievo condotta nel 2016 dalla studentessa Ilaria Pardossi (Pardossi 2016). Al fine di condurre in sicurezza le acquisizioni tramite SAPR, sono state consultate le mappe online messe a disposizione nel sito d'Flight mentre ulteriori verifiche riguardanti la configurazione dell'abitato nei pressi della Rocca sono state effettuate per mezzo di Google Earth (Fig. 4).⁹⁰ Al momento del rilievo (condotto a Luglio 2023), il limite di volo stabilito dal sito d'Flight⁹¹ non permetteva di volare a un'altezza superiore a 25 m; la progettazione dello schema di volo ha tenuto conto di questa limitazione escludendo infine l'esecuzione di riprese nadirali al di sopra della Rocca, la quale occupa un volume di circa 40 metri in larghezza e 28 in altezza. Data la forma della torre è stato pianificato uno schema di volo circolare con assi di presa convergenti orientati verso il centro della struttura. Per mezzo dell'app sono stati individuati alcuni ostacoli che avrebbero potuto limitare lo spazio di lavoro; tra questi la cinta muraria al livello interrato, molto vicina alla torre, e lo stretto passaggio lasciato dagli edifici a nord-est. Per mantenere una distanza di acquisizione costante e includere anche le parti inferiori della torre è stato pianificato un volo all'interno del fossato, prevedendo una distanza di acquisizione massima di circa

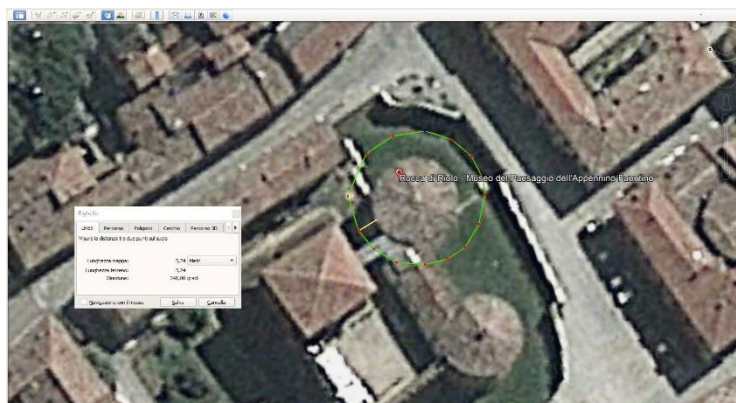


Figura 4 - Rocca di Riolo Terme - Google Earth

⁸⁹ <https://www.dji-store.it/dji-mavic-2/>

⁹⁰ <https://www.google.it/intl/it/earth/index.html>

⁹¹ <https://www.d-flight.it/web-app/>

3 m. Si è poi pianificato di condurre una seconda acquisizione al livello dell'attuale pavimentazione, a una distanza maggiore di circa 11 m con l'intenzione di inquadrare l'intera struttura in ogni fotogramma; quest'ultima configurazione avrebbe inoltre permesso di ottenere una maggiore linea di base, garantendo una geometria di presa più robusta (Luhmann et al. 2020). In questo modo, il GSD minimo sarebbe stato di circa 2,5 mm/px (Stylianidis et al. 2016).

Il rilievo è stato condotto in modalità manuale nell'arco di una sola giornata (04-07-2023) in concomitanza alle acquisizioni con laser scanner. Sono stati affissi numerosi punti di controllo sulle pareti della rocca, di cui 7 ripresi sia con il Mavic 2 Pro sia con lo scanner Leica. Per via delle condizioni di luce molto variabili si è scelto di non impostare una temperatura colore mantenendo il bilanciamento del bianco automatico. È stato eseguito un volo iniziale per valutare se fosse possibile eseguire in sicurezza l'acquisizione del lato della torre ritenuto più problematico, ovvero quello che la collega al mastio, caratterizzato dalla presenza di edifici molto vicini alla Rocca; in seguito sono stati effettuati due voli con schema circolare ottenendo 350 scatti così suddivisi: 316 a una distanza molto ridotta (~2 m) imposta dagli ostacoli menzionati in precedenza, 34 a una distanza maggiore (~9 m) per ottenere una copertura ad ampio raggio. Le temperature molto elevate (30° circa) tuttavia hanno ridotto drasticamente il tempo di autonomia delle batterie del velivolo, imponendo di atterrare prima della fine dell'ultima missione.⁹² Per questo motivo, non è stato possibile completare, come pianificato, il secondo tragitto.

I file DNG prodotti dal Mavic sono stati copiati nella NAS di laboratorio ed in seguito convertiti in formato TIFF con Photoshop Camera Raw.⁹³ All'interno dell'applicazione si è eseguito un bilanciamento delle luci, in modo da rendere maggiormente uniforme il dataset e ridurre la differenza tra le parti in ombra e alcune porzioni sovraesposte. Le immagini sono state importate in Metashape Pro (v 1.7.1) dove l'elaborazione standard prevede quattro fasi: Align Photos (orientamento interno ed esterno), Build Dense Cloud, Build Mesh, Build Texture. Dal momento che i file di test contenevano molte informazioni relative alla sezione connessa al mastio si è scelto di importare anche questa serie iniziale di scatti. I dataset sono stati dunque importati come 3 gruppi separati all'interno dello stesso chunk, eliminando le coordinate GPS salvate nel file EXIF.⁹⁴ È stata poi eseguita la calibrazione con PhotoModeler. Successivamente sono stati inseriti manualmente i GCPs visibili nelle immagini associando le coordinate misurate con il laser scanner ed è stata effettuata l'ottimizzazione dell'orientamento. Prima di lanciare l'ottimizzazione si è proceduto, mediante il software, al calcolo della matrice di covarianza; questa funzione consente di visualizzare la varianza dei punti di legame permettendo di valutare l'entità e la direzione degli errori per tutte le posizioni stimate (Fig. 5).⁹⁵ Per la regolazione sono stati utilizzati 5 GCPs mentre i restanti due marker sono stati usati come punti di controllo. Si riportano l'errore medio di riproiezione sulle immagini (in pixel), gli RMSE per i GCPs e i CPs non inclusi nella procedura di allineamento (in cm) (Tab. 1).

	GCPs	CPs
Errore di riproiezione	0.27 px	0.42 px
RMSE	0,29 cm	1,14 cm

Tab. 1 - Residui calcolati dal software sui GCPs e sui CPs

⁹² Generalmente ogni batteria garantisce un'autonomia di circa 30'; nel caso specifico di questo rilievo erano disponibili in totale 3 batterie.

⁹³ <https://www.adobe.com/it/>

⁹⁴ Il Mavic 2 Pro, come altri droni di fascia consumer, è caratterizzato da un sensore di piccole dimensioni che può fornire valori poco accurati, arrivando secondo alcuni autori a un'incertezza di circa 10 m (Kingsland 2020, Cutugno et al. 2022)

⁹⁵ Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition, Version 1.7, 89

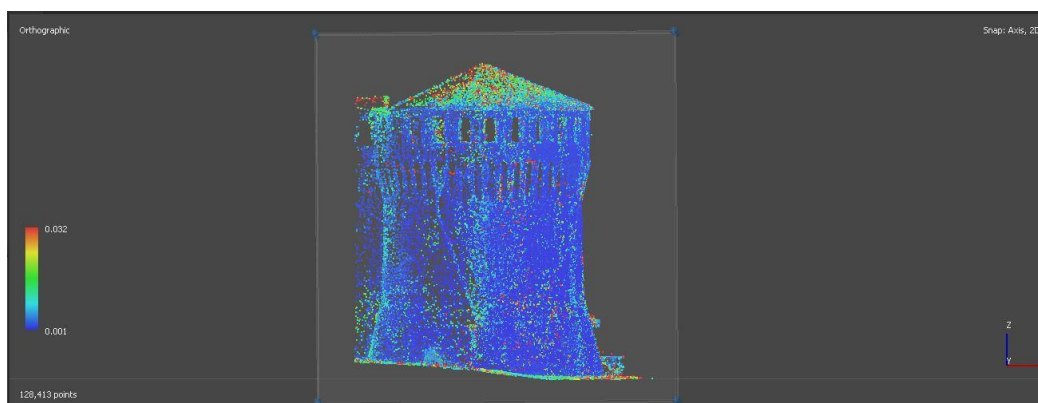


Figura 5 - Matrice di covarianza calcolata da Metashape. In rosso gli errori maggiori indicano un'incertezza massima di circa 3 cm

Una volta eseguita la calibrazione delle camere, Metashape permette inoltre di visualizzare, all'interno del pannello Camera Calibration, le distorsioni calcolate per il set di immagini, e il grado di correlazione tra i parametri;⁹⁶ sebbene gli errori mostrati per le aree periferiche siano piuttosto comuni per via delle distorsioni introdotte dalle lenti, il grafico dei residui evidenzia un problema di calibrazione per la porzione in basso a destra delle immagini (Fig. 6). Osservando i valori riportati nella matrice di correlazione è possibile notare, in effetti, una forte interdipendenza tra i valori di distorsione radiale (K1, K2) e una possibile influenza di P2 sulla coordinata y del punto principale (Fig. 7). Si è dunque lanciata una nuova ottimizzazione senza selezionare P2 al fine di valutare l'influenza di questo parametro sul processo di calibrazione (come suggerito ad esempio in Murtiyoso & Grussenmeyer 2017); tuttavia dai risultati non è stato rilevato un miglioramento significativo.

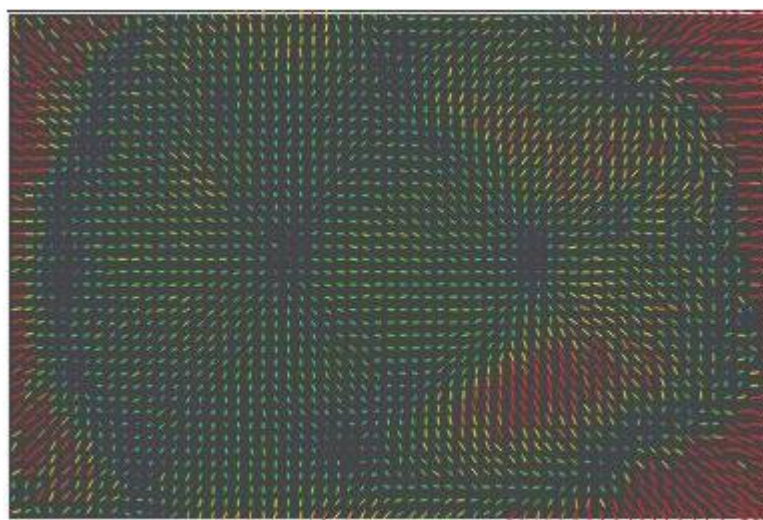


Figura 6 - Grafico dei Residui; si notano errori maggiori lungo i bordi e in basso a destra

⁹⁶ Per la parte di lettura degli errori, si veda la guida pubblicata dagli sviluppatori del software <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000158119-what-does-camera-calibration-results-mean-in-metashape-#Example-of->

Distortion Plot										
Distortion Profile Correlation Vignetting										
	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	4384.8	0.0580892	1.00	0.04	-0.02	-0.07	0.13	-0.12	-0.03	0.03
Cx	-17.8766	0.0785047		1.00	0.01	0.02	-0.03	0.03	0.89	0.02
Cy	-13.2019	0.0697335			1.00	-0.02	0.01	-0.01	0.01	0.87
K1	0.00457937	3.46149e-05				1.00	-0.95	0.89	0.02	-0.03
K2	0.0449096	0.000162566					1.00	-0.98	-0.02	0.01
K3	-0.037866	0.000226305						1.00	0.02	-0.01
P1	-0.00192594	4.73906e-06							1.00	0.00
P2	0.000165563	3.9952e-06								1.00

Figura 7 - Matrice di calibrazione stimata in seguito all'ottimizzazione basata su GCPs

In seguito, si è proceduto con la creazione della nuvola densa, scegliendo la qualità “Ultra Hight” e la modalità di filtraggio “Aggressive”. Durante l’elaborazione della nuvola densa sono state create anche le mappe di profondità relative a ciascuna vista. Il tempo impiegato per completare questa fase è stato di circa 1h 14’; la nuvola è stata pulita con i comandi di selezione e ulteriormente filtrata attraverso il comando “Filter by confidence”, che consente di eliminare i punti derivati da un basso numero di corrispondenze o che potrebbero essere affetti da errori di matching (Fig. 9).⁹⁷ La nuvola così ottenuta di 70.487,509 punti, è stata infine sottoposta al processo di meshing, scegliendo una ricostruzione basata su dense cloud; infine è stata proiettata la texture (Fig. 8). Poiché i dataset raccolti comprendevano immagini solo del lato libero della Torre, si è ottenuto un modello parziale della struttura, utile tuttavia per un esame più approfondito dei dettagli che caratterizzano la superficie. Dal modello è stata inoltre isolata ed esportata la sezione relativa alla merlatura al fine di fornire un riferimento per il futuro lavoro di modellazione (Fig. 10).



Figura 8 - Modello 3D

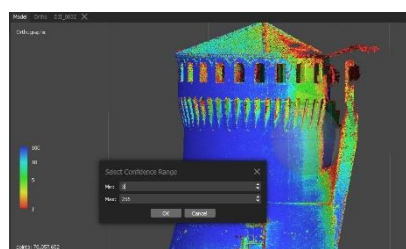


Figura 9 - Filter dense cloud by

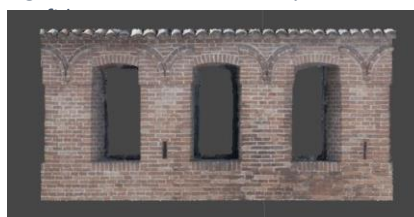


Figura 10 - Dettaglio della merlatura

⁹⁷ Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition, Version 1.7, 33

2.2 “L’Arca di Bertrando” nell’ambito del progetto dedicato alla ricostruzione del Duomo di Udine: obiettivi, metodo e dati acquisiti.

Il progetto dedicato alla ricostruzione del Duomo di Udine aveva come principale obiettivo quello di ricostruire alcune delle fasi storiche dell’edificio, in particolare la fase trecentesca, legata al Patriarcato di Bertrando, e quella quattrocentesca, caratterizzata da ulteriori sviluppi e trasformazioni. Si tratta anche in questo caso di un lavoro che ha coinvolto diversi enti e team disciplinari.

Più in dettaglio il progetto di ricerca è stato finanziato e sviluppato dall'Istituto Pio Paschini di Udine con il contributo dell'Università di Bologna (Dipartimento dei Beni Culturali, Dipartimento delle Arti, Dipartimento di Architettura) e dell'Università di Udine (Dipartimento degli Studi Umanistici e del Patrimonio Culturale). Per la ricostruzione 3D, alcuni materiali e informazioni sono stati forniti dal Museo del Duomo e da specialisti di diversi ambiti, in un approccio collaborativo e interdisciplinare che ha permesso di riunire diversi contenuti, di tipo sia materiale che immateriale, al fine di tracciare la storia e le trasformazioni fisiche legate all’edificio (Bertacchi et al. 2023). Come accennato, le esigenze avanzate dal team di studiosi e dall’Istituto Pio Paschini riguardavano la ricostruzione del Duomo nei secoli di maggiore sviluppo (XIV-XV) e la divulgazione dei risultati attraverso la creazione di un modello informativo; quest’ultimo avrebbe permesso di vagliare e/o formulare nuove ipotesi relative alle trasformazioni sia interne che esterne, avvenute nei periodi di maggior interesse. In questo senso, il progetto mirava non solo alla ricostruzione dei volumi architettonici ma anche degli elementi di carattere artistico rappresentati ad esempio dalle decorazioni pittoriche e dagli arredi sacri, ricollocati nel corso del tempo in altri ambienti del Duomo.

In base agli obiettivi appena descritti, sono state programmate due campagne di rilievo effettuate tra gennaio e marzo 2023, volte ad acquisire sia la struttura nel suo insieme che alcuni elementi architettonici e artistici di particolare interesse.⁹⁸ Per la raccolta dei dati sono state impiegate sia la scansione laser (TLS) che la fotogrammetria digitale. Come descritto in Bertacchi et al. (2023), date le ingenti dimensioni dell’edificio, le azioni di documentazione si sono concentrate anzitutto sugli “elementi generatori della forma”, ovvero capaci di mettere in luce le maggiori trasformazioni dell’edificio e in grado di fornire informazioni utili alla ricostruzione. Tra questi, ad esempio le stratificazioni della facciata, che permettono di individuare la struttura principale e l’aggiunta delle navate laterali, le altezze di alcuni volumi interni ed esterni ed elementi risalenti alla fase trecentesca. Per documentare le navate interne, lo spazio absidale, le cappelle laterali, gli ambienti settentrionali del sottotetto e i prospetti esterni (facciata, lato settentrionale e lato orientale), è stato utilizzato il laser scanner terrestre Leica C5⁹⁹ a tempo di volo, ottenendo per ogni area una nuvola composta da circa 14 milioni di punti ripresi con una qualità media di 1 cm. Ulteriori elementi di dettaglio presenti sulla facciata, sui portali o non accessibili con tecnologia laser sono stati invece acquisiti dal team mediante fotogrammetria; quest’ultima è stata inoltre utilizzata per acquisire gli arredi sacri e gli affreschi che un tempo decoravano alcuni ambienti del Duomo e ora sono riposizionati in altri locali. Un esempio è il ciclo di affreschi attribuito a Vitale da Bologna, i cui frammenti sono stati staccati dalla parete originale della Cappella Maggiore e ora sono ricollocati in altri spazi, come il Battistero. Per l’acquisizione fotogrammetrica sono state usate tre camere reflex, una Nikon D5500 (sensore APS-C da 23.5×15.7 mm, 24 MP)¹⁰⁰, una Sony a6000 (sensore APS CMOS Exmor HD di tipo APS-

⁹⁸ Per la descrizione dettagliata del lavoro di acquisizione e ricostruzione si rimanda al volume curato da Cesare Scalon (2023), nel quale sono inoltre contenuti i numerosi contributi relativi alla storia architettonica, religiosa e culturale della Cattedrale. Scalon 2023. In questa sezione verranno comunque riportati i dati essenziali del progetto, nonché un approfondimento relativo a uno degli arredi sacri documentati tramite fotogrammetria.

⁹⁹ <https://leica-geosystems.com/it-it/>

¹⁰⁰ <https://nikonimglib.com/it/products/196/D5500.html>

C da 23,5×15,6 mm, 24,3 MP)¹⁰¹ e una Nikon D750 (sensore CMOS Full Frame da 36x24 mm, 24.3 MP);¹⁰² inoltre per alcuni elementi posti in alto è stato utilizzato un palo estensibile che sostiene una telecamera (Sony QX100, 20,2 MP, sensore CMOS Exmor da 13,2×8,8 mm)¹⁰³ con controllo remoto da terra (3D Eye).¹⁰⁴ Più in particolare gli elementi architettonici rilevati tramite fotogrammetria sono la facciata principale, il portale della Redenzione, il portale dell’Incoronazione, l’estradosso della cappella di San Nicolò, i resti delle aperture a rosone nel lato meridionale del transetto e l’angolo sud-ovest del transetto. Gli arredi sacri comprendono invece l’Arca di Bertrando, i lacerti di affresco visibili nella cappella maggiore, l’affresco della cappella dell’Annunciazione, l’affresco nell’attuale coro iemale, la statua lignea di San Nicolò, il crocifisso ligneo posto all’entrata della cappella delle Reliquie, la tomba di Nicolò da Lussemburgo, il dossale, alcune chiavi di volta, le coperture lignee dell’arca, le statue del battistero (Bertacchi et al. 2023).

Come accennato, la posizione attuale di alcuni arredi sacri non corrisponde a quella originaria; in tal senso è stato fondamentale procedere alla digitalizzazione di questi elementi per formulare ipotesi di ripristino relative alle condizioni passate attraverso la loro ricollocazione virtuale. In questa sede si è scelto di approfondire l’acquisizione di un’opera voluta dal patriarca di Aquileia Bertrando di Saint-Geniès, una delle figure più significative del mondo religioso e politico trecentesco, nonché dell’evoluzione storico-artistica del Duomo. Come si legge in Massaccesi (2023), Bertrando, commissionò a sue spese un’arca marmorea, che avrebbe dovuto contenere le reliquie dei protomartiri Ermagora e Fortunato; la sua realizzazione viene fatta risalire agli anni Quaranta del Trecento, poco prima della sua morte, avvenuta nel 1350. La collocazione originaria dell’opera è ancora dibattuta anche se è probabile che inizialmente fosse pensata per la cripta della Basilica di Aquileia. All’interno della Cattedrale di Udine l’arca subì diversi spostamenti; dopo la sua collocazione nella cappella maggiore, nel 1585 il visitatore apostolico Cesare De Nores ne ordinò il trasferimento nella cappella dedicata a Sant’Odorico e San Francesco, situata accanto all’altare maggiore. Successivamente l’opera fu nuovamente ricollocata in altri ambienti per passare infine all’ex Battistero dove è ancora custodita (Massaccesi 2023).¹⁰⁵

L’acquisizione con fotogrammetria è avvenuta durante la seconda campagna di rilievo condotta a Udine a inizio marzo 2023; il lavoro ha richiesto circa tre ore e ha dovuto affrontare una serie di problematiche riguardanti soprattutto lo spazio di lavoro e la complessità geometrica che caratterizza l’opera. L’arca è attualmente collocata in prossimità della parete nord-ovest del Battistero e occupa un volume complessivo di circa 2 metri in larghezza e 2,25 in altezza (senza considerare il basamento di circa 12 cm). Da un punto di vista geometrico il complesso può essere suddiviso in due ulteriori volumi: quello superiore relativo alla cassa monumentale, molto compatto, e quello inferiore, occupato da cinque figure scultoree che sorreggono l’urna (ai lati del parallelepipedo quattro figure femminili e una figura centrale maschile). Il corpo superiore, che coincide con il sarcofago, reca su ogni lato un bassorilievo con le storie dei protomartiri, coronate da un cornicione anch’esso decorato con motivi vegetali e figure sacre, tra cui spiccano ai lati i simboli dei quattro evangelisti.¹⁰⁶ La complessità dell’opera avrebbe richiesto di acquisire ogni elemento singolarmente, procedendo con

¹⁰¹ <https://www.sony.it/electronics/fotocamere-obiettivo-intercambiabile/ilce-6000-body-kit>

¹⁰² <https://www.nikonstore.it/macchine-fotografiche/fotocamere-dslr/>

¹⁰³ <https://www.sony.it/electronics/support/compact-cameras-dsc-qx-series/dsc-qx100/specifications>

¹⁰⁴ <https://www.microgeo.it/>

¹⁰⁵ Per un approfondimento si veda il contributo di Massaccesi, presente nel già citato volume dedicato al Duomo di Udine.

¹⁰⁶ Le scene prevedono: Ermagora creato vescovo di Aquileia, La predicazione di Ermagora; sul lato minore sinistro: Ermagora battezza la famiglia di Gregorio; sul retro: Ermagora esorcizza il figlio di Ponziano, Flagellazione di Ermagora, Crocifissione di Ermagora; sul lato minore: Decollazione di Ermagora e Fortunato; per terminare ancora sulla fronte con il Seppellimento di Ermagora e Fortunato: Massaccesi 2023

uno schema parallelo e prese inclinate per la cassa sepolcrale e proseguendo con una configurazione convergente per ogni statua; tuttavia, dato il poco tempo a disposizione, è stato necessario trattare l'opera come un unico volume racchiudendola in un sorta di "gabbia" virtuale di camere (seguendo uno schema simile a quelli mostrati, ad esempio, in Alsadik et al. 2013 e Menna et al. 2016).

Inoltre tra le esigenze del gruppo di lavoro vi era anche quella di ricostruire la copertura lignea dell'arca, con conseguente aumento dei necessari tempi di lavoro. Per l'acquisizione è stata utilizzata una Nikon d750 (obiettivo Nikkor micro 28-105 mm f/3.5-4.5, sensore CMOS Full Frame da 36x24), impostando una lunghezza focale molto ampia, di 20 mm, necessaria a riprendere l'opera nella sua interezza in ogni fotogramma. Sono stati inoltre utilizzati un Manfrotto MT055XPRO3¹⁰⁷ e un target X-Rite ColorChecker Passport Photo¹⁰⁸ per la calibrazione del colore. L'ambiente del battistero, particolarmente buio, ha inoltre richiesto l'uso di quattro faretti led disposti attorno all'arca, utilizzando la massima estensione degli stativi (circa 1.90 m) al fine di illuminare l'oggetto nel modo più omogeneo possibile.

Sono stati eseguiti tre giri attorno all'opera a diverse altezze; il primo alla minima altezza di circa 50 cm, il secondo a un'altezza di circa 1 metro e l'ultimo alla massima altezza consentita dal treppiede in uso, di 1.70 metri.¹⁰⁹ Le immagini sono state acquisite a una distanza media di circa 1,50 metri, con prese maggiormente ravvicinate per la parte posteriore dell'opera, posta a una distanza di circa 1 metro dalla parete. Per la ripresa della copertura lignea è stata infine utilizzata una scala che ha permesso di ottenere un'ultima serie di 23 scatti, eseguiti a mano libera a un'altezza di circa 2,50 metri; quest'ultima serie si è tuttavia rivelata molto problematica, soprattutto a causa della mancanza di luce e dell'impossibilità di usare il treppiede. Tali condizioni hanno imposto l'utilizzo di tempi di scatto relativamente brevi e valori ISO elevati, i quali hanno portato a una diminuzione della qualità delle immagini.

In totale sono state acquisite 178 immagini, successivamente elaborate nell'applicazione Photoshop Camera Raw. L'immagine con il color checker è stata convertita in formato DNG e successivamente importata nell'applicazione ColorChecker Camera Calibration, con la quale è stato possibile creare un profilo colore univoco per il dataset. All'interno di Camera Raw, oltre al bilanciamento del bianco, è stata eseguita anche una correzione dell'esposizione; in particolare per quanto riguarda i profili delle statue posteriori, dove le luci di supporto, in alcuni casi, hanno creato degli effetti speculari sul materiale marmoreo. Inoltre si è diminuito leggermente il livello di rumore per l'ultima serie di scatti eseguiti per la ricostruzione della copertura lignea. Le immagini elaborate sono state esportate in formato TIFF e in seguito importate in Agisoft Metashape Pro. Per ogni immagine è stato necessario creare una maschera, al fine di escludere lo sfondo dall'elaborazione. Dopo l'allineamento, sono stati inseriti i GCPs con le relative scale bars e la nuvola è stata ottimizzata. Gli errori riportati nel grafico delle deformazioni e il calcolo della varianza evidenziano notevoli problemi di allineamento per la parte relativa alla copertura, per la quale il programma è riuscito a riproiettare solo pochi punti (Fig. 11).

¹⁰⁷ <https://www.manfrotto.com/>

¹⁰⁸ <https://www.xrite.com/>

¹⁰⁹ Il treppiede usato permette di arrivare a un'altezza minima di ben 10 cm; tuttavia lo spazio di lavoro non avrebbe consentito di utilizzare lo strumento alla sua massima ampiezza.

Di seguito si riportano i residui sulle scale bars e gli errori di riproiezione stimati dal software (tab. 2).

	GCPs
Errore di riproiezione	2.53 pix
RMSE (Scale Bars)	0.11 cm

Tab. 2 - Residui calcolati dal software sui GCPs

La nuvola sparsa ottenuta è stata poi convertita in una nuvola di punti densa di 28.874,072 punti. Nonostante il modello principale dell'arca sia stato ben ricostruito la copertura lignea mostrava ancora numerose lacune; per permetterne la ricostruzione non è stato dunque applicato nessun filtro e la pulizia è stata eseguita solo manualmente. La ricostruzione della mesh è stata dapprima effettuata utilizzando la modalità dense cloud. La copertura è stata poi editata utilizzando lo strumento "Smooth Mesh", al fine di rendere più omogenea la trama della superficie. Infine è stata proiettata la texture e il modello è stato esportato in .obj (Fig. 13).

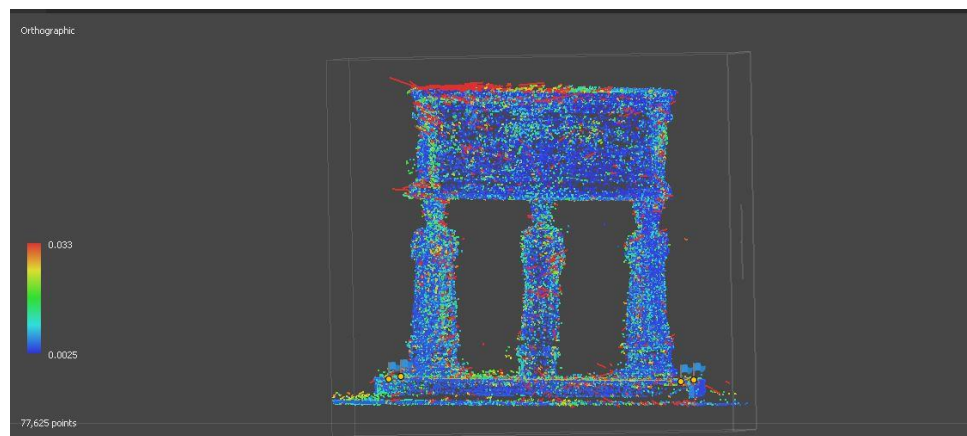


Figura 11 - Matrice di Covarianza con incertezza stimata di circa 3 cm

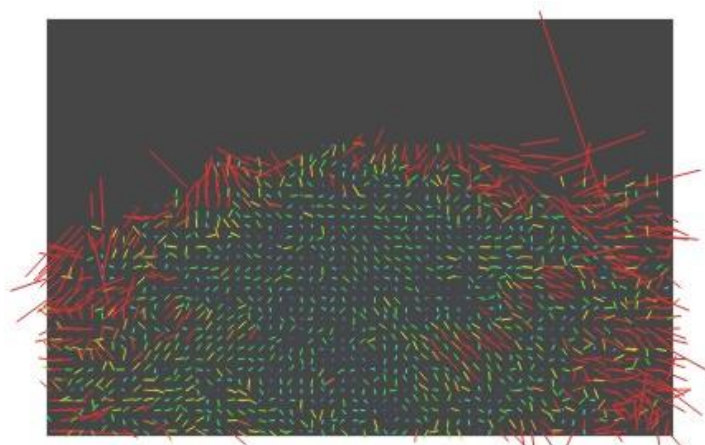


Figura 12 - Grafico dei residui relativo alla copertura lignea



Figura 13 - Modello 3D

2.3 Il Basilisco nel contesto del progetto PE5 Changes del PNRR e della ricostruzione eseguita per la mostra “L’altro Rinascimento. Ulisse Aldrovandi e le meraviglie del mondo” (Bologna, Museo di Palazzo Poggi (8 dicembre 2022 - 28 maggio 2023): obiettivi, metodi e dati acquisiti

Tra i progetti selezionati per il lavoro di tesi, si è scelto di inserire anche il caso pilota condotto nell’ambito del progetto Changes ("Cultural Heritage Active Innovation For Next-Gen Sustainable Society"), dedicato alla digitalizzazione della mostra temporanea intitolata "L'altro Rinascimento: Ulisse Aldrovandi e le meraviglie del mondo". Ciò che rende interessante questo caso è soprattutto il contesto nel quale si è sviluppato; Changes è un progetto nazionale finanziato nell'ambito della Mission 4 - Education and Research, del Piano nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Partenariato Esteso 5, con una partnership composta da ben 25 enti tra Università, Centri di Ricerca e Aziende coinvolte nella promozione e conservazione del patrimonio culturale.

Si tratta dunque di un caso studio che si inserisce in un sistema altamente strutturato, organizzato in 9 Spokes tematici che mirano a coprire l’intero ciclo di vita dei beni culturali attraverso la creazione di un ecosistema di competenze interdisciplinari.¹¹⁰ Può essere visto in questo senso come uno dei più significativi punti di riferimento, a livello nazionale, per la creazione di un network culturale in cui vengono messi in relazione diversi-know provenienti sia dal settore pubblico che privato, caratterizzato da una forte attenzione ad aspetti legati all’accessibilità e al riuso dei dati prodotti nell’ambito del Patrimonio Culturale.

Più in particolare, il gruppo di lavoro che si è occupato della digitalizzazione della mostra è coinvolto nelle attività dello Spoke 4, specificatamente dedicate all’uso delle tecnologie virtuali per la promozione, la conservazione e la valorizzazione del patrimonio culturale nei musei e nelle collezioni d'arte.¹¹¹ Una delle prime finalità di questo spoke è quella di individuare tecnologie e best

¹¹⁰ <https://www.fondazionechanges.org/>

¹¹¹ Call for tender for the presentation of intervention proposals for the Creation of Enlarged Partnerships extended to Universities, Research Centres, Enterprises and funding basic research projects to be funded under the

practices che possono essere applicate a contesti che presentano caratteristiche simili; al fine di rappresentare l'eterogeneo panorama museale italiano sono stati scelti una serie di casi studio "core" legati a diverse istituzioni culturali tra cui ad esempio collezioni di storia naturale, palazzi storici, musei demo-etnico-antropologici e gallerie d'arte diffuse (Balzani et al. 2024). Prima di poter definire le soluzioni più adeguate ad affrontare questi casi studio è stato necessario individuare uno scenario di prova che permettesse sia di testare l'uso di diverse tecnologie su oggetti di varia natura e complessità, sia di mettere a punto un possibile flusso di lavoro per il gruppo multidisciplinare. La mostra "L'altro Rinascimento: Ulisse Aldrovandi e le meraviglie del mondo", tenutasi tra il dicembre 2022 e il maggio 2023 nel Museo di Palazzo Poggi a Bologna ha rappresentato in questo senso un terreno di sperimentazione ideale; la collezione, infatti, comprendeva una raccolta di oltre 200 oggetti tra reperti naturalistici e archeologici, manoscritti, mappe antiche, statue, opere pittoriche e strumenti tecnico-scientifici distribuiti in sei sale espositive.

Un corpus così vasto ed eterogeneo, caratterizzato da forme, dimensioni e materiali tanto diversi avrebbe permesso di valutare l'uso di differenti tecnologie di acquisizione all'interno di un contesto molto complesso, contraddistinto da una serie di sfide legate alla digitalizzazione di mostre temporanee, come vincoli temporali ma anche aspetti legali e organizzativi (Farella et al. 2022). Inoltre la volontà di rendere la mostra e le informazioni a essa associate pienamente accessibili ha comportato la messa a punto di un piano di gestione orientato alla raccolta e al monitoraggio dei metadati relativi sia agli oggetti fisici che a quelli prodotti digitalmente. Come sottolineato in Barzaghi et al. (2024), ciò ha posto una serie di questioni, legate prevalentemente alla mancanza di standard condivisi sull'applicazione dei principi FAIR ai dati 3D prodotti nell'ambito del Patrimonio Culturale. Al fine di affrontare queste sfide, il lavoro di digitalizzazione ha richiesto, innanzitutto, l'elaborazione di due registri, utilizzati per raccogliere da un lato i dati bibliografici, come le fonti ufficiali provenienti dal catalogo della mostra o le note preliminari dei curatori e dall'altro i dati di processo, relativi alle dinamiche di acquisizione, processamento e metadattazione degli oggetti digitali (Barzaghi et al. 2024).

Il lavoro di acquisizione ha coinvolto 6 team composti dal personale di 3 musei e di una biblioteca, nonché da ricercatori provenienti da 5 Dipartimenti dell'Università di Bologna e dal DHILab (Digital Heritage Innovation Lab) del CNR-ISPC (Balzani et al. 2024). Per completare il lavoro di acquisizione sono stati impiegati circa tre mesi (marzo-giugno 2023) durante i quali ogni team ha parallelamente svolto la compilazione del foglio di calcolo con i metadati riguardanti il flusso di lavoro. La tabella prevedeva l'inserimento di tutte le informazioni relative alle diverse fasi del processo di digitalizzazione per un totale di sette sezioni riguardanti

- Acquisizione;
- Elaborazione;
- Modellazione;
- Ottimizzazione;
- Esportazione;
- Creazione dei metadati;
- Caricamento su piattaforma web.

Relativamente alle fasi di acquisizione ed elaborazione si sono potuti così registrare i nomi delle persone e dei team responsabili del lavoro, i metodi, gli approcci e le strumentazioni utilizzate (tipologia di tecnica impiegata, hardware, software, tools per la pre-elaborazione); infine sono state riportate le date di acquisizione e tempi necessari per il processamento (Balzani et al. 2024). Sebbene

si tratti di un caso pilota, è necessario sottolineare che non sono stati definiti standard minimi relativamente alla qualità geometrica dei modelli fotogrammetrici.

Come accennato la digitalizzazione della mostra ha richiesto di affrontare una serie di vincoli legati a tempi, spazi di lavoro e coordinamento di tutte le risorse (intese sia come strumentazioni che come risorse umane necessarie alla digitalizzazione e alla movimentazione delle opere). In alcuni casi gli oggetti ponevano limiti temporali molto stringenti, dovuti sia agli orari del museo sia al fatto che molti di essi provenivano da istituzioni e realtà museali diverse da quelle in cui si era tenuta la mostra; pertanto alcuni campioni sarebbero dovuti tornare entro breve tempo agli enti di appartenenza. Tra questi, vi era anche il Basilisco proveniente dalla raccolta De Betta del Museo di Verona, che ritrae forse uno dei campioni più suggestivi della collezione aldrovandiana, capace di fondere spesso elementi naturali ad aspetti “meravigliosi” (Balzani et al. 2023). Si tratta più in particolare di un preparato zoologico di piccole dimensioni, caratterizzato da una buona distribuzione lungo gli assi principali (circa 13x20x21cm). L’oggetto necessitava di essere acquisito con urgenza poiché era previsto che tornasse al museo di appartenenza entro pochi giorni. In particolare, per ottenere un modello completo di questo campione, era disponibile solo un giorno. Un vincolo temporale così stretto non avrebbe consentito una riacquisizione in caso di problemi durante la fase di allineamento delle immagini. Questa limitazione era ulteriormente aggravata dalla forma complessa del modello. Pur presentando, come già detto, un buon equilibrio dal punto di vista delle proporzioni, questo campione è contraddistinto da forme molto articolate con dettagli più fini rispetto al corpo principale, come l'estremità arricciata della coda e le zampe, presentando incavi pronunciati che tendono a creare zone d'ombra. Alcune aree, come la giunzione della coda e la parte bassa del dorso, avrebbero potuto determinare lacune nel modello 3D a causa di ombre dure o aree non visibili se non adeguatamente fotografate e illuminate (De Paolis et al., 2020). Inoltre, come riferito in Reggiani 2022, al fine di garantirne la conservazione, molti modelli animali venivano trattati con sostanze come la gommalacca, incorporando spesso materiali fibrosi per riparare i danni (Reggiani 2022); in tal senso, sebbene il modello presentasse una superficie prevalentemente di tipo lambertiano, a seconda dell’angolo di osservazione, alcune zone tendevano a riflettere la luce in modo poco uniforme.

Per l’acquisizione è stata impiegata una Nikon D750, con un obiettivo Nikkor micro 28-105 mm f/3.5-4.5, sensore CMOS Full Frame (36x24), risoluzione di 24.3 MP con pixel pitch di 5,9 μm . Date le dimensioni contenute dell’oggetto è stato possibile utilizzare una configurazione del tipo “turntable”, impiegando inoltre una lightbox per ottenere un’illuminazione omogenea e ben diffusa sul manufatto (Tang & Cesaroni 2022). Sulla base rotante sono stati inoltre affissi tre punti di controllo premisurati, utili alla successiva scalatura del modello (Sapirstein 2018). Il campione è stato posizionato al centro della base rotante mentre la camera è stata collocata in posizione frontale a una distanza tale da permettere di inquadrare anche la base su cui erano posti i target misurati. Al fine di ottenere una profondità di campo (DoF) che consentisse la messa a fuoco di tutti i dettagli dell’oggetto, così come dei target posizionati sulla superficie della base, la fotocamera è stata posizionata a ~70 cm, impostando una lunghezza focale di 38 mm e un’apertura del diaframma molto ridotta f/18, aumentando il tempo di scatto in modo da ottenere una buona esposizione (Nicolae et al., 2014, Verhoeven 2016). Durante l’acquisizione, la base è stata ruotata a intervalli angolari di 15° per garantire la sovrapposizione tra le riprese adiacenti (Lo Brutto & Spera 2011; Menna et al., 2017). Al termine di ogni giro la fotocamera è stata traslata verticalmente per acquisire i dati necessari alla ricostruzione di ogni parte dell’oggetto (Collins et al., 2019). In totale sono stati eseguiti cinque giri, effettuando riprese con la fotocamera inclinata di circa $\pm 45^\circ$ e $\pm 20^\circ$, e una serie di riprese frontali, assicurando che ogni punto fosse ben visibile in un gran numero di foto.

Questa configurazione ha permesso di ottenere un set di 281 foto, un numero consistente date le piccole dimensioni dell’oggetto, ma utile per garantire un’elevata sovrapposizione e la ricostruzione delle aree problematiche (Zachar et al., 2022). Per attenuare i riflessi che caratterizzano alcune aree dell’oggetto, la luce del lightbox è stata impostata a un’intensità intermedia. Poiché i LED erano presenti solo sulla parte superiore del box, è stato necessario bilanciare le aree sottoesposte

posizionando due luci LED dirette verso la parte inferiore. Per ottenere dati cromatici accurati, infine, è stata scattata un'immagine con un target X-Rite ColorChecker Passport Photo con 24 patch di valori di riflettanza noti (Apollonio et al. 2021). Il file immagine contenente il color checker è stato utilizzato per creare un profilo colore specifico attraverso l'applicazione ColorChecker Camera Calibration, successivamente applicato all'intero dataset all'interno del plugin di Photoshop Camera Raw. Le fotografie sono poi state esportate in formato TIFF, con compressione LZW. La successiva elaborazione dei dati è stata eseguita nel software SfM e ha seguito la pipeline tipica che prevede l'estrazione di punti omologhi, l'orientamento della fotocamera, il ridimensionamento degli oggetti, la creazione di nuvole di punti dense, la generazione di mesh e la proiezione di texture fotografiche sul modello (De Paolis et al., 2020). Le immagini sono state importate anche in questo caso nel software Metashape Pro, dove sono state create delle maschere per isolare l'oggetto dallo sfondo ed è stato eseguito un allineamento iniziale per costruire la nuvola di punti rada (Webb et al., 2020). In seguito sono stati inseriti i punti di controllo e la nuvola sparsa è stata scalata tramite l'uso delle scale bars. Come è possibile vedere dalla matrice di covarianza calcolata dal software e dal grafico dei residui, gli errori maggiori riguardano i bordi, nonché le aree di maggiore complessità come quelle che ritraggono la coda e la parte posteriore della testa (Fig. 14). Di seguito si riportano l'errore medio di riproiezione nello spazio immagini e l'errore metrico sui GCPs. Dalle stime calcolate dal software i residui maggiori si registrano lungo i bordi dell'oggetto (Tab. 1).

	GCPs
Errore di riproiezione	0.89 pixel
RMSE (scale bars)	0.41 mm

Tabella 1 - Residui calcolati dal software sui GCPs.

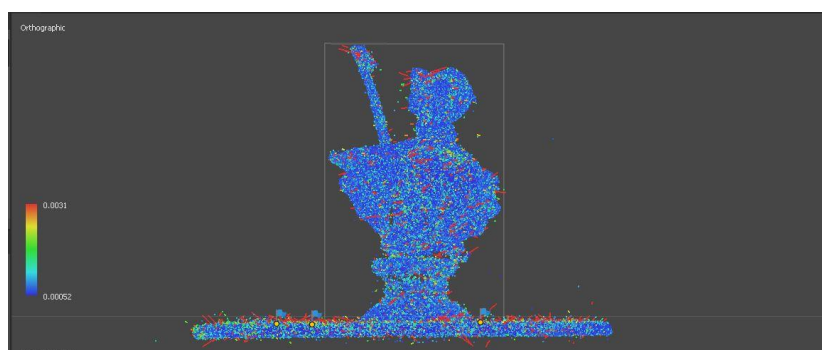


Figura 14 - Matrice di covarianza dove l'incertezza massima stimata dal software è di circa 3 mm

Successivamente è stata costruita la nuvola di punti densa con qualità alta ottenendo una ricostruzione di 4.337,277 punti; prima della generazione della mesh, la nuvola è stata filtrata sulla base di una stima di confidenza calcolata dal software per ogni punto. Infine, sono stati lanciati i procedimenti per la costruzione della mesh (basata su depth maps) e della texture. In seguito il modello ottenuto, composto da circa 213.000 vertici, è stato decimato con Meshlab¹¹² portando il numero dei vertici a circa 50.000; infine la maglia è stata ottimizzata attraverso l'applicazione Instant Meshes¹¹³ e nuovamente importata in Metashape, dove si è proceduto con la riproiezione della texture. Il modello esportato in formato .obj e le foto esportate in formato .TIF sono infine stati caricati

¹¹² <https://www.meshlab.net/>

¹¹³ <https://github.com/wjakob/instant-meshes>

nel drive del progetto e condivisi con il team di lavoro, il quale ha proseguito con le restanti fasi di metadattazione degli oggetti.

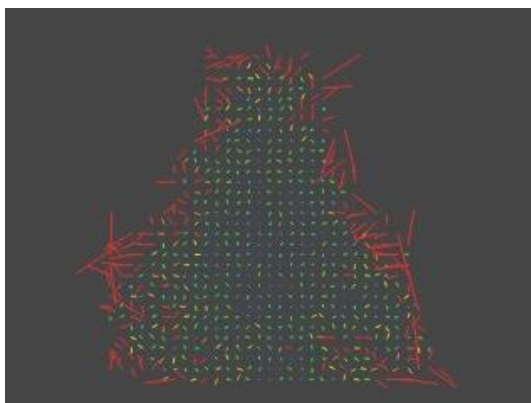


Figura 6 - Grafico dei residui



Figura 15- Modello 3D del basilisco

Capitolo secondo

1 Archiviazione dei dati ottenuti a fini di conservazione, revisione e riuso

Come accennato nel primo capitolo, la rapida evoluzione delle tecnologie di scansione ha condotto a una crescita esponenziale della produzione e dell'utilizzo di dati 3D (Koller et al. 2010). Sebbene anche l'attenzione agli aspetti legati alla conservazione di tali dati sia notevolmente aumentata negli ultimi anni, gli sforzi compiuti in quest'ambito appaiono sostanzialmente in ritardo rispetto a quelli per creare e acquisire nuove risorse; mentre la ricerca e la pratica della curatela digitale continuano a maturare, la ricerca empirica ha prodotto finora pochi risultati (Karatas & Lombardo 2020). Come ben evidenziato in Moore et al. (2022) la “democratizzazione della digitalizzazione” è stata raggiunta prima che gli standard e le pratiche di conservazione fossero ben consolidate, lasciando gli operatori 3D in una condizione di stallo (Moore et al. 2022). La mancanza di tali standard, d'altronde, deriva anche dalla natura stessa degli oggetti 3D, caratterizzati da una maggiore complessità rispetto ad altri tipi di dati già da tempo ampiamente disponibili e utilizzati per documentare il Patrimonio Culturale come le immagini (Knazook et al. 2023, Barzaghi et al. 2024).

A tal proposito, una delle differenze frequentemente riconosciute, oltre alle più ovvie considerazioni relative alla quantità di spazio necessario per l'archiviazione, riguarda le competenze e il tempo richiesti per la produzione di queste due diverse forme di rappresentazione. Nel caso degli oggetti 3D gli output da realizzare portano spesso alla creazione di team interdisciplinari composti sia da modellatori che da esperti di dominio; inoltre, i progetti, per essere portati a termine generalmente necessitano di lavorazioni composte da più fasi (Münster 2013, Lauro & Lombardo 2023, Barzaghi et al. 2024). Come descritto nel capitolo precedente, ciò conduce alla generazione di diversi output che vanno dalla registrazione dei dati grezzi fino alle elaborazioni eseguite per trasformare i dati raccolti in riproduzioni 3D o informazioni utili al lavoro di modellazione (Homburg et al. 2021, Bertacchi et al. 2023). In base agli obiettivi del progetto e agli strumenti utilizzati possono essere esportati diversi tipi di file e formati di visualizzazione, ciascuno dei quali è adatto a supportare una specifica funzione; ad esempio, se lo scopo principale è quello di utilizzare tali materiali per la creazione di un'applicazione web interattiva sarà opportuno codificare i dati in formati come glTF¹¹⁴ o X3D¹¹⁵, mentre se l'esigenza è quella di produrre una stampa 3D dell'oggetto potrebbero essere impiegati formati come 3MF¹¹⁶ o STL¹¹⁷ (VIGIE 2020/654, Moore et al. 2022). In tal senso, l'oggetto 3D per svolgere a pieno la funzione per la quale è stato creato, necessita di essere “formattato” e visualizzato in modi differenti. Nonostante le stesse considerazioni possano in parte valere anche per le immagini (siano esse statiche o in movimento), queste ultime, oltre a poter contare su formati ormai ampiamente diffusi e accessibili, solitamente sono frutto di processi di creazione più lineari rispetto alle riproduzioni tridimensionali (Homburg et al. 2021, Knazook et al. 2023)¹¹⁸. Ad esempio, in riferimento alle immagini aeree prodotte per il progetto Cherish, Mackinnon (2023) osserva che queste possono essere utilizzate sia come “oggetti discreti” sia come componenti di “costrutti digitali”

¹¹⁴ <https://www.khronos.org/glTF>

¹¹⁵ <https://www.web3d.org/x3d/what-x3d>

¹¹⁶ <https://3mf.io/>

¹¹⁷ https://www.fabbers.com/tech/STL_Format

¹¹⁸ I formati di dati per le immagini fisse sono per lo più omogenei, grazie a una serie di linee guida per la digitalizzazione sviluppate per il settore e ampiamente adottate. I formati aperti, ben documentati, facilmente accessibili e conservabili, come JPEG, TIFF, PNG e PDF, sono quasi universalmente accettati. Knazook et al. (2023). Esistono inoltre standard ben definiti anche per la descrizione dei metadati, come l'Exchangeable Image File Format (EXIF) o l'Extensible Metadata Platform (XMP). Homburg et al. 2021

più ampi (Mackinnon 2023). Ciò significa che mentre una singola fotografia può essere impiegata come unità autonoma, necessitando solo di elaborazioni minime per assolvere alla sua funzione, un modello 3D, al contrario, rappresenta spesso il risultato di una complessa integrazione di dati e di processi, rispetto ai quali il prodotto finale non può essere considerato indipendente. Inoltre, come dimostrano anche studi più recenti, gli oggetti tridimensionali, potendo fornire maggiori indizi sulla profondità e le relazioni spaziali, provocano risposte neurali più forti, innescando un senso di “agibilità” (“actability”) (Snow & Culham, 2021, Deng et al. 2024). Dal punto di vista dei dati che un file 3D può veicolare, la letteratura di riferimento individua almeno quattro categorie di informazioni, vale a dire geometria, aspetto, scena e animazioni; a seconda dei formati utilizzati queste proprietà possono essere conservate o perse (McHenry & Bajcsy 2008, Potenziani et al. 2018, Barzaghi et al. 2024). Un caso tipico riguarda i diversi shaders generati per simulare le proprietà di materiali specifici, che possono includere ad esempio la mappatura delle normali, le riflessioni su superfici o rappresentare eventuali proprietà diffuse e di trasparenza.¹¹⁹ A seconda del formato scelto, queste informazioni possono essere mappate sul modello o essere conservate in un file separato, solitamente PNG¹²⁰ o JPG¹²¹ (Barzaghi et al. 2024). In quest’ultimo caso, le possibilità di “smarrire” i dati relativi all’aspetto del modello diventano più consistenti. Alla luce di queste brevi considerazioni risulta evidente quanto una corretta gestione dei dati sia essenziale per tutti gli oggetti digitali e diventi cruciale nel caso degli oggetti 3D. Dal momento che tali risorse sono spesso il prodotto di tecniche, strumentazioni, flussi di lavoro nonché competenze eterogenee esse necessitano di piani di curatela appropriati, in grado di garantire la corretta organizzazione e trasmissione delle informazioni che le accompagnano (Fernandez 2019). Per rispondere alle sfide poste dai processi di digitalizzazione, all’inizio degli anni 2000, sono stati messi a punto i primi quadri di riferimento relativi alla corretta gestione dei dati prodotti. Il white paper pubblicato dal team della Stanford University relativo alla digitalizzazione condotta nell’ambito del “Digital Michelangelo Project” è in tal senso indicativo; tra le maggiori sfide poste dal “salto” ai contenuti 3D gli autori includono non solo problemi di indicizzazione ma anche temi riguardanti la distribuzione, la visualizzazione, nonché le difficoltà legate alla definizione delle licenze (Levoy & Garcia-Molina 2000). Il *Digital Data Curation Lifecycle Model*, può essere considerato a tal proposito come uno dei primi strumenti pensati per favorire la conservazione e il riuso dei materiali digitali; sebbene il modello non sia stato sviluppato con riferimento specifico ai dati 3D prodotti nell’ambito del Patrimonio Culturale, esso fornisce una panoramica grafica di alto livello delle principali fasi che caratterizzano l’intero ciclo di vita della risorsa digitale, consentendo di individuare le azioni da intraprendere per garantire la sua conservazione a lungo termine (Higgins 2008, Abbott 2008, Higgins 2011). Al centro di questo modello troviamo i dati, intesi in questo contesto come qualsiasi informazione in forma binaria riguardante sia “oggetti semplici”, (come ad esempio testi, immagini, suoni), sia “oggetti complessi” (creati cioè a partire dalla combinazione di altri oggetti digitali). Le azioni suggerite possono essere applicate per pianificare attività a differenti livelli di granularità, fornendo prima indicazioni di più ampio respiro, applicabili all’intero ciclo di vita delle risorse digitali ed elencando poi, più in dettaglio, tutte le varie fasi che compongono un piano di curatela, dalla sua “concettualizzazione” fino alle azioni necessarie a garantire l’accesso, il riuso e la trasformazione dei dati originali.¹²²

¹¹⁹ Per un’analisi dettagliata si veda McCool & Heidrich 1999.

¹²⁰ <http://www.libpng.org/>

¹²¹ <https://jpeg.org/>

¹²² Le azioni sequenziali elencate all’interno del quadro della curatela digitale prevedono i seguenti step: 1) Concettualizzare e pianificare la creazione dei dati, incluse le opzioni di storage; 2) Creazione o ricezione dei dati e dei metadati; 3) Valutazione e selezione; 4) Trasferimento dei dati in un archivio o repository; 5) Conservazione a lungo termine e mantenimento dell’ “autorevolezza dei dati”; 6) Deposito sicuro dei dati basato su standard condivisi; 7) Gestione degli accessi per uso e riutilizzo; 7) Trasformazione, intesa sia come eventuale necessità di migrare i dati in un formato diverso sia come possibilità di creare nuovi risultati. Le azioni occasionali fanno invece riferimento a operazioni che dovrebbero avvenire a seconda dei casi e comprendono: 1) L’eventuale smaltimento o trasferimento dei dati in un

Sebbene questo modello sia stato sviluppato per supportare una “conservazione attiva” dei dataset digitali, già nelle sue prime formulazioni la DDC riconosce alcuni dei possibili limiti dello schema, come la difficoltà di disporre di adeguate infrastrutture e finanziamenti o la mancanza di una terminologia comune tra i diversi attori che partecipano al processo di gestione dei dati (Abbott 2008). Il flusso di lavoro tipico comprende infatti una moltitudine di attività che spaziano tra diversi domini e competenze, prevedendo: la valutazione, la classificazione, l’indicizzazione, la catalogazione e la gestione delle autorità, nonché la valorizzazione, la pubblicazione e l’archiviazione nei depositi (Karatas & Lombardo 2020). Parallelamente alla formulazione di questo quadro di riferimento sono stati elaborati documenti come la Carta di Londra che hanno invece fornito raccomandazioni specifiche per la documentazione e la gestione dei materiali digitali legati al patrimonio culturale, stabilendo alcuni fondamenti relativi alla creazione e all’uso delle visualizzazioni “computer-based”; anche in queste indicazioni viene posta maggiore attenzione alla sostenibilità dei dati e ai concetti di trasparenza e accessibilità (Beacham et al. 2006, Lopez et al. 2011, Denard 2012). Questi principi sono stati ulteriormente rafforzati dalla nascita delle prime infrastrutture dedicate alla conservazione del Patrimonio Digitale Europeo e dalle contestuali raccomandazioni della Commissione Europea del 27 ottobre 2011 (2011/711/UE),¹²³ sulla digitalizzazione e l’accessibilità in rete dei materiali culturali. In questi stessi anni vengono create le prime vere fondamenta per la costruzione di un archivio centralizzato a livello europeo, con l’inaugurazione nel 2008 di Europeana.¹²⁴ Nella raccomandazione del 2011 si sottolinea, a tal proposito, la necessità di aumentare il volume delle risorse digitalizzate da pubblicare nella nuova piattaforma.¹²⁵ Il documento menziona inoltre la possibilità di ricorrere a forme di web harvesting, al fine di garantire la raccolta e l’indicizzazione anche dei materiali non depositati ma presenti sul web; allo stesso tempo, viene incoraggiata l’istituzione di aggregatori nazionali capaci di fornire a Europeana contenuti provenienti da diversi settori (2011/711/UE).

Nonostante questi sforzi, ancora nel 2009 in Koller et al. (2009) viene sottolineata la mancanza di una serie di elementi ritenuti essenziali per il corretto scambio dei dati digitali 3D. Gli autori fanno riferimento alla necessità di creare archivi non solo aperti ma anche scientificamente “autentici” sull’esempio delle riviste tradizionali, con meccanismi standard per la conservazione, la revisione paritaria, la pubblicazione, l’aggiornamento e la diffusione dei modelli. Le sfide individuate includono in particolare la gestione dei diritti digitali per i modelli 3D, la chiara rappresentazione dell’incertezza nelle ricostruzioni, il controllo delle versioni, la messa a punto di strutture di metadati efficaci, la conservazione a lungo termine, l’interoperabilità e la possibilità di effettuare ricerche mirate sui dati (Koller et al. 2009). Nell’evidenziare la necessità di associare ai modelli i relativi metadati, gli autori pongono particolare enfasi anche sui metodi di visualizzazione di tali informazioni, proponendo di elaborare forme di esplorazione interattiva basate su modelli modulari riferibili alle diverse aree che compongono il modello 3D. Sempre in questa direzione risultano particolarmente interessanti le considerazioni relative alle modalità di visualizzazione dell’incertezza dei dati rappresentati. Come già accennato nel primo capitolo e come anche riportato nello studio in esame, la qualità sempre più elevata del rendering può finire infatti per mascherare o nascondere questo grado di incertezza, rendendo difficile la corretta interpretazione dei dati visualizzati. Gli autori suggeriscono pertanto lo sviluppo di una simbologia condivisa e tecniche di rappresentazione basate sul rendering e l’animazione (Koller et al. 2009). Sebbene siano passati ormai quasi vent’anni dalla nascita della

altro archivio o deposito; 2) Ulteriori controlli per la valutazione dei dati; 3) Migrazione in formati diversi (Hinggens 2008).

¹²³ Raccomandazione della commissione del 27 ottobre 2011 sulla digitalizzazione e l’accessibilità in rete dei materiali culturali e sulla conservazione digitale (2011/711/UE). <https://eur-lex.europa.eu/>

¹²⁴ <https://www.europeana.eu/it>

¹²⁵ In riferimento all’Italia il primo obiettivo posto dalla commissione prevedeva il raggiungimento di un numero di beni digitalizzati pari a circa 3 milioni entro il 2015.

DDC e dei primi studi sugli archivi digitali 3D, molti dei problemi emersi nelle indagini menzionate sembrano essere in parte simili a quelli discussi ancora oggi; come precisato in Moore et al. (2022), infatti, è importante riconoscere che l'utilità dei dati digitali 3D in molte applicazioni dipende in modo critico anche dalla disponibilità di un sistema che consenta agli utenti di visualizzare e interagire con i dati (Moore et al. 2022). In tal senso anche se molte delle sfide elencate nei primi anni di implementazione delle strategie di gestione sono state in parte risolte, altre sono ancora oggetto di discussione e ricerca. Ad esempio, la questione relativa alla corretta rappresentazione dei dati trasmessi, seppure non sia giunta a una piena maturazione, ha compiuto enormi passi in avanti con lo sviluppo di ontologie e vocabolari specifici per il settore culturale, tra cui ad esempio i modelli proposti dall'International Council on Museums's International Committee for Documentation (CIDOC) e quelli messi a punto dai ricercatori che supportano Europeana (Liu et al. 2023). Inoltre, molta parte della ricerca condotta nell'ambito delle Digital Humanities si è concentrata sullo sviluppo di sistemi basati su Linked Open Data e sul Semantic Web, al fine di favorire l'integrazione delle informazioni e fornire così un approccio olistico alla ricerca di contenuti riguardanti i beni culturali digitalizzati (Meyer et al. 2007, Doerr 2007, Fensel et al. 2011).

Nel frattempo le istituzioni e le organizzazioni europee hanno proseguito con la messa punto di best practice, sviluppando nuove sinergie e infrastrutture. Il progetto 3D-Icons, ad esempio, si è concentrato sulla documentazione e distribuzione dei dati 3D per i siti del patrimonio mondiale dell'UNESCO.¹²⁶ Progetti come ARIADNE hanno lavorato sulla fornitura di competenze e infrastrutture centralizzate per la comunità,¹²⁷ mentre il progetto INCEPTION ha raggiunto notevoli risultati nello sviluppo e nell'implementazione di nuove tecnologie per la modellazione semantica 3D.¹²⁸ L'Archaeological Data Service (ADS), con sede nel Regno Unito, ha redatto una guida alle buone pratiche per i dati archeologici che include fotogrammetria close-range, scansione laser e realtà virtuale con informazioni sull'archiviazione di questi dati (Richards-Rissetto & von Schwerin 2017).¹²⁹ La pubblicazione dei principi FAIR nel 2016 ha fornito un ulteriore e importante contributo, formulando una serie di linee guida finalizzate a migliorare l'infrastruttura che sostiene il riuso dei dati in ambito accademico. I principi si riferiscono a tre tipi di entità: dati (o qualsiasi oggetto digitale), metadati (informazioni su uno specifico oggetto digitale) e infrastruttura (il framework in cui sono contenuti gli oggetti digitali), ponendo un'enfasi specifica sull'opportunità di creare dati *machine readable* e sulla necessità di estendere il concetto di "dati" anche ad algoritmi, strumenti e flussi di lavoro. Similmente alla filosofia adottata nel gettare le basi della DDC, il quadro di riferimento proposto segue una logica di tipo ciclico, secondo cui una buona gestione dei dati dovrebbe anzitutto garantire un processo continuo di scoperta, valutazione e riuso (Wilkinson et al. 2016). Queste raccomandazioni hanno dato nuovo impulso alle ricerche volte a rendere FAIR anche set di dati complessi, come quelli ottenuti dalle tecniche di rilievo e ricostruzione tridimensionale. In anni recenti, dunque, gli studi indirizzati allo sviluppo di profili applicativi e ontologie specifiche per il 3D sono anch'esse aumentate, seppure, come accennato, molte delle norme stabilite in quest'ambito sono ancora in fase di definizione (Amico & Felicetti 2023, Corcho et al. 2024). Relativamente alla necessità di progettare schemi di metadazione adeguati permane infatti una certa difficoltà nello stabilire quali siano i parametri essenziali da documentare durante il processo di digitalizzazione; ad esempio alcuni autori sottolineano l'importanza di documentare in modo più accurato le scelte fatte dai "modellatori" (Richards-Rissetto & von Schwerin 2017); altri studiosi hanno invece proposto approcci più operativi volti a individuare all'interno del flusso di lavoro i punti critici (PIPs) in cui sarebbe opportuno registrare i metadati relativi alle elaborazioni (Moore et al. 2022). Al di là delle

¹²⁶ <http://3dicons-project.eu/>

¹²⁷ www.ariadne-infrastructure.eu/

¹²⁸ <https://www.inception-project.eu/en>

¹²⁹ <https://archaeologydataservice.ac.uk/>

informazioni che descrivono l'oggetto fisico e il suo contesto storico, la documentazione sistematica dei parametri associati ai modelli acquisiti o ricostruiti risulta infatti una pratica ancora poco diffusa e per lo più inerente ai progetti che dispongono di consistenti finanziamenti pubblici (Wilkinson et al. 2016, Moore et al. 2022 Jäckel & Lehmann 2023, Lauro & Lombardo 2023); come riportato in Fernandez (2019) nonostante i piani di gestione dei dati stiano diventando sempre più parte della documentazione richiesta dagli enti di finanziamento, è importante notare che molti ricercatori spesso non possiedono né il tempo né le risorse adeguate a dare attuazione a questi piani (Fernandez 2019). È importante sottolineare, tuttavia, che vi sono casi in cui i materiali digitalizzati non vengono diffusi o pubblicati per il timore che i dati vengano “violati”, soprattutto nel caso di ricerche che sono ancora in corso d'opera (Gualandi et al. 2022).

Come precisato anche nei principi FAIR, d'altra parte, l'accessibilità ai dati prodotti non significa che questi debbano essere necessariamente “aperti” o “liberi”; piuttosto questo termine implica l'uso di protocolli che permettano, se necessario, di chiarire le condizioni esatte in base alle quali è possibile accedere a determinate risorse. Ciò può avvenire, ad esempio, tramite un processo di autenticazione e attraverso un'attenta gestione delle licenze d'uso.¹³⁰ Come suggeriscono diversi studi e le recenti linee guida prodotte in ambito europeo e nazionale, molti dei problemi legati allo scarso riuso dei dati prodotti dalle istituzioni culturali potrebbero essere mitigati da una più chiara definizione dei permessi e delle politiche sui diritti d'autore (Kelly 2019, Barzaghi et al. 2024).¹³¹ Il deposito dei dati in un archivio stabile, inoltre, potrebbe favorire tutte quelle azioni finalizzate a garantire la loro conservazione a lungo termine, come l'eventuale migrazione in altri formati nel caso in cui quelli originariamente prodotti non siano più supportati. In tal senso, l'individuazione di un repository adeguato alle esigenze del progetto risulta particolarmente importante ed è non a caso, uno degli aspetti che occorre specificare nella compilazione del DMP (Williams et al. 2017). La scelta del luogo in cui depositare i dati, pertanto, deve essere fatta con attenzione; in ambito accademico ciò potrebbe richiedere la verifica di alcuni requisiti, tra cui la possibilità di creare per ogni dataset un identificativo unico (DOI) che consenta di rintracciare e citare facilmente le risorse (Corcho et al. 2021, Rodrigues & Lopes 2022). Come vedremo, attualmente, esistono diversi repository e piattaforme che possono essere utilizzati per archiviare i dati prodotti; sebbene da un lato ciò permetta a ricercatori e utenti di selezionare i servizi che meglio rispondono ai propri bisogni, dall'altro allontana l'ecosistema dei dati dalla centralizzazione, rendendolo meno integrato ed esacerbando così il problema della scoperta e della riutilizzabilità sia per gli stakeholder umani che per quelli computazionali (Koller 2009, Wilkinson et al. 2016). Tale condizione ha evidenziato la mancanza di un'infrastruttura in grado di coordinare le diverse risorse disponibili. Questo ha portato all'avvio di una nuova fase di ricerca volta alla creazione di uno spazio europeo condiviso, l'European Open Science Cloud (EOSC), concepito come punto di riferimento per promuovere la scienza aperta, favorire lo scambio sicuro dei dati e migliorare l'efficienza operativa dell'intero ecosistema culturale.¹³²

¹³⁰ <https://www.go-fair.org/>

¹³¹ Sia le raccomandazioni prodotte da portali istituzionali come Europeana che quelle contenute all'interno del Piano di Digitalizzazione Nazionale (PND) incoraggiano ad utilizzare licenze aperte o quantomeno specifiche dichiarazioni in materia di copyright per le collezioni digitali prodotte. <https://pro.europeana.eu/page/open-and-reusable-digital-cultural-heritage>

¹³² <https://eosc.eu/> Per una panoramica sulla genesi di EOSC si veda l'articolo scritto da Burgelman (2021).

1.1 Approcci alla metadattazione per il Patrimonio Culturale 3D

Sebbene inizialmente la creazione e la gestione dei metadati fossero principalmente responsabilità dei professionisti dell'informazione, con l'aumento delle risorse digitali e la loro diffusione online, le considerazioni sui metadati sono diventate importanti anche per altri creatori di contenuti, nonché per gli utenti finali (Gilliland 2008). Per far fronte alle progressive esigenze di descrizione dei dati, nel corso degli ultimi decenni sono stati prodotti diversi standard di metadati poi adattati a specifici domini e output. Dublin Core, ad esempio, è uno dei primi schemi messi a punto per facilitare la registrazione e la condivisione delle informazioni presenti in rete; al fine di rendere questo modello facilmente implementabile, i suoi sviluppatori hanno intenzionalmente fatto ricorso a una serie di categorie di natura molto generica, identificando 15 diversi campi di metadati riferiti a una serie di attributi ritenuti essenziali (Riley 2017, Bhardwaj 2023).¹³³ Questo approccio, volutamente flessibile, ha favorito l'implementazione dello schema in molti contesti; tuttavia, con l'emergere di nuovi tipi di dati, è gradualmente emersa l'esigenza di arricchire gli schemi più generici con campi via via più specifici e dettagliati. Parallelamente, lo sviluppo di tecnologie come i Linked Open Data e il Semantic Web ha ulteriormente accresciuto il valore della creazione dei metadati, aprendo nuove opportunità di interconnettere le informazioni provenienti da fonti diverse e generare così conoscenze inedite attraverso queste connessioni (Riley 2017).¹³⁴ Non a caso, come precedentemente accennato, negli ultimi anni la ricerca sui metadati ha subito un'accelerazione, caratterizzata dallo sviluppo di nuovi standard interoperabili e dalla costruzione di numerose ontologie specifiche per i diversi domini di riferimento (Bhardwaj 2023).¹³⁵ Soprattutto nell'ambito del Patrimonio Culturale, il costante aumento delle collezioni e dei dataset digitali ha richiesto la messa a punto di modelli efficaci, in grado di integrare le informazioni prodotte dalle diverse istituzioni culturali, garantendo al contempo il livello di dettaglio e specificità richiesto dai differenti contesti operativi (Elings & Waibel 2007, Vlachidis et al. 2017, Liu et al. 2023). Una delle sfide maggiori è infatti quella di rendere i contenuti reciprocamente interoperabili, in modo che i dati acquisiti o creati possano essere non solo ricercabili ma anche collegati e presentati in modo coerente e "armonizzato" (Vlachidis et al. 2017). A tal fine, istituzioni come gallerie, biblioteche, archivi e musei (GLAM) hanno sviluppato degli "artefatti semantici", formalizzati in ontologie, vocabolari, schemi di metadati e standard che possono essere utilizzati per lo scambio e il riutilizzo dei dati sia da parte degli esseri umani che delle macchine (Corcho et al. 2024, Barzaghi et al. 2024).¹³⁶

Oltre alla necessità di interconnettere le risorse digitali, le problematiche affrontate dalla ricerca contemporanea riguardano la definizione di un quadro uniforme, che includa le informazioni semantiche necessarie e l'individuazione dei formati più adatti a garantire una conservazione a lungo

¹³³ Titolo, descrizione, creatore, data, formato del file, identificatori, lingua, editore, diritti, fonte, soggetto, tipo di risorsa e relazioni, ovvero eventuali connessioni con altri set di dati. <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/>

¹³⁴ La ricerca sul Web Semantico è stata avviata dal W3C (World-Wide Web Consortium) nel 2001, mentre il concetto di Linked Data è stato introdotto da Tim Berners-Lee nel 2006. Nel web semantico, risorse di diversi tipi (pagine web, immagini, audio, video, contenuto 3D) vengono descritte utilizzando ontologie. L'idea alla base di queste ricerche prevede che le organizzazioni pubblicino i loro dati strutturati sul Web, nominino esplicitamente le entità in modo che queste possano essere referenziate da altri e si colleghino ai dati di altri per costruire una rete informativa mondiale (Riley 2017, Flotynski & Walczak 2017).

¹³⁵ Le ontologie costituiscono il fondamento del web semantico in diversi domini e applicazioni (Flotynski & Walczak 2017). Nel campo delle scienze informatiche e dell'ingegneria basata sulla conoscenza, l'ontologia viene definita una "specificazione formale e condivisa di una concettualizzazione", dove "concettualizzazione" si riferisce alla modellazione di fenomeni astratti, "formale" implica la leggibilità per i computer, e "condivisa" indica un consenso tra esperti di dominio; cfr. Messaoudi 2018.

¹³⁶ Per le definizioni di artefatto semantico e per un approfondimento sui vocabolari si vedano, Corcho et al. 2024 e Hugo et al. 2022.

termine delle risorse acquisite e/o create (VIGIE 2020/654). Nel più ampio contesto della cura dei dati digitali, esistono numerosi standard implementabili nei progetti di acquisizione dedicati ai beni culturali; un primo punto di riferimento è costituito dall' Open Archival Information System (OAIS), un modello messo a punto nel 1982 dal Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), divenuto in seguito uno standard dell'International Organization for Standardization (ISO 14721).¹³⁷

A partire da questo framework sono state formulate molte delle attuali best practice relative alla conservazione e alla manutenzione delle informazioni digitali all'interno di depositi e infrastrutture destinate all'archiviazione a lungo termine dei dati (Moore et al. 2022, Amico & Felicetti 2023). In questo scenario, un altro standard di alto livello è il modello PREMIS (*PREservation Metadata: Implementation Strategies*) introdotto dalla Library of Congress a partire dal 2006.¹³⁸ Lo schema sviluppato da questo gruppo di lavoro dettaglia metadati quali l'identità, la condizione, il contesto e la storia di un oggetto digitale, comprese le informazioni sulla sua creazione, alterazione, conservazione e accesso nel tempo (Masenya 2021); le cinque entità individuate all'interno di questo framework sono, più in particolare, Oggetti, Ambienti, Eventi, Agenti e Diritti. Ognuna di queste entità ha una serie di proprietà rilevanti per il loro scopo; per esempio, le proprietà degli oggetti includono `objectIdentifier`, `preservationLevel`, `fixity`, `size` e `format`; le proprietà degli eventi includono `eventIdentifier`, `eventType` e `eventDateTime` (Riley 2017). Si tratta di uno standard internazionale implementato in molti progetti di conservazione digitale, pensato per essere facilmente adattabile a diversi contesti e progettato per assistere i depositi digitali nell'acquisizione di informazioni vitali relative alla conservazione digitale (Masenya 2021).

In tal senso, viene spesso citato come un importante punto di riferimento per il settore dell'archiviazione (Moore et al. 2022, Amico & Felicetti 2023). In linea con quanto indicato da questi modelli, all'interno dei diversi schemi di metadattazione comunemente utilizzati, si possono distinguere alcune categorie ricorrenti; sulla base della classificazione inizialmente proposta in Gilliland (2008) tali categorie riguardano essenzialmente metadati amministrativi, descrittivi, tecnici, di conservazione e d'uso; nella tassonomia presentata in Riley (2017) queste tipologie vengono riorganizzate e ampliate con l'inserimento di due ulteriori categorie relative alle licenze sul contenuto e alla struttura delle risorse.¹³⁹ Per rappresentare queste informazioni e renderne possibile lo scambio, normalmente, si utilizzano linguaggi e codifiche standard, come l'eXtensible Markup Language (XML).¹⁴⁰ Sebbene quest'ultimo sia ormai riconosciuto come uno dei formati più comuni e flessibili, esso non fornisce tuttavia un framework semantico per rappresentare le relazioni tra i dati, precludendo la possibilità di interconnettere le informazioni presenti sul web (Van Deursen 2008, Alexiev 2018). A tal fine, il World Wide Web Consortium (W3C) ha formulato una serie di specifiche che possono essere utilizzate per riconfigurare le informazioni in modelli semantici, come il Resource

¹³⁷ Per quanto riguarda il modello OAIS sono state pubblicate diverse versioni; la prima pubblicazione ufficiale risale al gennaio 2002 (CCSDS 650.0-B-1), mentre una seconda versione è stata pubblicata nel giugno 2012 (CCSDS 650.0-M-2 - ISO 14721:2012.). Nell'ottobre 2020 è stata poi redatta una più recente bozza (CCSDS 650.0-M-3 - Draft) pubblicata infine come Magenta Book a dicembre 2024 (CCSDS 650.0-M-3). Tutte le versioni possono essere liberamente consultate online, eccetto la bozza del 2020 per cui è necessario procedere con un'autenticazione. <https://public.ccsds.org/Publications/RefModel.aspx>

¹³⁸ <https://www.loc.gov/standards/premis/>

¹³⁹ I metadati amministrativi vengono usati nella gestione e nell'amministrazione di collezioni e risorse informative; Riley fa rientrare in questa stessa categoria anche i metadati tecnici (ad esempio informazioni utili per la decodifica e i rendering dei file e in generale tutte le informazioni relative alla digitalizzazione come formato o peso), i metadati di conservazione (che supportano la gestione a lungo termine e la futura migrazione) e i metadati sui diritti. I metadati descrittivi, come suggerisce il termine, servono invece a fornire tutte le indicazioni utili alla scoperta e alla comprensione delle risorse. In ultimo i metadati strutturali sono quelli che permettono di descrivere le relazioni tra le varie parti di un oggetto informativo (Riley 2017).

¹⁴⁰ <https://www.w3.org/XML>.

Description Framework (RDF),¹⁴¹ il quale permette di modellare dati provenienti da diverse fonti in triple (soggetto-predicato-oggetto) che possono essere connesse logicamente.¹⁴² Per arricchire ulteriormente queste relazioni, vengono utilizzati strumenti come RDF Schema (RDFS)¹⁴³, che fornisce un vocabolario base per definire classi e proprietà, e il Web Ontology Language (OWL),¹⁴⁴ che estende RDF offrendo maggiore espressività semantica (Kassimi 2011, Riley 2017, Flotyński et al. 2020).¹⁴⁵ Per specificare l'associazione tra elementi-attributi e classi-proprietà vengono utilizzati linguaggi di mappatura generici come l'RDF Mapping Language (RML)¹⁴⁶ le cui regole possono essere personalizzate (Dimou 2014, Moretti 2024); infine, a seconda delle necessità, le relazioni stabilite in RDF vengono serializzate utilizzando una varietà di formati di rappresentazione digitale, ad esempio RDF Turtle,¹⁴⁷ OWL-RDF, XML, JSON LD.¹⁴⁸

Questi strumenti consentono di trasformare le informazioni di partenza in un grafo che può essere integrato con altre tecnologie tipiche del Semantic Web, come SPARQL¹⁴⁹ (W3C Consortium, 2013), il linguaggio di interrogazione più utilizzato per le ontologie e le basi di conoscenza basate su RDF (Riley 2017, Fathalla et al. 2019).¹⁵⁰ Come accennato, nel campo dei beni culturali un noto tentativo di fornire un meccanismo in grado di integrare informazioni provenienti da fonti diverse è il Conceptual Reference Model (CRM),¹⁵¹ sviluppato da CIDOC per archiviare le informazioni in ambito museale (Crofts et al. 2003, Garozzo et al. 2017). Come emerge dalla letteratura, questo modello concettuale, standardizzato come ISO 21127, costituisce una base comune per la descrizione di concetti e relazioni riguardanti la documentazione del Patrimonio Culturale; si tratta quindi di uno strumento progettato per modellare informazioni complesse e interdisciplinari (Riley 2017, Homburg et al. 2021, Moore et al. 2022, Barzaghi et al. 2024). In tal senso, esso fornisce un quadro di riferimento che può essere implementato indipendentemente dai sistemi o dai software utilizzati per gestire le collezioni, comportandosi come una sorta di “collante semantico” tra le diverse istituzioni (Doerr 2007, Tzitzikas et al. 2022). Più in particolare, il CRM si basa su una logica “orientata agli oggetti”, in cui ogni elemento viene trattato come un'entità individuale dotata di proprietà e relazioni; una sua caratteristica distintiva risiede infatti nell'attenzione rivolta agli eventi che riguardano gli oggetti rappresentati (Liu et al. 2023). Nella sua forma basilare, l'ontologia si compone di due elementi principali: Classi, usate per descrivere le entità, ad esempio luoghi, eventi, attori (persone che compiono azioni rilevanti), cose fisiche e altri oggetti informativi come ad esempio “E21 Person” per le persone e “E71 Human-Made Thing” per gli oggetti creati dall'uomo; Proprietà, usate per rappresentare le varie caratteristiche degli oggetti, ad esempio “P1 is identified by”, “P2 has a type” e “P46 is composed of”.

¹⁴¹ <https://www.w3.org/RDF/>

¹⁴² <https://www.w3.org/TR/rdf12-concepts/>

¹⁴³ <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

¹⁴⁴ <https://www.w3.org/OWL/>

¹⁴⁵ Dopo i primi linguaggi basati sulla sintassi XML (Extensible Markup Language) come Ontology Exchange Language (XOL), Ontology Markup Language (OML) sono stati sviluppati molti altri linguaggi, di cui OWL è uno dei più recenti. Si tratta di un linguaggio ontologico utilizzato per la specificazione di classi, proprietà e relative restrizioni ed è stato progettato per l'uso da parte di applicazioni che devono elaborare il contenuto delle informazioni invece di presentarle solo agli esseri umani. Abanda 2013.

¹⁴⁶ <https://rml.io/specs/rml/>

¹⁴⁷ <https://www.w3.org/TR/turtle/>

¹⁴⁸ <https://json-ld.org/> .

¹⁴⁹ <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>

¹⁵⁰ Per un approfondimento si veda Corcho et al. 2024.

¹⁵¹ <https://cidoc-crm.org>.

Nella versione attuale (7.2.4) rilasciata a Ottobre 2023, CIDOC-CRM include 81 classi, identificate con il prefisso "E" e 160 proprietà, identificate con il prefisso "P"; queste ultime, come accennato, permettono di collegare varie di tipologie di classi in modo semantico.¹⁵² Questa struttura può poi essere integrata con sottoclassi o nuove proprietà al fine di descrivere aspetti di dettaglio assenti nel modulo "core". A tal proposito, negli ultimi anni la comunità ha contribuito formulando nuove "estensioni", ad esempio per la descrizione di attività di conservazione, dipinti e altri casi specifici (Niccolucci 2017, Liu et al. 2023). Relativamente alle attività di digitalizzazione, l'estensione più significativa è CRM Digital (CRMdig), progettata proprio per rappresentare i flussi di lavoro da cui tipicamente derivano le riproduzioni digitali dei beni culturali; in tal senso questo modulo introduce una serie di entità che possono essere implementate nell'ontologia di base per descrivere, ad esempio, gli strumenti utilizzati, le attività di misurazione e più in generale le relazioni tra i dati "originali" e quelli "digitali". Al fine di rappresentare anche queste informazioni, CRMdig aggiunge due ulteriori tipi di istanze relative alle entità digitali ("D"), e alle proprietà specifiche del contesto ("L"); in questo modo è possibile rappresentare, ad esempio, la classe D11 Digital Measurement Event (che corrisponde a un evento di misurazione con dispositivi digitali) collegandola a un oggetto D9 Data Object attraverso proprietà pertinenti come L17 measured thing of type (per indicare il tipo di oggetto, come un dipinto o una scultura) e L20 has created.¹⁵³ La possibilità di estendere CRM con queste informazioni consente dunque di rappresentare la "provenienza" dei dati digitalizzati includendo i processi seguiti per la loro creazione ed elaborazione riconducendoli alle attività umane e computazionali (Doerr & Theodoridou 2011).

Non a caso CRMDig viene comunemente elencata tra le principali ontologie adatte alla rappresentazione dei modelli 3D creati nell'ambito del Patrimonio Culturale. A tal proposito, la letteratura di riferimento riporta una serie di altri "schemi" o strutture che possono essere utilizzati in conformità al modello concettuale messo a punto nel CRM. Lo schema di metadati CARARE, ad esempio, è stato sviluppato per i settori dell'archeologia e dell'architettura e applicato ai contenuti 3D in diversi progetti dell'UE (Masci et al. 2012, A. D'Andrea et al. 2013).¹⁵⁴ LIDO (Light Information Describing Objects) è stato invece proposto per gestire le informazioni relative a tutti i tipi di oggetti museali e ai loro surrogati digitali;¹⁵⁵ più in particolare, si tratta di una soluzione pensata per favorire la raccolta e la sistematizzazione delle informazioni provenienti da diversi database al fine di fornire una rappresentazione comune a risorse che non possiedono una struttura standard. Il suo obiettivo è dunque quello di uniformare tali dati mappandoli in un primo momento sul proprio schema e successivamente sul Data Model di Europeana (EDM).¹⁵⁶ Come riportato nella relativa documentazione, l'EDM è un modello che consente di presentare i dati in modi diversi a seconda delle pratiche dei vari domini che contribuiscono ai dati di Europeana. Esso infatti, pur includendo alcuni degli elementi del CRM si basa su una struttura molto più agile, pensata per consentire una maggiore flessibilità alle organizzazioni che intendono condividere le proprie collezioni. In questo senso, l'EDM viene presentato come un tentativo di trascendere le rispettive prospettive informative delle varie comunità che costituiscono Europeana, come i musei, gli archivi, le collezioni audiovisive e le biblioteche. Il modello infatti non è costruito su alcun particolare standard comunitario, ma adotta

¹⁵² Per una descrizione dettagliata dell'ontologia si veda la documentazione relativa all'ultima versione <https://cidoc-crm.org/Version/version-7.2.4>

¹⁵³ Per una descrizione completa delle classi e delle proprietà si veda la relativa documentazione rilasciata a Dicembre 2022 Definition of CRMdig v 4.0 <https://site2024.cidoc-crm.org/ModelVersion/version-4.0>

¹⁵⁴ Si veda inoltre la sezione progetti del sito web dell'associazione <https://www.carare.eu/en/our-association/>

¹⁵⁵ <https://cidoc.mini.icom.museum/>

¹⁵⁶ Si veda inoltre la sezione riguardante le strutture di metadati inclusa nel già citato studio della commissione Europea (VIGIE 2020/654); nel medesimo studio vengono incluse anche altre strutture adatte alla rappresentazione degli oggetti 3D tra cui lo Smithsonian 3D Metadata Model, lo standard MIDAS Heritage, Il Metadata Object Description Schema (MODS), il Visual Resources Association Core (VRA Core), METS e ArCO.

piuttosto un framework aperto e cross-domain basato sul Web semantico.¹⁵⁷ Come accennato, questo processo comporta la mappatura dei metadati provenienti da altri aggregatori su uno schema “object-centered”, in cui le informazioni vengono strutturate attorno all’entità culturale definita come edm:ProvidedCHO. In questo approccio, le entità vengono divise tra classi principali e classi contestuali: tra le prime sono incluse edm:ProvidedCHO (l’oggetto culturale), edm:WebResource (la rappresentazione digitale), e ore:Aggregation (l’insieme delle risorse correlate); le seconde comprendo invece edm:Agent, edm:Place, edm:TimeSpan e skos:Concept e possono essere usate per descrivere agenti, luoghi, periodi temporali e concetti correlati.

Sebbene questa struttura si basi su RDF, come sottolineato da alcuni autori, le tecnologie del Semantic Web non sono supportate all’interno di Europeana; inoltre, nonostante il portale dia accesso a moltissime risorse, queste ultime vengono spesso accompagnate da metadati generici che talvolta finiscono per appiattire la ricchezza delle informazioni raccolte dai contributori (Doerr et al. 2014, Alexiev 2018). Al fine di superare le problematiche descritte, Europeana ha lavorato costantemente per sviluppare e migliorare l’EDM, affrontando al contempo la sfida della qualità dei dati, in particolare in termini di riutilizzo e scoperta degli oggetti del patrimonio culturale (Amico & Felicetti 2023). Tuttavia, affinché un dataset possa essere ampiamente riutilizzato è necessario che i procedimenti adottati per la sua creazione siano documentati in modo appropriato (Fernandez 2019, Moore et al. 2022, Bajena 2023). Come già evidenziato in Doerr e Theodoridou (2011), infatti, i dati scientifici non possono essere compresi senza conoscere le circostanze e i metodi con cui sono stati prodotti (Doerr & Theodoridou 2011). Ciò è particolarmente evidente nel caso delle riproduzioni 3D, dove gli strumenti e i flussi di lavoro impiegati possono differire in modo significativo a seconda degli obiettivi e delle risorse dei progetti. Inoltre, come accennato, la complessità dei processi coinvolti nella creazione di questo tipo di dati può rendere il lavoro di documentazione particolarmente impegnativo. Una delle difficoltà rilevate riguarda, ad esempio, la selezione delle informazioni da registrare. Al fine di identificare con più consapevolezza quali elementi documentare, alcuni studiosi hanno sviluppato dei framework per individuare quali potrebbero essere i “punti critici” del processo di creazione dei dati. Tra questi, come accennato, vi è ad esempio il modello presentato in Moore et al. (2022), proposto in origine all’interno del VENUS Preservation Handbook dell’Archeology Data Service. In questo framework, chiamato *Preservation Intervention Points* (PIPs), vengono descritte le fasi considerate più rilevanti nella raccolta o creazione dei dati 3D in cui il responsabile di progetto identifica e registra le informazioni per la conservazione a lungo termine.

In generale queste decisioni si verificano quando il progetto arriva a una tappa predeterminata o quando i dati vengono trasformati in modo irreversibile. Nella fase di pianificazione, come visto in parte precedentemente, occorre valutare lo scopo della digitalizzazione, il riuso e i target previsti, nonché le esigenze di conservazione e comunicazione; in base agli obiettivi vengono inoltre stabiliti i formati e i possibili prodotti derivati dai dati 3D. Ad esempio già in questo momento potrebbe essere necessario stabilire se i file che si prevede di esportare possano essere abbastanza dettagliati da favorire il riuso per analisi future o se ciò che si intende depositare possa offrire a ricercatori futuri la possibilità di verificare l’accuratezza scientifica del dataset.

Un altro aspetto che occorre definire riguarda i diritti e le politiche di riuso, nonché il repository più adatto per l’archiviazione dei file; come precisato dagli autori nel caso non sia possibile optare per sistemi di conservazione a lungo termine a causa di limiti di finanziamento è sempre opportuno prevedere delle forme di diffusione alternative. Per la fase di raccolta, ovvero il momento in cui vengono generati i dati grezzi, è importante invece documentare le impostazioni usate per l’acquisizione, conservando, se disponibili, eventuali file prodotti dall’attrezzatura in uso; particolarmente importanti, inoltre, sono le informazioni contestuali relative alle condizioni ambientali e di lavoro. Relativamente all’elaborazione, è opportuno registrare tutte le modifiche

¹⁵⁷ <https://pro.europeana.eu/page/edm-documentation>

effettuate per trasformare i dati grezzi nell'output finale; ciò potrebbe comprendere ad esempio operazioni di pulizia, decimazione e ottimizzazione della mesh. Infine, se i dati intermedi sono considerati necessari per il futuro riuso, devono essere conservati nel pacchetto finale di dati (Moore et al. 2022). Un altro contributo che tenta di fornire un flusso di lavoro appropriato alla documentazione dei modelli 3D del Patrimonio Culturale è il protocollo sviluppato nell'ambito del progetto BeArcheo (Lauro & Lombardo 2023, Lauro & Lombardo 2023a).¹⁵⁸ In questo caso, gli autori si concentrano sulla gestione dei dati prodotti attraverso tecniche fotogrammetriche, al fine di coniugare i fondamenti teorici del CRM con le sfide pratiche poste dai progetti di digitalizzazione. Ispirandosi ai principi della DDC, l'indagine propone quindi un workflow composto da una serie di fasi ritenute fondamentali per il ciclo di vita degli oggetti digitali, adattandolo tuttavia alle esigenze specifiche dei processi di acquisizione image-based. Nonostante queste tecniche siano sempre più utilizzate, come evidenziato anche all'interno dello studio, occorre riconoscere la complessità insita nei procedimenti adottati; si tratta infatti di metodologie altamente modulari che non possono essere racchiuse in un singolo strumento. Per gestire la grande quantità di dati prodotti viene dunque proposto un protocollo costituito da cinque fasi principali (Fig. 17):

- Acquisizione;
- Elaborazione;
- Modellazione;
- Esportazione;
- Archiviazione

Ciascuna di queste fasi è ulteriormente suddivisa in sotto-fasi che dettagliano le azioni metodologiche da intraprendere per una corretta documentazione. Per quanto riguarda le fasi di pianificazione e raccolta, tra i materiali da conservare vengono inclusi la documentazione prodotta durante il sopralluogo, come i file di progettazione del rilievo, nonché le fotografie scattate e le informazioni dettagliate sulle procedure di acquisizione. Per la fase di elaborazione, invece, gli autori propongono di verificare l'omogeneità della nuvola di punti documentandola nella sua interezza con un video di massimo 1 minuto. La fase di modellazione, considerata in questo contesto come l'unica parte manipolativa, dovrebbe essere invece documentata registrando ogni operazione effettuata sui dati, riportando poi tutte le azioni in una scheda tecnica finale assieme alle altre informazioni. Dal momento che l'esportazione rappresenta un "punto di non ritorno" oltre il quale il modello diventa un oggetto definito, gli autori propongono di accompagnare l'output con una nota contenente il motivo che ha spinto all'uso di un formato specifico. Infine l'archiviazione viene suddivisa in due sotto-fasi di "Pre-Indicizzazione" e "Archiviazione e Indicizzazione finale", durante le quali viene dapprima effettuata una catalogazione preliminare di tutti i dati prodotti e in seguito il modello viene finalizzato per uno specifico caso di studio. L'intero procedimento viene infine riconfigurato e allineato alla rappresentazione ontologica fornita dal CRM. Sebbene sviluppato per un caso di studio basato su diverse procedure di acquisizione, il flusso di lavoro presentato in Barzaghi et al. (2024) presenta alcune analogie con il protocollo appena descritto. Come già anticipato nel precedente capitolo, l'obiettivo di questa indagine era quello di creare dati e metadati *FAIR-by-design* per la mostra temporanea "Ulisse Aldrovandi e le meraviglie del mondo". Il modello di riferimento adottato ha pertanto condotto alla strutturazione di un workflow orientato anzitutto alla produzione di dataset facilmente rintracciabili, accessibili, interoperabili e riusabili. Anche in questo caso il lavoro di digitalizzazione è stato suddiviso in diverse fasi e ha previsto un momento iniziale di progettazione. Tuttavia, a differenza del protocollo proposto per BeArcheo la fase iniziale di pianificazione è servita soprattutto alla preparazione dei dati da acquisire e archiviare. In questo senso il primo step ha riguardato la preparazione delle due tabelle destinate rispettivamente ad accogliere le informazioni sugli oggetti fisici e quelle relative al processo di digitalizzazione.

¹⁵⁸ <https://bearchaeo.unito.it/>

Per quanto riguarda la fase di acquisizione sono stati registrati il nome del gruppo di ricerca che ha effettuato il lavoro, i nominativi delle persone responsabili dell'acquisizione, la tecnica e gli strumenti utilizzati per raccogliere i dati grezzi e infine le date di inizio e fine del rilievo. Questa struttura è stata replicata per le fasi successive, sostituendo gli strumenti di acquisizione con i diversi software di elaborazione utilizzati per ogni step. Da un punto di vista operativo i passaggi registrati possono essere facilmente ricondotti a quelli visti in precedenza, con una quasi totale sovrapposizione delle fasi relative alla raccolta e al processamento dei dati (Fig. 16):

- Acquisizione;
- Elaborazione;
- Modellazione;
- Ottimizzazione;
- Esportazione;

Le maggiori differenze possono essere dunque rilevate per le restanti fasi relative all'archiviazione e alla pubblicazione dei dati. Dal momento che nello studio precedente non era prevista una forma di condivisione attraverso una piattaforma online ma solo il caricamento dei materiali nel database del progetto, possiamo escludere questo step e concentrarci solo sulla fase relativa alle procedure di archiviazione. Nel caso di studio in oggetto, queste procedure vengono analogamente suddivise in due sotto-fasi di “creazione dei metadati” (6a) e di “creazione della provenienza” (6b). Come riportato nello studio, al fine di rendere le informazioni interoperabili nel contesto del Semantic Web, in questa fase è stato necessario rimodellare le tabelle prodotte in formato RDF eseguendo un'elaborata conversione dei file csv in RML. Infine per tracciare la provenienza dei dati prodotti è stato impiegato l'OpenCitations Data Model (OCDM)¹⁵⁹, un framework che consente di catturare uno snapshot ogni volta che un'entità viene creata o modificata (Peroni & Shotton 2020, Barzaghi et al. 2024). In entrambi i casi analizzati, dunque, è stato necessario adattare il quadro di riferimento alle particolari necessità del progetto. Ciò emerge soprattutto nel lavoro di digitalizzazione della mostra temporanea, caratterizzato da un maggiore enfasi verso l'interoperabilità semantica dei dati prodotti. Le differenze riguardano tuttavia anche la natura delle informazioni registrate.

Nel primo caso emerge una maggiore attenzione per la documentazione degli aspetti tecnici del rilievo mentre nel secondo è possibile notare un maggiore controllo per quanto riguarda la registrazione dei metadati di provenienza. Sebbene infatti siano stati sistematicamente documentati gli strumenti e i software usati, non è stata posta particolare attenzione agli aspetti contestuali e ai metadati prodotti dai software di elaborazione. In questo senso, seppure gli oggetti siano stati digitalizzati con il proposito di renderli accessibili, ciò potrebbe precludere il loro uso per analisi più approfondite. A tal proposito Homburg et al. (2021) propongono un modello ontologico volto a documentare con maggiore attenzione gli aspetti relativi al processo di acquisizione 3D. Si tratta anche in questo caso di un modello progettato sulla base dei concetti forniti da CIDOC-CRM ma adattato al caso d'uso specifico. Lo schema proposto include tre categorie di metadati, riferibili alle informazioni sul progetto, alle operazioni eseguite durante la misurazione e alle proprietà del modello finale. Le fasi di elaborazione previste riguardano (Fig. 18):

- Oggetto fisico presente nel deposito;
- Acquisizione dei dati 3D,
- Elaborazione 3D (software di scansione);
- Elaborazione 3D (software di terze parti);
- Esportazione dei dati finali;

¹⁵⁹ <https://opencitations.net/model>

- Pubblicazione tradizionale;
- Pubblicazione dei dati;

I metadati relativi all'artefatto potrebbero includere informazioni sulla sua creazione fisica, come l'ora di creazione, il creatore e il processo di creazione, oltre al materiale, al contesto storico ed eventualmente alle iscrizioni o ad altre caratteristiche e informazioni importanti; nel modello proposto queste informazioni vengono descritte attraverso CRM. Le informazioni riguardanti il processo di acquisizione pongono già, invece, una serie di problemi; come sottolineano gli autori esse dipendono infatti da una serie di fattori che non possono essere stabiliti “a priori”. Ad esempio la scelta della strumentazione e il grado di accuratezza dipendono dallo scopo della digitalizzazione, dalle risorse disponibili e dalle condizioni ambientali. Sebbene tali informazioni non siano sempre disponibili, idealmente dovrebbero essere registrate. La fase di elaborazione dei dati grezzi comporta generalmente operazioni di pulizia della nuvola di punti, l'allineamento e la costruzione della mesh; i relativi metadati dovrebbero quindi comprendere tutte le impostazioni di calcolo utilizzate per ricostruire il modello. L'esportazione dei dati, infine, include la versione dell'oggetto 3D ottimizzata per uno scopo specifico. A questo punto, i metadati generati sono pronti per la pubblicazione, ma possono ancora essere sottoposti a una fase di interpretazione, cioè a una fase di ragionamento per calcolare i risultati e/o i punteggi delle metriche di qualità dei dati.¹⁶⁰ Riguardo alla registrazione dei metadati relativi al processo di scansione gli autori utilizzano un'estensione di PROV-O (Provenance Ontology),¹⁶¹ per descrivere anche i risultati intermedi e definire gli agenti (cioè algoritmi e persone) coinvolti nella creazione e nella modifica dei dati 3D. Tutti i processi utilizzati per manipolare le entità (come camera calibration, geometric modification, cleaning meshes) vengono invece mappati attraverso la classe “Algorithms”. La classe “Metrics” rappresenta i risultati di calcoli o parametri considerati adatti alla rappresentazione tramite metadati; “Interpretations” infine descrive i risultati metrici più rilevanti attraverso un intervallo di valori attesi (Homburg et al. 2021).

1.2 Interpretazione, paradata e immagini

Nonostante i progressi descritti e la disponibilità di numerosi framework e workflow di riferimento, come già anticipato, alcuni problemi relativi alla documentazione del Patrimonio Culturale 3D rimangono ancora aperti; come sostengono alcuni autori, d'altra parte, la sfida non è solo tecnologica ma consiste anche nel raggiungere un'ampia accettazione e integrazione degli standard prodotti (D'Amico & Felicetti 2023). Come dimostrano alcuni studi, da un punto di vista teorico tale problema potrebbe derivare dalla mancanza di una prospettiva comune per quanto riguarda l'accezione stessa di “dati” nelle sue diverse declinazioni. Ciò emerge abbastanza chiaramente da alcune recenti indagini finalizzate a comprendere meglio le fondamenta di quello che, nella scienza dell'informazione, viene definito “gap semantico” (Hollink et al. 2004, Näslund 2022). Uno dei primi contributi in questa direzione è stato fornito dal sondaggio effettuato da Mohr et al. (2015). In questa indagine gli autori, prendendo in considerazione le risposte di 726 ricercatori appartenenti a diverse facoltà dell'Università del Minnesota¹⁶², hanno dimostrato che esiste un divario per quanto riguarda l'uso del termine “dati”; per definire gli output del loro lavoro, infatti, molti degli utenti intervistati hanno preferito usare l'espressione “materiali di ricerca” (Mohr et al. 2015). Con l'obiettivo di dare un nuovo contributo a questo tipo di analisi, a distanza di diversi anni, alcuni

¹⁶⁰ Dal momento che lo studio si concentra sul processo di acquisizione, gli autori non includono le fasi di archiviazione e conservazione.

¹⁶¹ <https://www.w3.org/TR/prov-o/>

¹⁶² Academic Health Center (AHC); College of Science and Engineering (CSE); College of Food, Agriculture and Natural Resource Sciences (CFANS); College of Biological Sciences (CBS); College of Liberal Arts (CLA).

ricercatori dell'Università di Bologna hanno cercato, attraverso un ulteriore sondaggio, di far luce sull'uso del termine nell'ambito delle scienze umane, ponendo una serie di domande riguardanti i dati prodotti e la loro gestione. In questo caso gli studiosi hanno preso in considerazione le opinioni di 19 ricercatori appartenenti a diverse aree del settore umanistico, rilevando nel complesso una buona predisposizione all'uso del termine "dati" per definire i prodotti della propria ricerca.¹⁶³ Come emerge dallo studio, tuttavia, solo pochi intervistati hanno mostrato un buon grado di consapevolezza circa l'adozione di standard per la documentazione e soltanto due hanno menzionato l'uso di un archivio aperto per il deposito dei dati digitali (Gualandi et al. 2022).

Risultati simili sono emersi anche nell'indagine condotta da Näslund (2022); sebbene il focus dello studio fossero le pratiche di metadattazione delle immagini, alcune delle questioni sollevate dagli intervistati sembrano rispondere a quanto riportato nelle precedenti analisi. Adottando un approccio ispirato alle teorie della comunicazione l'autrice ha infatti portato alla luce alcune divergenze di più ampio respiro che potrebbero essere significative anche per il discorso sugli standard dei metadati e sulla gestione delle informazioni. Più in particolare, il ricorso a queste teorie ha permesso di considerare la produzione e l'uso dei metadati come un "atto di comunicazione" che può seguire un andamento più o meno lineare. Attraverso una serie di interviste semi-strutturate ad archivisti e studiosi di scienze umane, l'autrice ha rilevato una discrepanza tra una concezione "tecnica" in cui i metadati vengono visti come un mezzo per trasmettere significati "fissi" e una concezione più dinamica e aperta all'interpretazione individuale. Quest'ultima prospettiva, derivata dalla teoria sociale della comunicazione, pone dunque maggiore attenzione al concetto di "agency", sia dei gestori che degli utenti degli archivi (Edwards & Morton 2015; Kamin 2017). In tal senso, per molti degli studiosi intervistati i metadati sono sempre "prodotti e consumati da agenti situati". A conferma di ciò, Näslund riporta due casi, emersi nel corso di un workshop tenutosi in Svezia, che risultano particolarmente esemplificativi; a seguito della richiesta di produrre dei metadati descrittivi per alcune immagini la maggior parte dei partecipanti, svedesi di nascita, non ha indicato la nazionalità nei propri tag. Al contrario gli unici ricercatori stranieri hanno aggiunto dettagli geografici, scrivendo ad esempio "fotografia svedese anni '50", "uomini nel Norden". Per i ricercatori del luogo, il contesto geografico era dunque un dato implicito e invisibile, mentre per i colleghi stranieri, questa informazione aveva una rilevanza esplicita. Durante il workshop è emersa inoltre anche la questione legata al livello di astrazione dei metadati; prevedendo che i metadati prodotti sarebbero stati usati per l'apprendimento automatico, uno studioso di informatica ha fornito informazioni come "umano" e "volto" mentre ricercatori di altre discipline (storia, studi di genere, etnografia), pensando invece all'eventuale riuso da parte di altri esperti, hanno prodotto definizioni molto più astratte come "colonialismo", "cultura del consumo", "tecniche culturali" (Näslund 2022).

Questi due esempi, sebbene possano apparire poco rappresentativi, potrebbero evidenziare la necessità, almeno per certi studiosi, di mettere a punto modelli di metadati più attenti agli aspetti interpretativi e alla diversità delle prospettive e degli scopi con cui vengono registrate le informazioni. Nell'elencare i compiti del ciclo di gestione degli oggetti digitali, Karatas & Lombardo (2020) includono anche la fase di "interpretazione dei dati", definendo questo step come "il processo di attribuzione di un senso ai dati numerici raccolti ed analizzati". Più in particolare gli autori associano questa fase alla produzione di documenti, diari, fotografie, schizzi e rappresentazioni diagrammatiche o grafiche (Karatas & Lombardo 2020). Come evidenziato da Huvila (2022), d'altronde, un fattore cruciale che limita drasticamente l'uso dei dati è l'assenza di conoscenze contestuali su come i dati sono stati creati; a differenza dei dati di provenienza e dei metadati, i paradata possono aiutare a chiarire tali processi, in quanto riguardano i fattori esterni che hanno portato alla creazione di una particolare serie di fotografie o di un modello 3D. In tal senso essi rappresentano un elemento chiave

¹⁶³ Le aree di ricerca a cui appartengono i ricercatori intervistati nello studio sono, in particolare, Filologia e Critica Letteraria, Linguistica, Storia dell'arte, Informatica e Archivistica.

per la diffusione dei dati della ricerca, soprattutto in contesti interdisciplinari che richiedono l'uso di documentazioni intelleggibili (Huvila 2022).

Il problema della rappresentazione delle informazioni, del resto, viene sollevato anche in altri recenti studi. Rodrigues e Lopez (2023), in particolare, propongono un approccio alla metadazione basato (anche) su immagini. Come chiaramente affermato dagli autori, infatti, sebbene gli standard e le ontologie esistenti rappresentino i pilastri dell'informazione, l'uso congiunto di fotografie, mappe, disegni, grafici o illustrazioni potrebbe rendere il processo interpretativo molto più fluido. A tal proposito, una delle grandi sfide rilevate all'interno dell'indagine riguarda l'uso delle immagini come metadati nella fase di pubblicazione/deposito. Pur conoscendo i vantaggi di un modello di descrizione flessibile, tali piattaforme non supportano sempre la funzionalità di includere altri tipi di descrittori oltre al testo. Infine, anche in questo caso viene evidenziato il ruolo centrale delle immagini nella comunicazione tra ricercatori appartenenti a diversi domini disciplinari (Rodrigues & Lopez 2023). Questi approcci sebbene di natura teorica, lasciano presupporre che le immagini siano in realtà una risorsa da "recuperare" sia per la descrizione dei processi che per l'interpretazione di conoscenze specifiche.

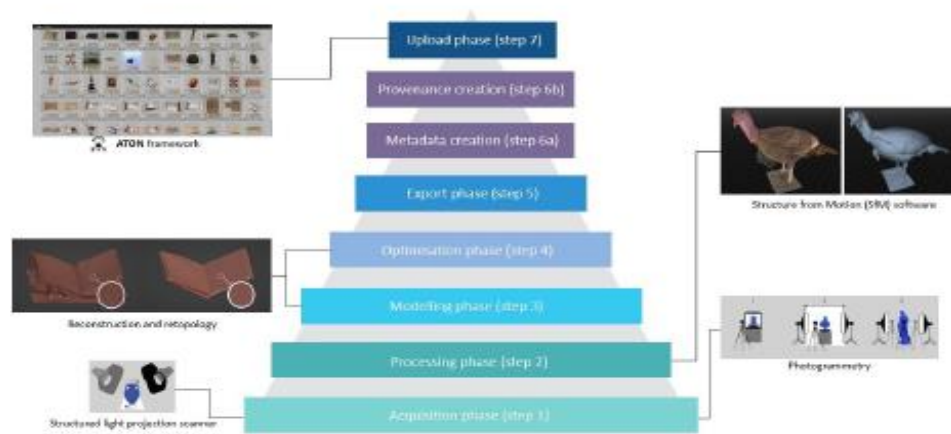


Figure 16 - Barzaghi et al. 2024

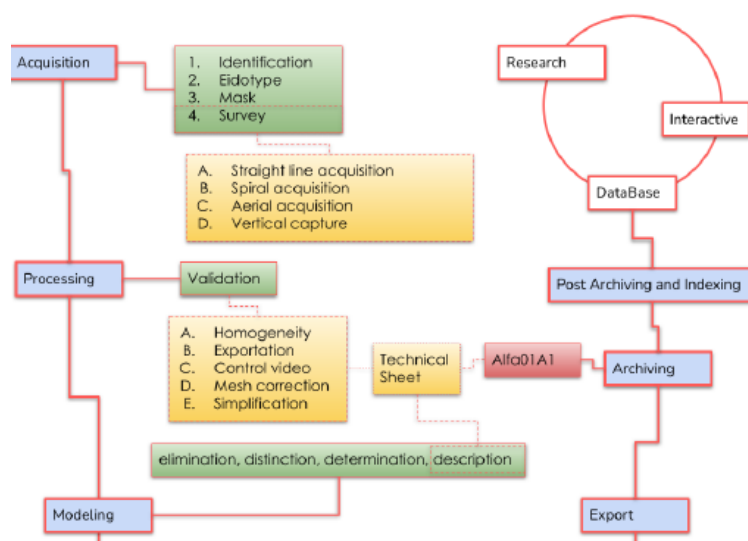


Figure 17 - Lauro & Lombardo 2023

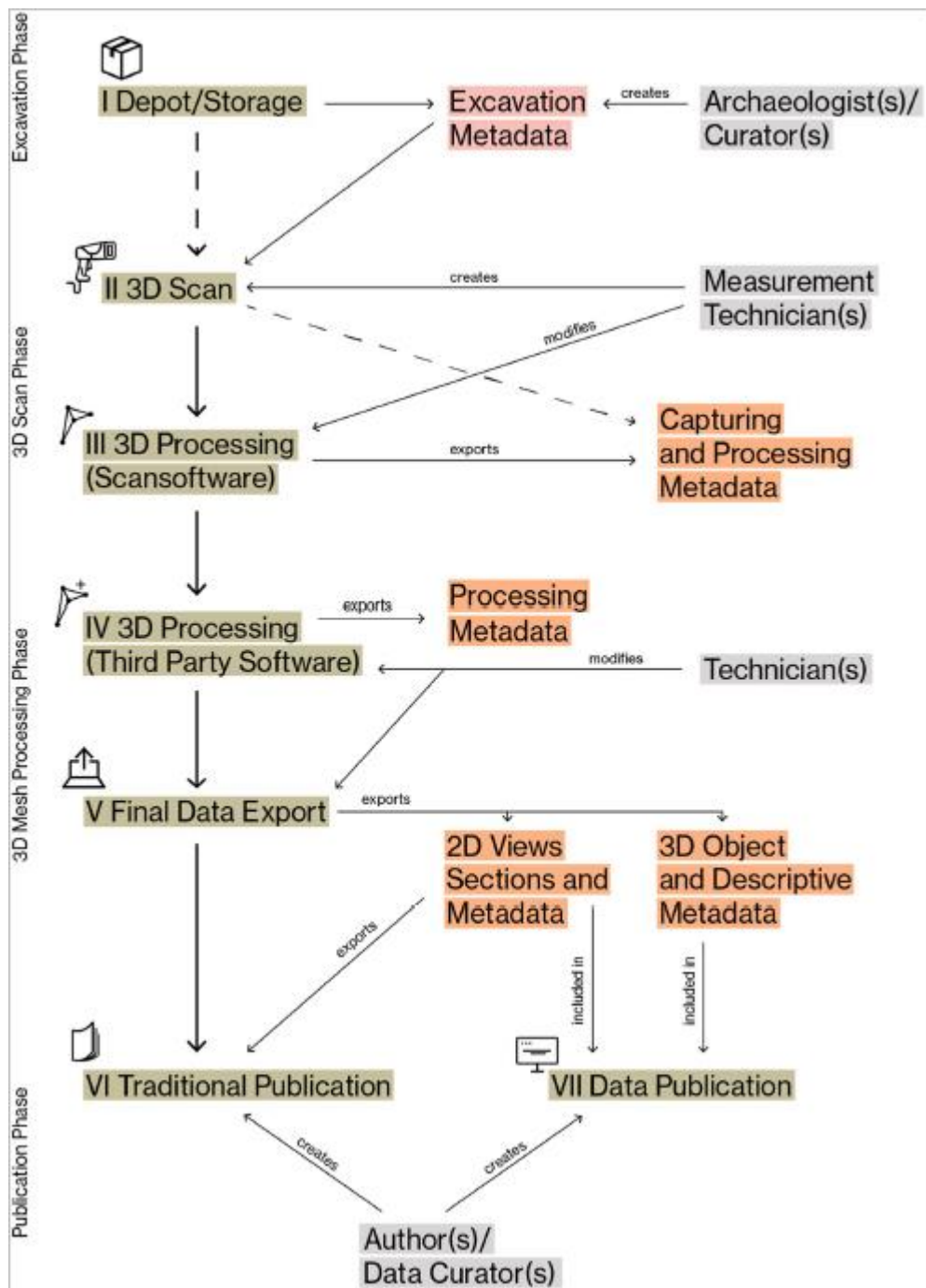


Figure 18 - Homburg et al 2021

2 Dai (meta)dati alle informazioni: infrastrutture per la conservazione e la condivisione del Patrimonio Culturale Digitale

Come evidenziato nel precedente paragrafo, la conservazione a lungo termine rappresenta uno dei principali obiettivi della DCC e, in generale, di tutte le istituzioni impegnate in una gestione ottimale dei dati.¹⁶⁴ Secondo la definizione formulata dall'OAIS quando si parla di conservazione a lungo termine si intende la capacità di mantenere le informazioni comprensibili e integre per un periodo di tempo potenzialmente infinito; le informazioni conservate dovrebbero pertanto rimanere accessibili al di là della possibile obsolescenza dei supporti e, idealmente, delle conoscenze della comunità per la quale sono state archiviate.¹⁶⁵ Per molti progetti di digitalizzazione del Patrimonio Culturale, da un punto di vista operativo, ciò si traduce nell'affidare i materiali prodotti a un archivio che possa garantire loro una manutenzione attiva e costante (Abbott 2008). Le procedure di invio generalmente vengono stabilite mediante un accordo tra l'archivio e il produttore dei contenuti (Submission Agreement), all'interno del quale vengono chiariti i termini legali e operativi relativi alla consegna, al trattamento e alla diffusione dei dati. Sulla base delle condizioni formulate, il produttore trasmette un primo pacchetto informativo (*Submission Information Package* - SIP) contenente i dati e tutte le informazioni necessarie alla loro corretta interpretazione; in tal senso, la maggior parte dei SIP conterrà, almeno, le "informazioni di rappresentazione" (Representation Information) come il formato dei file e gli schemi di codifica, e le informazioni per la conservazione (*Preservation Description Information* - PDI), come i metadati riguardanti l'origine dei file, il contesto in cui sono stati prodotti, nonché le condizioni di accesso e distribuzione del dataset.

Nelle PDI vengono inoltre definiti i meccanismi per la verifica dell'integrità del contenuto (*Fixity Information*), come ad esempio checksum periodici che permettono di certificare che i dati non siano stati alterati in modo non documentato. Una volta che i dati sono stati acquisiti, è possibile generare il pacchetto vero e proprio di archiviazione (*Archival Information Package* - AIP); al fine di consentire l'identificazione permanente delle risorse e prevenire i possibili problemi legati all'obsolescenza dei supporti, nel costruire l'AIP, l'archivio potrebbe dover eseguire una serie di integrazioni o variazioni, come l'assegnazione di un codice di riferimento univoco o la migrazione in altri formati nel caso ciò servisse a tutelare le informazioni trasmesse. Infine, sulla base degli accordi presi con i produttori, viene costituito un ultimo pacchetto informativo destinato alla diffusione delle informazioni (*Dissemination Information Package* - DIP); quest'ultimo potrebbe coincidere con il contenuto dell'AIP o essere ad esempio un sottoinsieme di tutti i suoi oggetti informativi. A seconda dei casi, i contenuti vengono resi disponibili a un gruppo di utenti ristretto o a una comunità più ampia; d'altra parte, alcuni DIP possono essere creati come output di algoritmi che operano su uno o più AIP per condividere solo le informazioni richieste dagli utenti esterni, rendendo più efficace il processo di distribuzione dei dati. Possono quindi essere fornite diverse "visualizzazioni" dei materiali conservati, supportate da vari aiuti all'accesso (*Access Aid*) e alla ricerca (*Finding Aid*) trasversali alle collezioni dell'AIP.¹⁶⁶

Come specificato nella sezione finale del documento, sebbene in generale un archivio OAIS non sia interoperabile con un altro, è possibile che in alcune circostanze debba interagire con

¹⁶⁴ Solo per citare alcuni esempi: *FORCE 11* con la promozione dei principi FAIR, *Research Data Alliance* (RDA) con lo sviluppo di strumenti per la condivisione e l'interoperabilità, *International Council of Museums* (ICOM) con la definizione di buone pratiche per la gestione dei dati museali, *OpenAIRE* con il monitoraggio e la gestione dei dati aperti in Europa, *World Wide Web Consortium* (W3C) con lo sviluppo di standard per il Semantic Web.

¹⁶⁵ CCSDS (2020). *Reference model for an Open Archival Information System (OAIS)*. Magenta Book. CCSDS 650.0-M-3, Draft Recommended Practice, Issue 3, October 2020.

¹⁶⁶ Secondo le definizioni fornite nel protocollo con *Access Aid* e *Finding Aid* si fa riferimento a software o più in generale strumenti che consentono agli utenti di cercare, individuare, analizzare, ordinare o recuperare informazioni da un OAIS. CCSDS (2020).

organizzazioni esterne o scambiare con loro i propri dati. Più in particolare, la classificazione proposta nel protocollo individua alcune categorie principali suddivise in base al livello di interazione e alle modalità di gestione delle risorse. Nella tabella 4 vengono riassunte le principali tipologie identificate nel documento:

Interazione	Gestione
Indipendente	All In-house
Cooperante	Condiviso
Federato	Distribuito

Tab 4 - Livelli di interoperabilità degli archivi secondo il modello OAIS

Gli archivi indipendenti generalmente possono operare in autonomia per soddisfare la propria base di utenti o comunità designate senza dipendere dalle esigenze di altre organizzazioni. Il requisito essenziale per gli archivi cooperanti risiede invece nella stipula di una serie di accordi di invio reciproco per il trasferimento o la condivisione dei dati; una forma tipica di cooperazione si ha quando un archivio agisce come “consumatore” di materiale proveniente da un altro archivio. In questo caso l'archivio consumatore deve supportare il formato DIP che l'archivio produttore consegna come formato SIP. Gli archivi federati infine sono orientati a fornire l'accesso a una comunità “globale” o estesa avvalendosi, se opportuno, di elementi esterni per migliorare l'interoperabilità. Può accadere, ad esempio, che due archivi abbiano comunità designate simili o che una comunità più ampia richieda l'accesso ai materiali custoditi da due diverse organizzazioni. In questo caso, la creazione di un'architettura federata permette agli utenti di individuare i contenuti di interesse in un'unica sessione di ricerca attraverso il “Common Catalog”, ovvero l'elemento esterno (globale) che funge da punto di accesso comune per le informazioni di entrambi gli archivi. Per quanto riguarda la gestione delle risorse, similmente, un archivio viene definito “All-in house” quando svolge tutte le funzioni in proprio, mantenendo eventualmente un'unica sede. Tuttavia, al fine di abbassare i costi e avvalersi al contempo di tecnologie più performanti, diversi archivi possono decidere di condividere infrastrutture o altri servizi per svolgere efficacemente le proprie funzioni; in questo caso, dunque, la gestione delle risorse può avvenire in modo autonomo, cioè ogni archivio deve garantire che le risorse siano disponibili e comprensibili per la propria comunità di riferimento ma allo stesso tempo può condividere con altri alcuni servizi per la memorizzazione dei file o per la disseminazione dei propri pacchetti informativi, utilizzando ad esempio lo stesso server o la stessa interfaccia.

L'ultima categoria descritta nel modello fa riferimento a un sistema di archiviazione in cui le funzioni e i dati vengono invece distribuiti su più siti, sia a livello fisico che amministrativo. All'interno di questa tipologia emergono due tipi di archivi, uno detto “primario” che assume il controllo di tutte le risorse garantendone la buona gestione e la sicurezza, e uno o più archivi di supporto che permettono invece di svolgere funzioni e fornire l'accesso dei dati in modo decentralizzato. In questi casi, per semplificare le procedure di scambio o utilizzo delle informazioni, gli archivi di supporto possono richiedere una certificazione che li designa come “Trusted Digital Repository” (TDR); in questo modo, tali organizzazioni possono operare senza dover dimostrare nuovamente l'aderenza agli standard OAIS. Come già indicato, il modello concettuale sviluppato dal CCSDS, rappresenta ancora oggi un punto di riferimento fondamentale nel contesto della cura dei dati (Moore et al. 2022, Rodrigues & Lopes 2022). Le indicazioni contenute in questo documento, le cui prime pubblicazioni risalgono alla fine del secolo scorso, permettono infatti di tracciare alcune delle principali caratteristiche che un sistema di archiviazione orientato alla conservazione a lungo termine dovrebbe avere. Soprattutto tale standard consente di definire più chiaramente quali criteri e azioni dovrebbe adottare un archivio per essere considerato affidabile e duraturo.¹⁶⁷ Il dispendio di

¹⁶⁷ Si veda a tal proposito anche il report creato dal gruppo di lavoro formato dai membri dell'Online Computer Library Center (OCLC) e del Research Libraries Group (RLG), in cui, sulla base dello standard OAIS, vengono definite

energie, tempo e risorse che emerge da questo quadro di riferimento comportano in definitiva anche una riflessione più critica su ciò che merita di essere conservato con tanta attenzione. D'altra parte, sebbene nel modello vengano delineati anche i possibili rapporti che un archivio può instaurare con altri enti, esso non restituisce a pieno la complessità del panorama infrastrutturale entro cui opera per la gestione e la condivisione delle risorse digitali. In questo complesso panorama, gli archivi svolgono naturalmente un ruolo di grande importanza, contribuendo alla conservazione e alla cura dei dati depositati da una moltitudine di istituzioni, organizzazioni o anche singoli utenti (Limp et al. 2013, Champion 2018); tuttavia, occorre riconoscere che essi rappresentano solo uno dei molti nodi che compongono le cosiddette "infrastrutture della conoscenza" (Borgman et al. 2019, Nappi et al. 2024).

Le evoluzioni tecnologiche e sociali hanno infatti portato alla luce nuove esigenze da parte degli utenti, conducendo gradualmente sempre più istituzioni verso la creazione di database che possono essere indicizzati dai motori di ricerca o integrati nelle reti di diffusione sviluppate da altri enti (Benardou et al. 2018, Silva & Terra 2024). In tal senso, spesso, la strutturazione di enormi quantità di dati all'interno dei database accessibili online può essere confusa con la possibilità di conservare queste stesse risorse per un periodo di tempo indefinito; come ben evidenziato da alcuni autori, invece, gli archivi di dati non sono solo semplici database di contenuti ma strutture che rispondono a standard ampiamente riconosciuti e sono pertanto certificate come enti in grado di agire con procedure affidabili e rigorose (Borgman et al. 2019, Zhou et al. 2021, Moore et al. 2022).¹⁶⁸ Nel contesto attuale, d'altro canto, il concetto di archivio ha in parte ceduto il posto a quello di "repository", un termine inizialmente adottato per indicare i depositi digitali in cui venivano memorizzati i pacchetti software e le librerie di codice (Macgregor 2023).¹⁶⁹ Soprattutto a partire dagli anni 2000, con il diffondersi dei database condivisi in rete, si è assistito a un graduale ampliamento delle funzioni associate ai repository digitali (Praveen 2017, Sharma 2023). La definizione fornita da Lynch (2003) mette in luce l'ampiezza dei significati che questo termine può assumere, indicando i repository digitali come dei sistemi informativi o piattaforme che supportano l'inserimento, l'archiviazione, la gestione e l'esposizione di contenuti digitali (C. Lynch, 2003). Se consideriamo il progressivo aumento dei dati prodotti e l'importanza assunta dalle possibilità di accesso, questa transizione risulta del resto piuttosto naturale. Come notano Friedewald et al. (2023) negli ultimi decenni l'enfasi posta sull'accessibilità degli archivi è aumentata in modo significativo; mentre un tempo le preoccupazioni maggiori riguardavano questioni di riservatezza e tutela dei dati, ora il problema più grande è quello di trovare il giusto equilibrio tra il desiderio di trasparenza e apertura, da un lato e la protezione della privacy e dei dati personali, dall'altro (Friedewald et al. 2023). Il repository, in questo senso, potrebbe essere visto come una sorta di compromesso che cerca di rispondere a entrambe le esigenze di conservazione e condivisione della documentazione digitale prodotta.

le linee guida e i principi da seguire per la conservazione a lungo termine delle collezioni detenute dalle istituzioni culturali. RLG-OCLC Report 2002.

¹⁶⁸ Due delle principali certificazioni internazionali per tutti i tipi di archivi digitali sono il CoreTrustSeal (precedentemente noto come Data Seal of Approval) e il Nestor Seal for Trustworthy Digital Repositories. Il CoreTrustSeal comporta l'esame approfondito delle funzioni e dei servizi dell'archivio, mentre il Nestor Seal comporta un'autoverifica e fornisce una certificazione estesa se abbinato al CoreTrustSeal; procedure come l'*Audit and Certification of Trustworthy Digital Repositories* (TRAC), sono state invece progettate per aiutare le istituzioni a implementare il modello di riferimento OAIS, particolarmente denso, e a valutarne la conformità (Moore 2022).

¹⁶⁹ Risulta interessante, in tal senso, anche l'exkursus fornito da Lucia Francalanci presente nel sito dell'Accademia della Crusca <https://accademiadellacrusca.it/>

2.1 Trusted Digital Repository (TDR)

Come è possibile dedurre dal quadro tracciato nel modello OAIS e dagli studi condotti da alcuni autori, un repository può adottare modalità di gestione dei dati che non sono necessariamente orientate alla conservazione a lungo termine (Amorim 2016). Come accennato, la manutenzione attiva dei dati è un lavoro impegnativo che richiede forme di governance altamente specializzate; dunque se la priorità è quella di garantire che i dati non vengano smarriti o danneggiati è opportuno affidare la loro custodia a un ente certificato. La nascita del concetto di trusted digital repository (TDR) è legata in tal senso proprio all'esigenza di stabilire un quadro di attributi fondamentali, sulla base dei quali è possibile riconoscere un sistema di archiviazione affidabile; più in particolare, tra i requisiti minimi che un TDR dovrebbe avere vengono elencati i seguenti aspetti (RLG/OCLC Working Group on Digital Archive Attributes et al. 2002):

- Conformità con il modello di riferimento OAIS (Open Archival Information System): assicurarsi che il repository segua gli standard e le linee guida stabilite dal modello OAIS per la conservazione a lungo termine delle informazioni digitali.
- Responsabilità amministrativa: definire chiaramente chi è responsabile della gestione e della supervisione del repository.
- Viabilità organizzativa: garantire che l'organizzazione che gestisce il repository sia stabile e capace di sostenere le operazioni a lungo termine.
- Sostenibilità finanziaria: assicurarsi che ci siano risorse finanziarie sufficienti per mantenere il repository operativo nel tempo.
- Adeguatezza tecnologica e procedurale: utilizzare tecnologie e procedure appropriate per la gestione e la conservazione dei dati digitali.
- Sicurezza del sistema: implementare misure di sicurezza per proteggere i dati da accessi non autorizzati, perdite o corruzioni.

Tra i repository riconosciuti come “affidabili” vengono inclusi enti volti a conservare dati di natura molto eterogenea; tra quelli che si occupano di gestire anche oggetti del Patrimonio Culturale vengono menzionati ad esempio il *Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur* (CINES), un centro certificato con DSA (Data Seal of Approval), citato sia nell'ambito del progetto PARTHENOS che all'interno del report di avvio dell'*European Collaborative Cloud for Cultural Heritage* (Alaoui M'Darhri 2019, Brunet et al., 2022). CINES nello svolgere la sua missione di conservazione a lungo termine delle risorse digitali opera in sinergia con altre infrastrutture, sia nazionali che europee; tra queste ad esempio vale la pena citare Huma-Num, uno dei consorzi francesi inseriti nella più ampia rete delle infrastrutture di ricerca europee che opera a supporto dei progetti condotti nell'ambito delle *Social and Human Sciences* (SHS) svolgendo, tra le varie attività, anche un ruolo da mediatore tra i ricercatori che intendono depositare i propri dati e il servizio vero e proprio di conservazione offerto da CINES. Tra i TDR pubblicati nel catalogo del *CoreTrustSeal* e citati anche in letteratura, troviamo poi il *Data Archiving and Networked Services* (DANS), un istituto olandese fondato nel 2005 che raccoglie i dati provenienti da numerosi centri di ricerca, università, biblioteche e organizzazioni governative nazionali ed internazionali. Come riportato nell'approfondito studio condotto da Borgman et al. (2019) si tratta di uno dei primi centri ad aver fornito servizi di archiviazione online e software repository che vengono utilizzati in numerosi progetti di ricerca (Borgman et al. 2019). EASY (*Electronic Self-Archiving SYstem*), ad esempio, era il sistema online per il deposito autonomo dei dati, ora sostituito con quattro diverse DANS Data Stations¹⁷⁰, ognuna rivolta a un dominio specifico e basate sulla piattaforma open-source

¹⁷⁰ <https://dans.knaw.nl/en/data-stations/>

DataverseNL¹⁷¹ sviluppata dall'Università di Harvard. Il software viene continuamente aggiornato da una comunità ampia e diversificata; di conseguenza, i Data Stations sono costantemente aggiornati con nuove funzionalità, rilevanti per le varie discipline scientifiche.¹⁷² Oltre a offrire servizi di supporto a fini di riuso dei dati di ricerca, il DANS funge inoltre da punto di raccolta per altri portali come Europeana, OCLC e Google Scholar (Borgman et al. 2019).

Esistono poi depositi specificatamente creati per alcune aree di ricerca e settori disciplinari come l'*Archaeology Data Service* (ADS) nel Regno Unito, un archivio fondato nel 1996 da un consorzio composto dal *Council for British Archaeology* e da otto università britanniche; come riportato in diversi studi si tratta del primo archivio digitale archeologico in Europa, con ormai più di un milione di documenti depositati provenienti da oltre 6.000 dataset composti da testi, immagini, GIS e 3D (Richards 2017, Aloia et al. 2017, Zoldoske 2024).¹⁷³ L'ADS è inoltre il luogo di deposito obbligatorio per i dati di ricerca archeologica per numerose organizzazioni per il patrimonio del Regno Unito e rende tutti i suoi fondi disponibili gratuitamente per il download o la ricerca online. Gli standard per i metadati di ADS garantiscono l'aderenza ai principi FAIR e per facilitare il deposito dei materiali, anche in questo caso, il repository mette a disposizione diversi modelli con livelli di dettaglio variabili. Il controllo e la validazione delle informazioni inviate vengono poi eseguiti attraverso uno strumento di verifica che permette di confrontare tutti i file all'interno delle cartelle e produrre un report con, eventualmente, l'elenco dei campi da correggere o compilare. Infine, i dati inviati vengono mappati all'interno dell'*Object Management System* grazie al quale è possibile creare ricerche incrociate, mappe interattive o raccolte integrate (Zoldoske, 2024). L'ADS non è l'unico repository dedicato al settore dell'archeologia; il *Digital Archaeological Record* (tDAR), ad esempio, è un altro archivio digitale internazionale per la registrazione digitale delle indagini archeologiche che opera sotto la gestione di *Digital Antiquity*, un'organizzazione statunitense nata nel 2009 e attualmente ospitata presso l'Arizona State University.¹⁷⁴

Come segnalato in Sheehan (2015) rispetto ad ADS accoglie dati da una più ampia area geografica e non richiede una revisione preventiva per l'accettazione dei dati, sebbene a differenza di altri repository consenta ai depositanti di impostare opportune restrizioni all'accesso; in alternativa permette di scegliere un periodo di embargo fino a quattro anni e come ADS accetta un'ampia serie di materiali, inclusi dati GIS e di rilevamento, oltretutto scansioni 3D (Sheehan 2015). Le due istituzioni d'altronde collaborano insieme a diversi progetti di integrazione dei dati e allo sviluppo di linee guida per la raccolta e la gestione della documentazione digitale archeologica; il progetto *Transatlantic Archaeology Gateway* ad esempio è un'operazione messa a punto per consentire agli utenti di effettuare la ricerca incrociata dei loro record, in modo da garantire una maggiore copertura e coerenza nella scoperta e nell'uso dei contenuti depositati su entrambi i repository; inoltre al fine di promuovere best practice e massimizzare il confronto tra i dataset raccolti in diverse aree del mondo, ADS e tDAR hanno redatto l'*Archaeology Data Service/Digital Antiquity Guides to Good Practice* (ADS & Digital Antiquity 2015) che fornisce solide linee guida per l'acquisizione e l'archiviazione dei dati archeologici.¹⁷⁵ Tra i repository indicizzati nel CoreTrustSeal segnaliamo infine anche ARCHE Suite (*A Resource Centre for the HumanitiEs*), un repository sviluppato recentemente dall'*Austrian Centre for Digital Humanities and Cultural Heritage* (ACDH-CH) per ospitare in modo persistente i dati prodotti nell'ambito di ricerche umanistiche; più in dettaglio, si tratta del successore di un progetto di repository fondato nel 2014 come *CLARIN Centre Vienna / Language Resources*

¹⁷¹ <https://dataverse.nl/>

¹⁷² <https://dans.knaw.nl/en/>

¹⁷³ <https://archaeologydataservice.ac.uk/>

¹⁷⁴ <https://www.tdar.org/about/>

¹⁷⁵ <https://archaeologydataservice.ac.uk/help-guidance/guides-to-good-practice/>

Portal (CCV/LRP),¹⁷⁶ che aveva l'obiettivo di fornire servizi di deposito per le risorse linguistiche prodotte in ambito nazionale.¹⁷⁷ Come illustrato in Zołtak et al. (2022), in precedenza, la tecnologia software utilizzata per l'archiviazione delle risorse era il repository open source Fedora (versione 4.0);¹⁷⁸ tuttavia a partire dal 2020 il sistema è stato rielaborato per costruire una soluzione alternativa che compensasse le carenze rilevate in altre applicazioni. Fortemente orientata verso una maggiore interoperabilità, ARCHE Suite, oltre ad ampliare la gamma dei contenuti ospitabili, propone un modello altamente aderente ai principi dei Linked Open Data supportando nativamente RDF come formato di metadati, sia in ingresso che in uscita, e mirando contestualmente anche all'implementazione di URL esterni; inoltre, rispetto ad altre soluzioni, questo sistema non prevede l'adozione di nessuno schema di metadati specifico e, pur essendo sprovvisto di un endpoint SPARQL, integra un API REST che è in grado di recuperare tutti i metadati che puntano a una certa risorsa o i metadati di tutte le risorse che possono essere raggiunte seguendo una determinata proprietà RDF (Zołtak et al. 2022).¹⁷⁹ Occorre notare che, come ADS, anche ARCHE Suite si concentra soprattutto su una comunità di riferimento ben precisa, seppure in questo caso legata all'area geografica piuttosto che al settore disciplinare.¹⁸⁰

Come evidenziato da Macgregor (2023) la scoperta delle risorse può essere una componente importante dei TDR; tuttavia la priorità dei processi di gestione del TDR rimane la gestione dei contenuti digitali nel tempo e in conformità con gli standard riconosciuti. La cultura che circonda l'integrità scientifica e la responsabilità pubblica ha richiesto d'altra parte una maggiore apertura e trasparenza dei dati per sostenere gli obiettivi di verifica e riproducibilità della ricerca, tutti in gran parte forniti attraverso archivi o repository di dati (Macgregor 2023).

2.2 Next Generation Repositories (NGRs)

I limiti talvolta imposti dagli schemi adottati nei TDR hanno in tal senso favorito la messa a punto di pratiche e raccomandazioni che, pur prestando la dovuta attenzione ai requisiti di affidabilità, tentano di armonizzare gli standard più rigorosi con le recenti esigenze di integrazione e "apertura" dei dati promosse dalle politiche internazionali. Un esempio in questa direzione è il lavoro svolto in questi anni dalla *Research Data Alliance* (RDA), un'iniziativa lanciata nel 2013 al fine di costruire "ponti sociali e tecnici" verso la condivisione aperta dei dati e il loro riuso;¹⁸¹ più in particolare, come si legge nell'*RDA Governance Document* (2023), l'organizzazione mira ad accelerare l'innovazione e la scoperta dei dati a livello internazionale attraverso "lo sviluppo, l'adozione e la diffusione di infrastrutture, politiche, pratiche, standard e altri risultati", cercando in questo modo di favorire la

¹⁷⁶ CLARIN (*Common Language Resources and Technology Infrastructure*) è un'altra delle infrastrutture europee di ricerca orientata allo sviluppo di strumenti, servizi a sostengono della ricerca basata sulle risorse linguistiche <https://www.clarin.eu/>

¹⁷⁷ <https://arche.acdh.oeaw.ac.at/>

¹⁷⁸ <https://www.fedoraproject.org/it/>

¹⁷⁹ Come riportato da Fielding il nome "Representational State Transfer" (REST) è stato scelto per evocare il comportamento di un'applicazione web ben progettata che consente all'utente di avanzare tramite link trasferendo una rappresentazione di tale stato. Più in particolare si tratta di uno stile architetturale messo a punto a partire dal 1994 e basato su una serie di vincoli che consentono di scalare più facilmente il trasferimento di grandi quantità di dati, tipico di un sistema ipermediale, rendendolo così meno soggetto alle interazioni di rete e dunque a latenza. REST elabora solo quelle porzioni dell'architettura che sono considerate essenziali per l'interazione ipermediale distribuita su "scala Internet" (*Internet-scale*). Per un approfondimento si veda Fielding 2002.

¹⁸⁰ Si vedano a tal proposito le politiche di raccolta pubblicate nel sito.

¹⁸¹ <https://www.rd-alliance.org/about-the-rda/>

condivisione e lo scambio delle risorse prodotte nei contesti di ricerca.¹⁸² Sebbene non si tratti di un'istituzione deputata allo sviluppo di standard, RDA ha redatto nel corso degli ultimi anni una serie di raccomandazioni che sono state approvate dall'*European Multi-Stakeholders Platform on ICT Standardisation* (MSP – E02758) come specifiche tecniche ICT.¹⁸³

Tali specifiche riguardano la definizione di una terminologia comune nel fare riferimento ai dati (Berg-Cross et al. 2015), lo sviluppo di modelli che permettano di identificare i PID e offrire interfacce comuni (Weigel et al. 2015), la messa a punto di registri in grado di aiutare gli strumenti a interpretare, visualizzare e trattare i dati (Lannom, et al. 2015), e infine la redazione di policy tese a rafforzare la gestione e la valutazione delle analisi scientifiche, favorendo l'interoperabilità e la fiducia tra le diverse parti (Moore et al. 2015). Oltre a queste, è stata poi redatta una seconda serie di raccomandazioni approvate come specifiche, tra cui rientrano anche quelle dedicate alle procedure di certificazione dei repository (Rickards et al. 2016) e ai flussi di lavoro per la pubblicazione dei dati (Dallmeier-Tiessen 2016). Più recenti invece sono le raccomandazioni prodotte dal gruppo di lavoro congiunto RDA/Force11 FAIRSharing, in cui vengono fornite indicazioni volte a guidare utenti, nonché produttori di standard e repository verso la corretta selezione e descrizione delle risorse. Come descritto nel documento, FAIRsharing è un servizio informativo costruito a partire dal 2011 per aiutare ricercatori e altri soggetti coinvolti nella gestione dei dati a scoprire e valutare l'uso dei diversi standard, database e politiche sui dati; in questo senso, si tratta di una piattaforma pensata per raccogliere e monitorare le informazioni riguardanti queste risorse, offrendo inoltre strumenti di selezione che permettono ad esempio di filtrare i record per dominio oppure visualizzare le relazioni interconnesse tra standard, repository e database (McQuilton 2019). Sulla scia delle pratiche promosse attraverso queste pubblicazioni, RDA, ha infine redatto un ulteriore documento volto alla descrizione del Global Open Research Commons (GORC) International Model (Woodford 2024), un modello destinato in particolare a tutti soggetti coinvolti nella pianificazione, nello sviluppo, nel funzionamento, nel finanziamento o nell'utilizzo dei beni comuni di ricerca (research commons). Nel rapporto vengono illustrati i principali elementi che compongono gli OpenResearch Commons, con ogni categoria, sottocategoria o attributo riportati nel foglio di calcolo utilizzato per dare forma al GORC. In particolare all'interno del modello i concetti considerati essenziali vengono rappresentati come uno schema che ha alla base i tre elementi con cui le persone interagiscono (Servizi e strumenti, Oggetti di ricerca, Infrastrutture), e in alto i cinque elementi sociali/umani necessari per il successo del bene comune (Capacità umana, Regole di partecipazione e accesso, Strutture di governance e gestione, Coinvolgimento, Sostenibilità). Al centro, infine, vi è un ultimo elemento che tiene assieme tutti gli altri e rappresenta gli standard da seguire (Interoperabilità e Standard) (Woodford 2024). Iniziative di questo tipo sottolineano la necessità, cui si è fatto cenno, di creare sistemi di archiviazione che siano al contempo affidabili e interoperabili a tutti i livelli; ciò significa, come ben spiegato in Richards (2015) che devono sia riunire le risorse fornendo agli utenti la possibilità di interrogarle tramite interfacce efficaci, sia "aprire" i dati tramite API, adottando protocolli di base come l'Open Archives Initiative Protocol for Metadata Harvesting (OAI-PMH) o idealmente, quelli emergenti come ResourceSync (Richards 2015, Macgregor 2023). In effetti, questi ultimi servizi vengono inclusi tra le tecnologie chiave individuate dalla Confederation of Open Access Repositories (COAR) che nel 2017 si è riunita al fine di identificare le funzionalità fondamentali della prossima generazione di repository; più in particolare, nel report redatto dal gruppo di lavoro viene rilevata la tendenza, da parte di molti repository, a utilizzare ancora tecnologie e protocolli progettati ormai vent'anni fa, prima del "boom" dei social network e del web semantico (Boliini et al. 2017). Per queste ragioni il COAR ha iniziato un lavoro di revisione delle soluzioni che dovrebbero essere

¹⁸² Research Data Alliance (2022): RDA Governance Document, Version 3.0.

¹⁸³ European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Commission Implementing Decision (EU) 2017/1358 of 20 July 2017 on the identification of ICT Technical Specifications for referencing in public procurement http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2017/1358/oj

implementate dalle nuove piattaforme di deposito, ponendo l'accento su alcuni aspetti, come la necessità di una governance distribuita e di un'interazione basata su standard di interoperabilità comuni. Al fine di creare una rete globale di repository, secondo il rapporto, le risorse distribuite nelle varie landing page dovrebbero essere apertamente accessibili e identificabili senza ambiguità; questa condizione potrebbe essere raggiunta più facilmente inserendo, ad esempio, nell'intestazione HTTP un link di tipo “cite-as” che permette di individuare automaticamente l'URI persistente associato alla risorsa anziché puntare ad altri identificatori (come quello della landing page che potrebbe invece cambiare nel tempo). Un'altra questione sollevata dal gruppo di lavoro riguarda inoltre la possibilità, come accennato, di referenziare i contenuti e i relativi metadati attraverso un approccio “RESTful” basato sulle risorse o, nei casi in cui ciò non sia possibile a causa di problemi di latenza, sfruttando protocolli più moderni come ResourceSync, IPFS (InterPlanetary File System), SWORD (Simple Web-service Offering Repository Deposit); queste tecnologie infatti si adattano meglio alle logiche del Web Semantico e rendono più efficiente la sincronizzazione e il collegamento di grandi raccolte di dati; più in particolare esse mirano, da un lato, a un aggiornamento più rapido delle informazioni e dall'altro al recupero decentralizzato delle risorse da altre posizioni (nodi) della rete sfruttando un approccio peer-to-peer (Haslhofer et al. 2013, Walk et al. 2017).¹⁸⁴

In tal senso un altro aspetto chiave individuato nel report riguarda la predisposizione di meccanismi di notifica che permettano al repository di raccogliere ed esporre in tempo reale le attività che coinvolgono le risorse e gli agenti interessati, segnalando modifiche, aggiunte, commenti, annotazioni, accessi o download. Da questo punto di vista potrebbe essere dunque utile implementare anche protocolli come Linked Data Notification, Webmention o Websub. Per quanto riguarda gli aspetti di conservazione viene infine riconosciuta l'esistenza di best practice e pratiche di manutenzione attiva ampiamente condivise; al contempo tuttavia viene anche evidenziata l'importanza di preservare la complessa interconnessione tra le risorse e i processi o le informazioni che le riguardano. Nell'ultima versione redatta dal gruppo, queste indicazioni vengono riconfigurate in un elenco di pratiche ritenute fondamentali per il buon funzionamento dei repository di nuova generazione; per ogni aspetto vengono descritte le procedure di base e quelle che potrebbero essere aggiunte o migliorate¹⁸⁵:

- “Discoverability”: il repository supporta schemi di metadati di base come Dublin Core ma anche schemi più granulari, assegna PID, utilizza protocolli come OAI-PMH, offre funzioni di ricerca e i metadati vengono indicizzati per i servizi di aggregazione; il repository potrebbe inoltre collegare i metadati tra contenuti correlati, supportando PID anche per risorse conservate altrove e altre entità pertinenti, e utilizzare licenze come Creative Commons (CC0).
- Accesso: le pagine di destinazione contengono link alla risorsa, nel caso raccolga dati sensibili applica meccanismi che limitano l'accesso; potrebbe inoltre supportare interfacce utente più reattive e aderisce alla versione più recente delle Linee guida per l'accessibilità dei contenuti Web del W3C.
- Riutilizzo: l'archivio include informazioni sulla licenza nel record di metadati che stabiliscono le condizioni di riutilizzo per la risorsa; inoltre, potrebbe usare formati aperti e leggibili dalla macchina.

¹⁸⁴ Per una panoramica su IPFS si vedano ad esempio le guide pubblicate dalla comunità di sviluppatori <https://docs.ipfs.tech/>

¹⁸⁵ Si riporta una sintesi delle linee guida; per la descrizione completa si vedano Boliini et al. (2017) e la seconda versione del documento Confederation of Open Access Repositories. (2022). *COAR Community Framework for Good Practices in Repositories*, (Versione 2).

- Integrità e autenticità: vengono applicate misure di sicurezza e controlli regolari per garantire che le risorse non vengano alterate senza autorizzazione, supporta la revisione e il versioning dei dati.
- Garanzia di qualità: se necessario, al momento dell’invio vengono effettuate leggere revisioni o miglioramenti dei metadati e viene resa chiara la politica di curatela.
- Conservazione: il repository dispone di un piano di conservazione digitale che stabilisce la durata della gestione delle risorse, identifica i ruoli e documenta le procedure per la conservazione dei diversi formati delle risorse, raccoglie metadati di base, imposta accordi con il depositante che gli permettono di effettuare le modifiche necessarie e descrive le procedure in caso di attacchi informatici o disastri naturali.
- Sostenibilità e governance: la politica del deposito deve essere di natura pubblica e chiaramente definita, indicando anche cosa accadrà alle risorse in caso di cessazione delle operazioni.
- Altro: viene fornita una documentazione che attesta l’ambito delle risorse accettate; inoltre il repository dovrebbe supportare protocolli standard come SWORD, raccogliere informazioni sul suo utilizzo e supportare sia upload individuali che massivi.

Sulla base delle raccomandazioni fornite negli approcci descritti, appare chiara dunque l’importanza assegnata ad aspetti quali la “scopribilità” e l’interoperabilità delle risorse depositate, nonché l’attenzione alle possibilità di interazione a fini di condivisione e collaborazione. Come accennato, alcuni strumenti permettono di verificare la politica seguita dalle diverse organizzazioni, senza concentrarsi su nessuna specifica certificazione. A differenza del numero esiguo (160) di repository presenti nel catalogo del CoreTrustSeal, questi portali contengono informazioni per migliaia di depositi.¹⁸⁶ I portali più spesso citati in letteratura sono re3data¹⁸⁷, la Directory of Open Access Repositories (OpenDOAR)¹⁸⁸, il Registry of Open Access Repositories (ROAR)¹⁸⁹, FAIRSharing¹⁹⁰ e OpenAIR¹⁹¹ (Amorim 2016, Rodrigues & Lopes 2022, Macgregor 2023).¹⁹² Ognuno di questi offre modalità più o meno avanzate di interrogazione; come riportato anche in Barzaghi et al. (2024) re3data non include nessuna categoria dedicata specificatamente al 3D nell’elenco “Content Type” (2024); tuttavia è possibile selezionare l’area tematica. ROAR e OpenDOAR similmente permettono di filtrare i risultati sulla base di alcune categorie tra cui ad esempio l’area geografica, il tipo di repository (ad esempio se istituzionale, Journal, Research data ecc ...) tipo di contenuti, soggetto e software. FAIRsharing similmente non contiene nessuna voce riferita al “3D” o al “Digital Cultural Heritage” ma tra i portali menzionati è l’unico a supportare un tipo di ricerca avanzata in cui è possibile personalizzare la selezione attraverso l’aggiunta di nuovi gruppi. OpenAIR, infine, eccetto che per l’area geografica, non permette di effettuare una ricerca basata sulla selezione di categorie

¹⁸⁶ In particolare su re3data sono indicizzati 3317 repository; OpenDoar non mostra il totale degli item ma senza applicare alcun filtro restituisce circa 5977 digital repository attivi; ROAR similmente ne conta 5.698; infine OpenAir e FAIRsharing mostrano rispettivamente circa 139.000 e 1.196 risultati, sebbene in quest’ultimo caso occorra specificare la tipologia “repository”.

¹⁸⁷ <https://www.re3data.org/search?query=>

¹⁸⁸ <https://v2.sherpa.ac.uk/opensoar/about.html>

¹⁸⁹ <https://roar.eprints.org/>

¹⁹⁰ <https://explore.openaire.eu/participate/deposit/search>

¹⁹¹ <https://fairsharing.org/search?page=1&recordType=repository>

¹⁹² Si veda anche Corcho et al. (2021).

base come tipo di contenuto e/o soggetto, rendendo difficile il confronto con gli altri portali; in tal senso viene escluso dagli strumenti di ricerca considerati in questa sezione (Tab.5).

Portale	Tot. depositi registrati	Voci per "3D"	Voci per "DCH"	Filtri applicati	Tot. Risultati con filtri	Tot Risultati con campi liberi*	Tot. Risultati per l'Italia
re3data	3.317	x	x	Tipo (image), Soggetto (Humanities)	13	14	0
OpenDOAR	5977			Tipo (Datasets, Special Item Types) Soggetto (Humanities)	1665	-	-
ROAR	5.698	x	x	soggetto (Museum general)	50	50	0
FAIRSharing	1.196	x	x	Dominio (imaging technique) Soggetto (humanities)	13	54	4

Tabella 5 - Sintesi delle ricerche effettuate sui portali di indicizzazione re3data, OpenDOAR, ROAR, FAIRSharing

Al fine di rendere i database comparabili, nella ricerca con testo libero si sono adottati i tag "3D" ed è stato mantenuto come soggetto "Humanities". Nel caso di re3data il numero di risultati risulta dunque leggermente inferiore con quanto riportato in Barzaghi (2024) mentre OpenDOAR non permette di filtrare ulteriormente la ricerca inserendo parole chiave o utilizzando delle descrizioni in campo libero; ciò rende lo strumento poco efficiente. ROAR e FAIRSharing permettono di effettuare selezioni personalizzate, tuttavia in ROAR il sistema effettua la ricerca con campi liberi ignorando il tag "3D". FAIRsharing restituisce una selezione di 54 output. La piattaforma consente inoltre di filtrare i risultati in base a requisiti relativi alla buona gestione dei metadati e alle politiche adottate; aggiungendo queste voci e mantenendo il tag "3D" con il soggetto si ottiene un'ulteriore selezione di 37 output. Tra questi ritroviamo DANS, DataverseNL, tDAR e ADS. Occorre tuttavia notare che ripetendo la ricerca con gli stessi criteri il servizio tende a fornire ogni volta risultati leggermente diversi; inoltre, vengono inclusi risultati non del tutto pertinenti come nel caso di Visual Media Service, una delle piattaforme restituite tra i "best matches" e che però, come precisato nel sito, non offre servizi di archiviazione ma strumenti per la visualizzazione di dati 3D. In generale, si può dunque confermare la scarsa considerazione, già evidenziata in Barzaghi, per questo tipo di contenuti (Barzaghi et al. 2024). Tra i repository più frequentemente citati in letteratura, invece, troviamo per lo più soluzioni open source come Zenodo¹⁹³, DataverseNL, DSpace¹⁹⁴, Morphosource¹⁹⁵, ma anche soluzioni commerciali come Figshare¹⁹⁶ e Sketchfab; sebbene i criteri adottati dai vari autori siano di volta in volta diversi, possiamo affermare che in quasi tutti gli studi esaminati vengono analizzati sia aspetti relativi all'architettura o infrastruttura, sia questioni riguardanti la gestione dei metadati e l'usabilità.¹⁹⁷ Zenodo, viene definito da Macgregor come uno dei "mega-repository" più importanti, in grado di ospitare oggetti eterogenei di varia complessità (Peters et al., 2017, Macgregor 2023). Altri studi presi in esame confermano in effetti che è una piattaforma di semplice utilizzo pensata per la coda lunga della scienza, scelta da ricercatori di molti settori (Amorin 2017). Si tratta più in particolare di uno strumento sviluppato dall' European Organization for Nuclear Research (CERN), in collaborazione con OpenAIR, per promuovere la condivisione dei dati di ricerca nell'ambito dei progetti finanziati dalla Commissione Europea (Peters et al. 2017); in questo senso, uno dei suoi

¹⁹³ <https://zenodo.org/>

¹⁹⁴ <https://dspace.org/>

¹⁹⁵ <https://www.morphosource.org/>

¹⁹⁶ <https://figshare.com/>

¹⁹⁷ Si vedano ad esempio Wilkinson 2016, Amorin 2016, Boyer 2017, Champion 2020, Hardesty 2020, Rodrigues 2022, Sharma 2022, Barzaghi 2024, Macgregor 2023.

obiettivi principali è quello di facilitare la pubblicazione dei risultati ottenuti attraverso fondi europei.¹⁹⁸

Al fine di supportare vari ambiti e metodi di ricerca, Zenodo non impone alcun requisito relativamente a formati, dimensioni, schemi di metadati e dal 2017 offre la possibilità di assegnare a tutti gli upload un *Object Identifier* (DOI), in modo tale da rendere le risorse univocamente ricercabili una volta pubblicate; come riportato nel caso studio dedicato al monitoraggio dei sistemi Open Science (2019) tutti gli utenti possono caricare contenuti all'interno della piattaforma, con un limite massimo per record di 50 GB. Tutti i metadati sono memorizzati in formato JSON e vengono esportati in diversi formati standard come MARCXML, Dublin Core e DataCite Metadata Schema. L'accesso ai metadati avviene secondo protocolli standard (HTTP e OAI-PMH), tuttavia per il deposito e il recupero delle informazioni la piattaforma implementa anche API REST. Sebbene si tratti di un repository orientato prima di tutto allo scambio aperto delle informazioni, Zenodo consente di depositare dati con accesso chiuso o con embargo; tuttavia l'accesso chiuso non garantisce che tali file non possano essere visualizzati dallo staff operativo in determinate circostanze. Il CERN, per quanto riguarda la gestione di Zenodo, assicura che gli oggetti depositati saranno conservati per tutta la durata di vita del deposito, ovvero la durata di vita del laboratorio ospitante, il CERN, vale a dire per almeno i prossimi 20 anni. In caso di chiusura dell'archivio, l'organizzazione garantisce comunque il massimo impegno per integrare tutti i contenuti in archivi alternativi istituzionali e/o tematici. Come precisato nel deliverable D6.3 relativo alla progettazione e all'adattamento dell'infrastruttura per alcuni casi di studio, lo scopo principale del deposito è quello di garantire la conservazione a lungo termine e al contempo la scoperta dei beni depositati. Zenodo e il framework Invenio sottostante sono implementati secondo il modello di riferimento Open Archival Information System (OAIS). Le misure tecniche per il mantenimento delle risorse comprendono, dunque, controlli regolari che assicurano l'integrità dei file e l'archiviazione di metadati/dati in sistemi indipendenti dal software del deposito.¹⁹⁹ Come notato da alcuni autori, sebbene si tratti di un repository ampiamente adottato e dotato di funzionalità interessanti per la gestione dei dati, l'approccio generalista di questo tipo di piattaforme può far sì che la modellazione dei metadati sia subottimale rispetto alle esigenze di alcuni tipi di oggetti (Macgregor 2023).

Da questo punto di vista, Morphosource è uno dei pochi repository ad avere un focus specifico sui dati 3D. Attualmente ospita circa 96.000 modelli, di cui oltre la metà sono liberamente scaricabili o visualizzabili da browser; i restanti possono comunque essere scaricati previa richiesta.²⁰⁰ Il progetto iniziale di MorphoSource è stato sviluppato nel 2009 come estensione del MorphoBrowser gestito dall'Università di Helsinki e lanciato in seguito nel 2013 grazie alla collaborazione del *Trinity College of Arts and Sciences della Duke University*. Si tratta di una piattaforma gestita principalmente da ricercatori, il cui scopo principale è quello di fornire un ambiente di archiviazione di grandi serie di dati tridimensionali ad alta fedeltà a supporto delle ricerche pubblicate sull'anatomia comparata e sulla paleontologia; in tal senso è generalmente riconosciuto come il deposito più appropriato per grandi set di dati grezzi di organismi fossili e/o campioni comparati (Boyer et al. 2017). Si basa inoltre su un software open source che utilizza come base di codice CollectiveAccess, un'applicazione per la gestione delle raccolte multimediali (Hardesty 2020). MorphoSource è anche pensato come uno strumento a supporto della ricerca peer-reviewed e incoraggia gli utenti a contribuire al completamento delle digitalizzazioni fornendo dati su parti diverse o ridondanti dello stesso esemplare (Boyer et al. 2017). D'altra parte, come spiegato nella documentazione ufficiale, la conservazione a lungo termine delle risorse è ancora un problema aperto; sebbene, infatti, fino a questo momento l'archivio sia stato supportato dai finanziamenti di agenzie come la National Science Foundation, è possibile che in

¹⁹⁸ <https://cordis.europa.eu/project/id/101122956>

¹⁹⁹ Per un approfondimento su Zenodo si vedano Wareham & Priego 2019, Agosti et al. 2019.

²⁰⁰ <https://www.morphosource.org/?locale=en>

futuro debba adottare politiche diverse, riducendo ad esempio lo spazio di archiviazione a uso gratuito o ponendo comunque restrizioni al materiale depositabile.²⁰¹ In tal senso, un obiettivo futuro di importanza critica è quello di aumentare l'interoperabilità tra MorphoSource e le altre piattaforme al fine di sviluppare funzionalità che incorporino i punti di forza specifici di ciascun progetto o iniziativa. Come ricorda Boyer et al. (2017) la componente più importante di una soluzione a lungo termine consiste anzitutto nell'avere il sostegno delle comunità di scienziati, delle biblioteche universitarie e delle infrastrutture di dati che le supportano (Boyer et al. 2017).

2.3 Aggregatori e portali

La gestione dei dati 3D richiede uno sforzo congiunto per gestire gli oggetti prodotti nell'ambito degli studi sul Patrimonio Culturale; la ricchezza di informazioni che questi oggetti possono incorporare o veicolare ha in parte accelerato la costruzione di infrastrutture interconnesse e complementari. Progetti autonomi, organizzazioni no profit, università e istituti di ricerca, società di produzione e privati contribuiscono a una parte significativa dei dati 3D disponibili online (Storeide et al. 2023). Le funzioni legate alla gestione di queste risorse hanno assunto sempre più la forma di una rete di servizi distribuita, come del resto è auspicato nella più ampia visione illustrata nei report del COAR discussi in precedenza (2017, 2022). A oggi molte biblioteche digitali e cataloghi online mettono a disposizione una rappresentazione linked data dei metadati proprio per favorire la diffusione delle risorse del patrimonio culturale (Freire et al. 2019).

Al fine di mediare lo scambio delle informazioni prodotte da musei e altri istituti culturali e “abbattere i silos dei LAM” stanno emergendo via via sempre più infrastrutture dedicate alla raccolta e integrazione delle risorse digitali e dei loro metadati. Una delle sfide più significative in questo contesto riguarda la ridefinizione dei modelli di dati tradizionali in modelli di dati basati sulla tecnologia semantica (Vander Sande 2018, Freire et al. 2019, Silva-Terra 2024). Come messo in luce in Vander-Sande (2018) al fine di offrire il servizio integrato e senza soluzione di continuità che molti utenti si aspettano, le istituzioni hanno messo in atto principalmente due tipi di approcci: a) l'integrazione semantica, che consente di allineare le descrizioni dei metadati al di là dei confini istituzionali, e b) la pubblicazione online, che sfrutta il Web per condividere i metadati in modo da favorire un riutilizzo efficace delle risorse (Vander Sande et al. 2018).

Lo studio condotto da Freire et al. (2019) ad esempio si muove in quest'ultima direzione, offrendo una dettagliata panoramica del processo eseguito per l'aggregazione di linked data in funzione della rete di distribuzione di Europeana. In questa indagine, la National Library of The Netherlands ha contribuito fornendo i dati, mentre la Dutch Digital Heritage Network ha svolto il ruolo di aggregatore intermedio, coordinando la raccolta dei dati e fungendo da ponte tra il provider e l'aggregatore centrale.²⁰² Al fine di automatizzare il lavoro di allineamento dei modelli di dati usati rispettivamente dalla biblioteca e da Europeana, gli autori hanno messo a punto un workflow per raccogliere i linked data forniti in Schema.org, analizzarli e adattarli allo schema adottato dalla piattaforma (EDM) attraverso un apposito profilatore (Linked Data Harvester).²⁰³ Questo strumento permette di rilevare eventuali carenze nel set di dati e di comunicarle al fornitore; successivamente il dataset viene convertito e trasferito ai normali sistemi di ingest utilizzati dall'aggregatore che può così proseguire con il suo flusso di lavoro, indipendentemente dal metodo di raccolta utilizzato per il

²⁰¹ <https://duke.atlassian.net/wiki/spaces/MD/pages/274268722/Data+Deposit+Costs>

²⁰² Il *Dutch Digital Heritage Network* (NDE), è un programma nazionale che mira ad aumentare il valore sociale delle collezioni conservate da biblioteche, archivi e musei nei Paesi Bassi sviluppando linee guida <https://netwerk-digitaal-erfgoed.github.io/cm-implementation-guidelines/> e servizi per la comunità in conformità con la Strategia Nazionale per il Patrimonio Digitale <https://netwerkdigitaalerfgoed.nl/>

²⁰³ <https://github.com/nfreire/data-aggregation-lab>

dataset (Freire et al. 2019). Il ruolo svolto da queste istituzioni è fondamentale per rendere le risorse conservate e/o pubblicate ricercabili dagli utenti. Come evidenziato nel recente framework sviluppato dalla Task Force del Comitato esecutivo dell'EOSC (2021), molti dei depositi che gestiscono i dati non sono ben preparati per i motori di ricerca, i social network, il web semantico e gli oggetti digitali FAIR “comprensibili dalla macchina e dall'uomo” (Corcho et al. 2021). Europeana, come dimostra lo studio appena descritto, è un caso esemplare delle numerose difficoltà che accompagnano il processo di transizione del Patrimonio Culturale nel contesto del Web Semantico. D'altra parte la piattaforma sta promuovendo numerose iniziative e costruendo gruppi lavoro finalizzati a migliorare i servizi e le tecnologie attualmente presenti nel portale; nell'ambito della task force creata per i linked data verranno ad esempio esplorati diversi casi d'uso di RDF per migliorare l'interoperabilità semantica e testare standard che non siano solo EDM.²⁰⁴ Da sottolineare inoltre anche l'impegno profuso nel sostenere iniziative legate alla diffusione delle collezioni 3D, come la campagna “Twin it! 3D for Europe's culture” con la quale ha invitato gli Stati membri dell'Unione europea a selezionare e presentare un bene emblematico digitalizzato in 3D nel data space comune europeo per il patrimonio culturale. La campagna mirava a incoraggiare l'innovazione e ad accelerare l'uso e il riutilizzo del 3D, supportando al contempo gli Stati membri nei loro sforzi di digitalizzazione e conservazione.²⁰⁵ Anche su questo tema, infatti, nel 2019 è stata istituita una task force con l'obiettivo di aumentare il supporto per il 3D in Europeana e la sua disponibilità per gli utenti (Fernie 2024). Tra le questioni affrontate dal gruppo di lavoro vi erano l'identificazione dei formati di file, i visualizzatori e i metodi di pubblicazione più idonei per collegare e incorporare contenuti 3D online. Inoltre, tra giugno-luglio dello stesso anno è stato condotto un sondaggio tra i membri dell'Europeana Aggregator's Forum e dell'EuropeanaTech community per valutare l'uso del 3D da parte dei membri della rete di Europeana; tra le istituzioni rappresentate 8 erano Aggregatori Europeana, 3 organizzazioni del settore creativo, 17 GLAM e 9 Istituti di ricerca, per un totale di 37 istituzioni intervistate. Per quanto riguarda l'esperienza generale con i contenuti 3D presenti nel portale sono emerse problematiche riguardanti l'accesso, i metadati e altre questioni tecniche; ad esempio alcuni hanno parlato della possibilità di limitare la ricerca ai contenuti 3D e più in generale di rendere la condivisione e la visualizzazione più “facili”. Diversi interlocutori hanno sottolineato la presenza di link interrotti o materiali etichettati come 3D, di cui però a volte è disponibile solo una un'immagine in miniatura. Inoltre è stata spesso evidenziata la mancanza di una modalità di visualizzazione integrata compatibile con il browser; alcuni hanno anche menzionato l'opportunità per i fornitori/aggregatori di includere i file sorgente originale per aumentare le possibilità di utilizzo nelle industrie creative, integrando una funzione che permetta ai musei da un lato di archiviare oggetti 3D geometricamente corretti (non Sketchfab) per la conservazione del patrimonio culturale e dall'altro modelli decimati (Sketchfab) ottimizzati per AR e VR.²⁰⁶

Europeana, infatti, essendo simultaneamente sia una piattaforma sia un portale, aggrega contenuti ospitati esternamente in repository istituzionali ma anche contenuti presenti in altri servizi di sharing (Champion 2018, Fernie 2024);²⁰⁷ ciò significa, come spiegato nella documentazione dedicata alla pubblicazione di contenuti 3D, che l'infrastruttura non può ospitare i file ma solo incorporare materiale già pubblicato online o accessibile tramite un viewer esterno. Inoltre, sebbene

²⁰⁴ <https://pro.europeana.eu/project/linked-data-task-force>

²⁰⁵ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-showcases-pan-european-collection-emblematic-3d-digitised-cultural-heritage-assets>

²⁰⁶ Europeana Network Association Members Council – Task Force report. 3D content in Europeana task force. 27 Novembre 2019, versione 1.0, 7 gennaio 2020.

²⁰⁷ Come precisato in Champion (2018) sebbene i portali possano riunire informazioni disparate in modo conveniente e in un formato standardizzato, a differenza delle piattaforme si limitano a raccogliere o collegare altri siti, senza fornire accesso diretto alle risorse. The Role of 3D Models in Virtual Heritage Infrastructures. Champion 2018.

sia possibile inviare una richiesta per aggiungere il visualizzatore utilizzato al registro interno degli endpoint supportati da Europeana, al momento sono supportati solo Sketchfab e WEAVE.²⁰⁸

In generale, per gli utenti che non sono in grado di ospitare autonomamente i contenuti, la documentazione raccomanda il ricorso ad aggregatori intermedi o nazionali; CARARE, ad esempio, al fine di facilitare la condivisione dei modelli caricati su Sketchfab mette a disposizione la dashboard di Share 3D, uno strumento online che consente di creare metadati che possono essere revisionati e nel caso, adattati all'EDM.²⁰⁹ Nonostante ciò permetta un maggiore livello di interoperabilità, è bene precisare che piattaforme di questo tipo, sebbene supportate da una comunità molto attiva, sono maggiormente orientate alla condivisione immediata dei contenuti che non alla loro conservazione a lungo termine; la maggior parte non fornisce informazioni correlate e link a risorse per ulteriori studi e utilizzi e in genere mancano di provenienza dei dati e di metadati (Champion 2020).²¹⁰ D'altra parte le piattaforme commerciali offrono alcuni protocolli e formati coerenti e la ricerca e l'accesso ai loro file 3D sta diventando più facile che nelle opzioni istituzionali (Barzaghi et al. 2024). Per quanto riguarda le possibilità di intermediazione offerte dagli aggregatori nazionali, per l'Italia è possibile fare riferimento a CulturaItalia, il portale istituito nel 2008 dal Ministero dei Beni Culturali italiano (MIBACT-ICCU) per promuovere il patrimonio culturale digitalizzato.²¹¹ Anche in questo caso i dati condivisi dalle varie istituzioni vengono gestiti attraverso un catalogo che raccoglie e indicizza le informazioni fornite dai partner attraverso i metadati, mantenendo i contenuti nel sito web di origine.²¹² Come riportato in Nappi et al. (2024) CulturaItalia rimappa i metadati raccolti secondo l'Europeana Data Model (EDM) e il formato standard internazionale CIDOC-CRM. Tuttavia, i tentativi di utilizzare tecnologie semantiche per supportare l'evoluzione del portale in una biblioteca digitale hanno incontrato limitazioni intrinseche, ovvero la limitata capacità di rappresentare informazioni sul patrimonio culturale a partire dai dati; gli autori aggiungono inoltre che la mancanza di una vera e propria biblioteca digitale sia da attribuire all'assenza di parametri e modelli descrittivi condivisi e di un sistema di coordinamento in grado di definire linee guida e standard da adottare in merito alle strutture dei metadati, alle procedure di digitalizzazione e al formato dei dati (Nappi et al. 2024). D'altra parte, le iniziative legate alla digitalizzazione del Patrimonio Culturale italiano sono sempre più numerose. Come accennato, nell'ambito del Piano Nazionale di Digitalizzazione del Patrimonio Culturale (PND), oltre ad essere state redatte numerose linee guida dedicate ai diversi aspetti che caratterizzano il ciclo di vita dei beni digitalizzati, sono state anche promosse iniziative inerenti alla formazione, nonché alla condivisione dei progetti realizzati.²¹³

Dicolab, ad esempio, grazie alla collaborazione della Fondazione Scuola dei beni e delle attività culturali, offre moltissimi corsi di formazione legati alla cultura digitale, sostenendo

²⁰⁸ <https://weave-3dviewer.com/> Si veda inoltre la documentazione wiki relativa alle modalità di pubblicazione di contenuti 3D <https://europeana.atlassian.net/wiki/spaces>

²⁰⁹ <https://pro.europeana.eu/page/dashboard>

²¹⁰ Come è possibile immaginare, a differenza delle piattaforme open source, le politiche relative alla conservazione dei dati spesso non sono accompagnate da documentazione esaustiva; ciò potrebbe dar luogo a fraintendimenti circa la gestione dei contenuti depositati, anche per quanto riguarda i meccanismi di trasferimento dei dati a terzi. A tal proposito si veda <https://sketchfab.com/blogs/community/fab-publishing-portal-open-for-sketchfab-migration/>

²¹¹ <https://www.culturaitalia.it/>

²¹² È bene notare che attualmente (Dicembre 2024), i collegamenti esterni presenti nel catalogo del portale e che dovrebbero reindirizzare alle collezioni conducono a pagine di errore '404- Page Not Found'. Come discusso in precedenza, il problema potrebbe essere legato al mancato aggiornamento dei metadati forniti tramite OAI-PMH e non più sincronizzati con gli URL delle risorse d'origine https://www.culturaitalia.it/indice-delle-risorse/?q=*%&cat=indice&language=it&pag=1

²¹³ Per una panoramica delle linee guida relative ai processi di digitalizzazione si veda la documentazione online <https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html>

importanti iniziative orientate alla costruzione di una comunità di pratica e alla disseminazione di contenuti culturali; tra i vari progetti sperimentati vale la pena menzionare “Share – Pratiche di cultura al digitale”, una mappa interattiva e in continua evoluzione che raccoglie vari progetti di trasformazione digitale condotti in Italia in diversi settori. Sebbene si tratti di un’iniziativa inaugurata solo recentemente (luglio 2024), occorre riconoscere che gli strumenti di interrogazione della mappa sono ancora molto limitati, così come il numero dei progetti legati alla digitalizzazione del patrimonio attraverso tecniche 3D.²¹⁴ Del resto anche la collezione degli oggetti 3D presente su Europeana costituisce solamente lo 0,013% dei contenuti totali, di cui circa 360 modelli provenienti da istituzioni italiane.²¹⁵ Le modalità di visualizzazione, per il momento, dipendono ancora da viewer esterni adottati dai singoli contributori e spesso offrono modalità di interazione basilari. L’implementazione di funzioni già familiari in qualsiasi contesto legato alla ricerca, come la possibilità di filtrare i risultati in base alle revisioni peer-review o strumenti di misurazione, vengono descritte da alcuni autori come caratteristiche ancora poco diffuse (Storeide et al. 2023). Da questo punto di vista, Champion e Rahaman (2020) sono tra i pochi autori ad aver fornito un’analisi critica delle funzioni e delle modalità di visualizzazione attualmente implementate da repository e piattaforme dedicate alla condivisione di oggetti 3D (Champion & Rahaman 2020).

In una precedente pubblicazione Champion (2018) ha inoltre messo in luce alcuni aspetti, ancora troppo trascurati nell’ambito delle ricerche sul Patrimonio Culturale e che potrebbero invece essere decisivi per un uso più efficace della documentazione 3D prodotta da musei e istituti di ricerca; tra le principali questioni sollevate vi è ad esempio il problema del formato, ritenuto uno degli ostacoli “più fastidiosi” per la diffusione di contenuti 3D. Altri problemi evidenziati riguardano la carenza di metodi che consentano una presentazione al contempo accurata e coinvolgente, in grado di stimolare gli utenti e aiutarli a comprendere sia il potenziale sia i limiti delle tecnologie 3D. Tuttavia, come già emerso in alcuni degli studi discussi in precedenza, anche Champion riconosce che gli ostacoli che impediscono il pieno successo del Patrimonio Culturale Digitale non sono solo di natura tecnica; come scrive l’autore infatti:

[...] Può sembrare che il numero complessivo e la difficoltà delle questioni tecniche siano il problema principale da risolvere, ma se non c’è coinvolgimento, comprensione e apprezzamento da parte del pubblico, il progetto di patrimonio virtuale è fallito nonostante la brillantezza tecnica o il supporto infrastrutturale. Un’infrastruttura che non viene utilizzata non è una vera infrastruttura, ma solo un’attrezzatura. [...] Il successo dei progetti di patrimonio virtuale dipende dal coinvolgimento della comunità, che comprende studiosi, studenti, il pubblico in generale, ma anche gli operatori e i proprietari originali dei contenuti culturali simulati. Mentre sviluppiamo modelli, strutture e infrastrutture, potremmo dover considerare come approcciare gli individui [...] (Champion 2018)

I sistemi di conservazione e condivisione supportano in parte le esigenze di accesso e “findability” delle risorse, incluse quelle 3D, ma non assicurano necessariamente la comprensione e il coinvolgimento, essenziali per il riuso dei dati e delle informazioni prodotte. Sulla scia di queste ultime considerazioni e del quadro tracciato da Champion e Rahaman, nel prossimo capitolo si cercherà dunque di individuare quali sono le principali modalità di visualizzazione e interazione offerte dalle soluzioni commerciali e open source attualmente disponibili, prendendo in considerazione tuttavia anche approcci maggiormente innovativi e ancora poco diffusi nella presentazione del Patrimonio Culturale 3D.

²¹⁴ <https://dicolab.it/share-pratiche-di-cultura-al-digitale/>

²¹⁵ <https://www.europeana.eu/en/search?page=1&qf=TYPE%3A%223D%22&query=&view=list>

Capitolo Terzo

1. Rappresentazione dei dati acquisiti in ambiente Web3D

In una pubblicazione del 2010 Gooding forniva un'interessante panoramica di come la tecnologia dell'immagine, "la cosiddetta visualizzazione scientifica", venga usata in diverse aree di studio per comprendere e valutare fenomeni complessi. Il processo adottato generalmente implica la manipolazione e l'interpretazione di una serie di rappresentazioni visive attraverso le quali si cerca di astrarre la conoscenza accumulata per favorire l'analisi di alcuni fenomeni o oggetti di studio. I metodi di inferenza visiva, come spiega l'autore, possono essere utilizzati in modo bidirezionale, a seconda che sia necessario ridurre o aumentare la complessità e il contenuto informativo di una rappresentazione. Nel caso più semplice, l'interpretazione si sviluppa da un'immagine di partenza (nodo A) a un grafico o diagramma (nodo B), e attraverso "l'arco" $B \rightarrow C$ a una rappresentazione strutturale (nodo C) che può a sua volta essere trasformata in un modello processuale (nodo D); quest'ultimo infine può essere rappresentato in modo non visivo, ad esempio, attraverso un insieme di equazioni matematiche. In questo contesto, dunque, le rappresentazioni ai nodi C e D sono le più complesse; in genere permettono di effettuare ipotesi e hanno un potenziale esplicativo maggiore rispetto ai modelli più semplici, come i diagrammi. Al contempo, tuttavia, esse sono anche più difficili da comprendere poiché solitamente incorporano conoscenze specifiche provenienti da diversi domini (Gooding 2010).

Come ben spiegato da Munzner (2014), uno degli obiettivi dell'Information Visualization (InfoVis), spesso è proprio quello di trovare un equilibrio tra questi estremi al fine di progettare sistemi che siano in grado di gestire grandi quantità di dati "con grazia"; in termini pratici, ciò significa trovare un compromesso tra l'opportunità di mostrare più informazioni possibili in una sola volta, per ridurre al minimo le necessità di esplorazione, offrendo una visione d'insieme più immediata, e il rischio di sopraffare l'utente producendo un sovraccarico cognitivo. In questo caso, l'interattività permessa dai sistemi informatici risulta dunque fondamentale per costruire strumenti di visualizzazione in grado di gestire la complessità; il vantaggio dei diagrammi è che le informazioni possono essere organizzate per posizione spaziale, offrendo la possibilità di accelerare sia la ricerca che il riconoscimento dei vari elementi. In tal senso, uno strumento di visualizzazione interattivo può supportare l'indagine a più livelli di approfondimento, passando da una panoramica di altissimo livello fino a una visione altamente dettagliata di una piccola parte del sistema informativo. Inoltre, come accennato, questo approccio supporta i processi di inferenza visiva grazie ai quali è possibile cogliere eventuali connessioni tra più insiemi di dati (Munzner 2014).

La ricerca di un equilibrio, d'altronde, emerge anche nelle analisi condotte da Windhager et al. (2016) sulle interfacce adottate per la comunicazione delle metacollezioni digitali esposte da musei e istituzioni culturali, in cui spesso è possibile riunire oggetti provenienti da diversi domini o aree geografiche. Sebbene gli spazi espositivi digitali offrano innumerevoli possibilità di riconfigurazione delle collezioni fisiche custodite nei musei, come sottolineano gli autori, spesso le modalità di accesso risultano alquanto desolanti, con i visitatori che si trovano a "entrare in un atrio scialbo" caratterizzato da una semplice casella di ricerca che li invita a cercare 'qualcosa'. La maggior parte degli utenti "occasionalmente" invece richiede approcci orientati anche all'estetica e al divertimento;²¹⁶ pertanto, al contrario di quanto si potrebbe pensare, i metodi che conservano la complessità, offrendo ad esempio punti di accesso multipli o esplorazioni "non risolutive", potrebbero produrre esperienze di navigazione più efficaci (Windhager et al. 2016). La volontà di offrire modalità di ricerca semplici e

²¹⁶ Walsh & Hall (2015) definiscono gli utenti occasionali come visitatori che non hanno un obiettivo o un argomento in mente ma vogliono solo dare un'occhiata a ciò che è disponibile nella raccolta, aggirandosi nello spazio digitale così come farebbero all'interno dello spazio fisico di un'istituzione culturale.

ben consolidate, in questo modo, anziché favorire l'accesso alle collezioni culturali, potrebbe dunque diminuirne drasticamente l'impatto. A tal proposito, in un altro studio Mayr et al. (2016) affrontano la questione di come tali dati possano essere visualizzati dal grande pubblico, sostenendo che spesso le interfacce sviluppate non vanno incontro alle esigenze di tutti gli utenti; sebbene infatti, molte di queste configurazioni possano soddisfare le necessità degli esperti, i visitatori occasionali generalmente hanno bisogno di modalità alternative per scoprire ciò che è di loro interesse. Questi utenti traggono piacere dal processo di ricerca stesso e in genere non analizzano i dati in modo approfondito; tuttavia si rendono conto degli schemi di base, incorporando i tipici meccanismi dei processi di indagine, come l'elaborazione estesa delle informazioni, la valutazione e l'annotazione (Mayr et al. 2016).

In ogni caso, come suggeriscono anche altri studi, il desiderio di comprensione che caratterizza gli utenti contemporanei non dovrebbe essere sottovalutato. Soprattutto se l'obiettivo è quello di incoraggiare usi innovativi e "imprevisti" delle risorse digitalizzate occorre offrire un accesso più ricco al Patrimonio Culturale (Angeletaki & Carrozzino 2018). Anziché essere consumatori passivi di informazioni, gli utenti desiderano un maggiore coinvolgimento anche per quanto riguarda l'uso delle fonti; in tal senso, come sostengono Bernardou et al. (2018) la raccolta di dati di ricerca con mezzi digitali non dovrebbe solo permettere di sapere come avviene l'acquisizione dei dati attraverso la digitalizzazione, ma contribuire a una maggiore e più rigorosa comprensione critica dell'intero processo (van Peursen, 2010, Benardou et al. 2018). Le istituzioni culturali sono consapevoli che la semplice creazione di un archivio online non è sufficiente per raggiungere un vasto pubblico e che la disponibilità non porta necessariamente all'accesso effettivo (Mauri et al. 2013).

Nonostante questa consapevolezza sembri diffusa tra gli studiosi, in letteratura spesso i compiti di visualizzazione vengono classificati in base al target di riferimento, dividendo gli approcci orientati agli utenti esperti da quelli invece pensati per visitatori occasionali o più inconsapevoli (Munzner 2014, Potenziani et al. 2018, Windhager et al. 2019, Scopigno 2021). Sebbene ciò abbia senso per gli strumenti di progettazione, per quanto riguarda la pubblicazione delle informazioni, occorre forse ripensare tale suddivisione in termini meno netti, considerando la grande eterogeneità degli utenti che potrebbero essere interessati alla fruizione e all'uso degli oggetti digitali culturali.

Ulteriori indagini riguardanti la presentazione dei dati attraverso tecniche Info-Vis confermano il progressivo interesse dei visitatori per le collezioni online e la necessità di sviluppare servizi in grado di offrire una maggiore varietà dei contenuti (Shin et al. 2023). Tuttavia, come emerge in un'altra approfondita analisi condotta da Windhager et al. (2019), gli approcci che tentano di servire gruppi di utenti diversi sono pochi; più in particolare gli autori affermano che su un campione di 50 sistemi di visualizzazione documentati da articoli di ricerca, solo 10 sono pensati per servire target diversi. La maggior parte delle strategie si basa sullo sviluppo di prototipi messi a punto per svolgere compiti specifici; ad esempio gli approcci dedicati a utenti esperti mirano a soddisfare esigenze di indagine e curatela, mentre quelli orientati agli utenti "occasionalisti" tentano di offrire esperienze più coinvolgenti. Come accennato, solo in una piccola parte dei lavori si cerca di valorizzare, allo stesso tempo, la componente più strettamente scientifica di ricerca con quella relativa alla necessaria comunicazione pubblica, mettendo in luce l'opportunità di instaurare collaborazioni e sinergie che vanno al di là dei confini accademici, per collegare la conoscenza degli esperti con quella del pubblico (Hinrichs et al. 2016, Windhager et al. 2019).

Indipendentemente dalle strategie adottate, quasi tutti gli studi evidenziano l'importanza e al contempo la difficoltà di costruire sistemi basati sull'interconnessione delle informazioni o che permettano di evidenziare relazioni di causa effetto e collegamenti strutturali, in particolare sfruttando le specificità che caratterizzano ogni mezzo di comunicazione e considerando i diversi tipi di dati in modo strettamente correlato.²¹⁷ A tal proposito, Lengauer et al. (2020) affermano che le classiche interfacce di ricerca presenti nei repository digitali difficilmente consentono di ottenere un'adeguata

²¹⁷ Windhager et al. 2019, Boutsis et al. 2019, Lengauer et al. 2020, Scopigno 2021, Brunet et al. 2022.

visione d'insieme dell'intero volume di manufatti presenti in una collezione, vanificando l'esplorazione e l'analisi di relazioni potenzialmente interessanti tra i manufatti nelle diverse modalità.

In tal senso, gli autori propongono un approccio orientato all'esplorazione visiva multimodale di grandi raccolte di beni culturali, cercando di interconnettere tratti spaziali (luogo di ritrovamento, provenienza), temporali (datazione) e qualitativi (forma, materiale, stile) attraverso un sistema di viste collegate, denominato "Linked Views Visual Exploration System" (LVVES).

Per testare il funzionamento del prototipo, i ricercatori hanno scelto di utilizzare l'ampia raccolta di vasi greci messa a disposizione dal Beazley Archive Pottery Database (BAPD)²¹⁸, dal quale hanno composto un set comprendente 614 manufatti accompagnati da circa 2.800 immagini. Come spiegato nello studio, il sistema LVVES supporta un livello dinamico di granularità visiva, il che significa che il grado di dettaglio cambia in base alle interazioni dell'utente. Per permettere la connessione visiva degli aspetti menzionati in precedenza, il sistema utilizza una struttura dati basata su grafi, espressa attraverso un meccanismo di "hierarchical balloon", e mette a disposizione una serie di strumenti di selezione. Un primo metodo consiste nel campionare in una delle viste un sottoinsieme di anteprime mediante lo strumento lazo; gli artefatti selezionati vengono quindi evidenziati attraverso la comparsa di un cerchio rosso in tutte le altre viste. Oltre a questa evidenziazione basata sulla selezione dell'utente, il sistema fornisce all'utente anche una selezione "più significativa" calcolata automaticamente sulla base di una misura di correlazione incrociata che permette di calcolare ed evidenziare le correlazioni più rilevanti.²¹⁹ Adottando la più ampia classificazione proposta inizialmente in Dork et al. (2011), poi ripresa in alcuni degli studi menzionati (Mayr et al. 2016, Windhager et al. 2019), approcci di questo tipo possono essere associati prevalentemente a una forma di esplorazione di tipo orizzontale poiché, sebbene la presentazione venga concentrata in un'unica interfaccia, lo scopo principale è quello di fornire una visione di insieme di alto livello basata sulla connessione di diverse informazioni; complementare all' "esplorazione orizzontale", invece, l' "immersione verticale" rappresenta la tendenza a "impegnarsi completamente" accedendo ad esempio a viste dettagliate delle risorse che permettono di dare senso alle informazioni (Dork et al. 11, Mayr et al. 2016, Windhager et al. 2019).²²⁰

1.1 Piattaforme e framework per la visualizzazione di modelli 3D

Nel caso delle ricostruzioni 3D gli schemi di interazione risultano particolarmente importanti poiché i modelli creati sono solitamente il prodotto di competenze, fonti e strumenti di acquisizione eterogenei (Brunet et al. 2022). Tale complessità non è solo condizionata dall'utilizzo di dati di diversa natura ma è al contempo alimentata anche dalla tipologia stessa degli output esportati, spesso "ingombranti" e difficili da scaricare; inoltre, questo tipo di rappresentazioni mancano in genere di metadati di accompagnamento esaustivi, con pochi esempi che documentano le modalità di acquisizione e ancor meno quelli che quantificano l'accuratezza dei processi di raccolta ed elaborazione (Champion 2018).

²¹⁸ Come ricordano gli autori si tratta di uno dei più grandi database dedicati alle ceramiche dipinte nell'antica Grecia, ospitato dall'Università di Oxford <https://www.carc.ox.ac.uk/carc/pottery>

²¹⁹ Tutte le viste hanno in comune una struttura dati sottostante basata su grafi $G(V, E)$, dove i vertici (V) comuni a tutte le viste corrispondono agli artefatti visualizzati, mentre gli archi ponderati (E) vengono utilizzati per modellare la somiglianza tra gli artefatti. Questi grafi costituiscono la base per un layout guidato dalle forze in cui la posizione di un artefatto (visualizzato come un'anteprima) in una vista è determinata da un insieme di forze che agiscono simultaneamente sui vertici. Per una descrizione dettagliata del metodo si veda lo studio completo Lengauer et al (2020) *Exploration of Cultural Heritage Collections with Linked Spatiotemporal, Shape and Metadata Views*

²²⁰ Lo schema proposto in Dork si basa a sua volta su studi pregressi tra cui ad esempio Savolainen (1995), Shneiderman (1996), McKenzie (2003).

Come sottolineano Scopigno et al. (2017), sebbene le tecnologie digitali siano ormai mature per produrre repliche digitali di alta qualità il problema non ancora risolto, a cui si è sin qui data poca attenzione, è come rendere disponibili questi dati e le relative conoscenze alla società nel suo complesso. Le osservazioni espresse a tal proposito sembrano fare da eco a quanto già evidenziato negli studi precedentemente citati sulle procedure di metadazione; in particolare, gli autori sottolineano che, mentre “la quantità di tempo e risorse dedicate alla digitalizzazione 2D/3D è stata impressionante, “solo la punta di questo iceberg è stata esposta alla comunità”, aggiungendo che “la maggior parte del materiale prodotto resta nascosta sugli scaffali o nei dischi rigidi di chi ha realizzato la digitalizzazione” (Scopigno et al. 2017). D’altra parte, come emerge in questa analisi e in altre di poco successive, alcuni dei principali vincoli legati alla resa grafica dei modelli 3D sul Web sono in parte stati superati grazie allo sviluppo di numerose tecnologie abilitanti. Tra i più significativi, il rilascio da parte di Khronos Group di WebGL (Web Graphic Libraries)²²¹ viene indicato come una delle maggiori svolte.²²² Più in particolare, l’introduzione di questa specifica, basata a sua volta sull’ecosistema OpenGL (Open Graphics Library)²²³, ha permesso di eseguire il rendering di complesse grafiche 3D sfruttando l’accelerazione hardware della GPU all’interno dei moderni browser web senza installare plugin o software aggiuntivo (Scopigno et al. 2017);²²⁴ la messa punto di questo standard API basato su JavaScript²²⁵, ha dato il via alla creazione di una corposa serie di librerie di supporto e framework open source volti a facilitare l’utilizzo di questa specifica per il rendering online dei dati 3D (Potenziani et al. 2018, Boutsis et al. 2019, Champion et al. 2020). Ciò ha favorito a sua volta lo sviluppo di numerosi sistemi destinati alla visualizzazione 3D interattiva in grado di agire sulla pipeline di rendering: da software di basso livello a software di alto livello, da sistemi proprietari a sistemi open-source, da piattaforme commerciali a piattaforme accademiche (Potenziani 2018, Alaoui M’Darhri 2019).²²⁶ Sulla base degli studi esaminati, è possibile in effetti stimare l’esistenza di un insieme molto ricco ed eterogeneo di applicazioni dedicate alla visualizzazione di contenuti tridimensionali.²²⁷ Sebbene le soluzioni sviluppate seguano spesso approcci diversi e siano orientate a soddisfare esigenze specifiche, in generale, la trasmissione dei contenuti su browser deve affrontare una serie di sfide comuni legate ad esempio alla bassa larghezza di banda, che porta a problemi di latenza nel caricamento di dati complessi e l’insufficienza delle risorse hardware, che è solitamente un effetto delle strategie di rendering lato client (Scopigno et al. 2017, Potenziani et al. 2018, Boutsis et al. 2019). Un’ulteriore preoccupazione riguarda inoltre la sicurezza e la protezione delle risorse condivise in rete; sebbene infatti esistano diversi metodi per limitare l’uso non autorizzato delle copie online (come l’apposizione di watermark o filigrane), questi talvolta risultano difficili da applicare alle complesse topologie 3D. La tutela dei diritti di proprietà intellettuale (IPR) spesso, dunque, si affida a espedienti non sempre adatti a soddisfare attività più avanzate, come ad esempio la progettazione o l’editing simultaneo richiesti negli ambienti

²²¹ <https://www.khronos.org/webgl/>

²²² Si vedano ad esempio Champion 2017, Scopigno et al. 2017, Potenziani et al. 2018, Alaoui M’Darhri 2019, Boutsis et al. 2019, Champion 2020, Gaspari et al. 2023.

²²³ <https://www.khronos.org/opengl/>

²²⁴ Più precisamente WebGL si basa su OpenGL ES 2.0, l’API OpenGL sviluppata per dispositivi con risorse di calcolo, spazi di memoria e in generale prestazioni molto limitate; questo rende WebGL già molto ottimizzato dal punto di vista computazionale e in tal senso ideale per l’ambiente web. Potenziani et al. 2018.

²²⁵ <https://Web/JavaScript>

²²⁶ Per una panoramica completa si veda la retrospettiva fornita in Potenziani et al. (2018).

²²⁷ Oltre agli studi citati poco sopra, si vedano anche il report 3D content in European task force (2019) Statham (2019), Storeide et al. (2023).

collaborativi (Potenziani et al. 2018).²²⁸ Dal punto di vista dei metodi di classificazione, i sistemi sviluppati possono essere analizzati secondo molteplici prospettive; uno dei lavori più interessanti a questo proposito è l'approccio adottato in Potenziani et al. (2018), in cui le soluzioni Web3D vengono organizzate secondo una categorizzazione trasversale delle principali funzionalità supportate; queste ultime, vengono raggruppate in cinque macro-aree, riferibili alle caratteristiche ritenute essenziali per la pubblicazione dei contenuti 3D sul web. Dal momento che le componenti individuate, pur facendo riferimento a compiti specifici, agiscono solitamente in sinergia, gli autori organizzano le varie categorie inserendole in una struttura stratificata, in cui i livelli iniziali rappresentano il punto di partenza su cui poi possono via via vanno a sovrapporsi aspetti applicativi di maggiore astrazione, legati ad esempio all'esperienza utente; tali livelli riguardano (Potenziani et al. 2018):

- Gestione dei dati: comprende schemi di rappresentazione, elaborazione e trasferimento adottati per distribuire e renderizzare in modo efficiente i modelli 3D;
- Organizzazione della scena: fa riferimento ai componenti di base come il tipo di struttura e possibilità di personalizzazione della scena come la gestione degli shader;
- Modalità di interazione: include i paradigmi di ispezione, navigazione, interfaccia, modalità di input avanzate;
- Possibilità di integrazione: riguarda le strategie di collegamento con altri contenuti multimediali e implementazione di strumenti di authoring;
- Tipo di pubblicazione: introduce tutti gli aspetti rilevanti per i creatori e gli utenti finali (siano questi sviluppatori o creatori con poca esperienza) come gli obiettivi editoriali e il tipo di licenza (se open source o commerciale ecc..)

Un'altra rassegna cui vale la pena fare riferimento è l'analisi proposta da Statham (2019); sebbene l'autrice prenda in considerazione solo cinque delle innumerevoli piattaforme utilizzate per la visualizzazione 3D, il suo approccio, oltre a essere specificatamente orientato all'ambito del Patrimonio Culturale, fornisce una serie di criteri chiave volti a valutare il rigore scientifico delle soluzioni esaminate. Il metodo utilizzato per individuare tali aspetti si basa su un esame approfondito delle più importanti linee guida promosse a livello internazionale, dalle quali vengono estrapolate ben 32 raccomandazioni provenienti da ICOMOS e UNESCO e ritenute fondamentali per la corretta diffusione di contenuti 3D. Tali raccomandazioni vengono poi condensate in una serie di nove criteri che possono essere utilizzati per verificare l'attendibilità e i principi guida alla base dei sistemi di pubblicazione; più in dettaglio le informazioni che potrebbero aumentare il rigore scientifico della documentazione 3D, secondo lo studio, sono (Statham 2019):

- Composizione del team multidisciplinare: per verificare presenza di un supervisore, esperti o grado di competenza degli operatori;
- Obiettivi: fondamentali per stimare l'uso di strumenti e tecniche appropriate, nonché il livello di dettaglio e "lo stile visivo";
- Documentazione accurata: sia delle fonti storiche che delle decisioni metodologiche;
- Tipo di ricostruzione e livello di certezza: specificando, ad esempio, se si tratta di scansioni oppure ricostruzioni virtuali;
- Autenticità: intesa come capacità di incorporare elementi pertinenti al periodo storico (come suoni ambientali, vegetazione, abitanti ecc..)
- Ipotesi alternative: quando possibile occorre testare e mostrare più ipotesi;

²²⁸ Relativamente ai problemi di pubblicazione relativi ai contenuti 3D, si vedano anche le sfide elencate all'interno del report della task force di Europea (2019).

- Periodi storici: quando possibile, devono essere rappresentati più periodi storici senza privilegiare un unico periodo;
- Uso rispettoso del patrimonio: le visualizzazioni 3D interattive dovrebbero incoraggiare sempre un'esplorazione significativa dei beni rappresentati;
- Coinvolgimento della comunità: quando possibile, le visualizzazioni 3D del patrimonio devono educare il pubblico e promuovere la consapevolezza (in particolare trovando un equilibrio tra il rischio di disperdere il significato e l'opportunità di crearne di nuovi attraverso il coinvolgimento del pubblico);

D'altra parte, anche adottando metodi di classificazione più tradizionali, (basati ad esempio sui termini e i costi di distribuzione), è possibile aggiungere un ulteriore livello di analisi, cercando di offrire un elenco il più possibile completo delle funzionalità che un visualizzatore 3D dovrebbe supportare per garantire esperienze e interazioni più efficaci; lo studio proposto da Champion e Rahman (2020), come già accennato, è uno dei pochi lavori recentemente pubblicati a muoversi in questa direzione.

Sulla base di una revisione della letteratura, gli autori raccolgono una serie di aspetti strettamente connessi alle questioni di "visibilità" e capacità espositiva delle "piattaforme ospitanti". Tali caratteristiche dovrebbero includere la possibilità di (Champion & Rahman 2020):

- zoomare e ruotare per osservare dettagli specifici;
- camminare intorno o attraversare il modello per percepire la relazione con lo spazio;
- aggiungere/rimuovere parti e componenti al fine di rendere maggiormente trasparente la ricostruzione o favorire attività di collaborazione;
- visualizzare il modello in varie condizioni (almeno con texture e in versione wireframe);
- fare screenshot per registrare una particolare prospettiva;
- inserire, annotare informazioni o media (testi/immagini/suoni ecc..) sul modello;
- variare il campo visivo e l'angolo di ripresa;
- effettuare misurazioni su diverse sezioni o parti del modello;
- convertire o scaricare il modello in altri formati oltre quello originale;
- lavorare con timeline che consentano di visualizzare cambiamenti avvenuti nel tempo;
- incorporare il modello in pagine web esterne o in pubblicazioni accademiche;

Ulteriori indicazioni che potrebbero essere prese in considerazione per la valutazione dei sistemi Web3D provengono poi, oltretutto dal già citato lavoro dell'Europeana task force (2019), anche dal più recente report commissionato dalla Commissione Europea per l'avvio dei lavori relativi all'European Collaborative Cloud for Cultural Heritage (Brunet et al., 2022).²²⁹ Tra le numerose questioni affrontate dal rapporto, una significativa attenzione viene rivolta anche ai metodi di visualizzazione e interazione impiegati nella fruizione del patrimonio culturale digitale. Sebbene gli autori non facciano espressamente riferimento ai dati 3D, le indicazioni fornite sembrano rispondere a molte delle esigenze individuate dagli altri studiosi relativamente a questo tipo di contenuti. Ad esempio viene evidenziata l'esigenza di costruire interfacce coerenti per la visualizzazione dei diversi media, includendo molte delle funzioni già elencate da Champion e Rahman (2020) per il 3D, come azioni di zoom, panning, possibilità di interagire con punti di interesse, nonché di esplorare scene

²²⁹ Come precisato nel documento, il Cloud è principalmente una piattaforma progettata per i professionisti dei Beni Culturali: dovrebbe supportare la condivisione dei dati, fornire strumenti digitali che consentano di lavorare in modo cooperativo per facilitare il processo di insight e discovery e dovrebbe consentire di tenere traccia del processo di scoperta (seguendo le direttive della Open Science).

virtuali complesse. In aggiunta a quanto già evidenziato nei precedenti lavori, tra le funzioni di ispezione viene inclusa inoltre la possibilità di sezionare virtualmente la geometria al fine di indagare la forma dell'oggetto o la relazione tra superfici interne ed esterne; viene inoltre fornita una più precisa descrizione delle funzioni che permettono di valutare la fedeltà delle riproduzioni digitali, menzionate già in Stahtam (2019), sottolineando l'importanza di creare strumenti che consentano di valutare l'incertezza delle rappresentazioni digitali attraverso la restituzione di dati numerici o la visualizzazione in falsi colori delle superfici.

Relativamente alle relazioni temporali, oltre all'uso di cursori o timeline, gli autori esprimono la necessità di strumenti in grado di facilitare la comprensione dell'evoluzione nel tempo dei fenomeni rappresentati, in modo da supportare l'identificazione e la misurazione dei cambiamenti. Anche in Storeide et al. (2023) viene infine fornita una panoramica delle caratteristiche di diversi visualizzatori 3D. Tra gli aspetti considerati vi sono attributi generali come "Costo", "Rendering PBR" e "Ispezione delle statistiche degli oggetti", che riporta informazioni sugli oggetti come i numeri di vertici e poligoni. Vengono trattate poi anche funzioni più specificamente rilevanti per il settore CH, come "Measuring Tool" e "Peer Review" (Storeide et al. et al. 2023). Oltre agli aspetti messi in luce dagli studi appena discussi e le classificazioni adottate dai diversi ricercatori, un'ulteriore categorizzazione comunemente utilizzata per descrivere i vari sistemi di pubblicazione delle risorse digitali è rappresentata dal tipo di servizio offerto per l'hosting dei contenuti. Secondo questa prospettiva, le piattaforme e i servizi che permettono la visualizzazione dei contenuti 3D possono essere suddivisi in:²³⁰

- Service Platform: si tratta di piattaforme che generalmente accettano e forniscono un'ampia gamma di formati 3D e ospitano contenuti su sistemi di archiviazione basati su cloud con connettività ad alta velocità e visualizzatori web-browser; generalmente offrono funzioni di movimento e manipolazione basilari, come zoom, pan, rotation, e tendono a standardizzare l'esperienza degli utenti. Spesso impongono limiti di caricamento e richiedono versioni molto ottimizzate per eseguire correttamente i contenuti.
- Self-hosting viewers: a differenza delle soluzioni service platform, non offrono servizi di hosting e richiedono un'alta connettività da parte del repository ospitante. D'altra parte, in questo modo, è possibile eliminare i vincoli legati alle dimensioni del modello. Trattandosi solitamente di framework modulari possono essere personalizzati implementando controlli e interfacce diverse.

Per quanto riguarda la prima categoria, le piattaforme più frequentemente citate sono Sketchfab, Visual Media Service²³¹, p3d²³², TurboSquid²³³, MyMiniFactory²³⁴ e ShareCG²³⁵; al secondo gruppo appartengono invece soluzioni come 3DHOP²³⁶, Aton²³⁷, Potree²³⁸, Smithsonian

²³⁰ European Task Force Report (2019).

²³¹ <https://visual.ariadne-infrastructure.eu/>

²³² <https://p3d.in/>

²³³ <https://www.turbosquid.com/>

²³⁴ <https://www.myminifactory.com/>

²³⁵ <https://www.sharecg.com/>

²³⁶ <https://3dhop.net/>

²³⁷ <https://osiris.itabc.cnr.it/aton/>

²³⁸ <https://potree.github.io/>

Voyager Explorer and Authoring.²³⁹ Tra questi, Sketchfab e 3DHOP sembrano essere i sistemi più noti e vengono infatti menzionati in quasi tutti gli studi esaminati.²⁴⁰

1.2 Service Platform

Sketchfab viene riconosciuta come la piattaforma commerciale di maggior successo, anche per quanto riguarda i progetti legati al Patrimonio Culturale (Scopigno et al. 2017, Scopigno 2021, Storeide et al. et al. 2023, Barzaghi et al. 2024). Si tratta infatti di uno dei viewer supportati da Europeana e ormai da diversi anni, l'azienda ha creato una sezione interamente dedicata alle collezioni culturali provenienti sia da professionisti che appassionati (Scopigno et al. 2017). Le ragioni della sua grande diffusione si devono probabilmente alla semplicità d'uso ma anche all'efficienza dei servizi di hosting; tuttavia, sebbene alcuni la includano tra i repository dedicati al 3D (Champion & Rahaman 2020) come accennato in precedenza, potrebbe non essere la soluzione migliore per la conservazione affidabile dei file.

Allo stesso tempo, nonostante la sua efficacia in termini di “pubblico” sia ormai ben riconosciuta, diversi autori sostengono che sia poco adatta anche per la visualizzazione dei modelli prodotti nell'ambito del Patrimonio Culturale, spesso creati per essere esplorati in tutti i loro dettagli. Per ottimizzare i tempi di trasmissione, infatti, Sketchfab utilizza un metodo di compressione con perdita di dati durante il trasferimento della geometria e la resa dei particolari è solitamente affidata alle texture associate; il processo di conversione viene dunque eseguito sul server della piattaforma in un formato proprietario ottimizzato per il rendering. Questo approccio se da un lato aumenta il grado di automazione, rendendo il processo di pubblicazione molto più semplice, dall'altro può dar luogo a riproduzioni molto semplificate che compromettono in definitiva l'integrità del modello (Scopigno et al. 2017, Potenziani et al. 2018).

Per quanto riguarda gli strumenti di navigazione ed esplorazione, l'impossibilità di configurare la presentazione dei dati in modo flessibile viene percepita come uno dei principali limiti (Boutsi et al. 2023). In effetti, seppure il viewer della piattaforma permetta di eseguire la maggior parte delle funzioni ritenute essenziali (Brunet et al. 2022, Champion & Rahaman 2020), e offra uno strumento di ispezione (“Model Inspector”) che consente di scegliere alcuni metodi di shading predefiniti, come accennato in precedenza, le modalità di interazione risultano piuttosto limitate. Il problema maggiore forse, come si nota in Storeide et al. (2023), è che all'interno di queste piattaforme spesso le ricostruzioni create a fini ricreativi possono confondersi con quelle prodotte a fini di studio e ricerca, tanto che potrebbe essere difficile per un occhio non esperto distinguere una riproduzione rigorosa da una basata su parametri del tutto individuali; come suggeriscono gli autori, sarebbe pertanto opportuno ricercare approcci che permettano di comunicare più chiaramente questa differenza, anche ai non esperti (Storeide et al. et al. 2023). D'altra parte, Sketchfab permette di riprodurre e controllare animazioni, integrando inoltre un sistema per l'attivazione della modalità VR.

²³⁹ <https://smithsonian.github.io/dpo-voyager/> Sebbene la classificazione basata sulle modalità di hosting possa risultare utile, occorre precisare che si tratta solo di una ripartizione approssimativa poiché, come ben illustrato in Potenziani et al. (2018), le soluzioni sviluppate per la visualizzazione di contenuti 3D compongono un quadro molto eterogeneo, in cui spesso risulta difficile, se non impossibile, creare categorie “impermeabili” (Potenziani et al. 2018); come precisato in Storeide et al. (2023) esistono molti mezzi per visualizzare digitalmente i dati 3D, che vanno dai framework Javascript ai motori di gioco; inoltre non di rado alcune soluzioni vengono progettate ad hoc per alcuni casi o formati specifici (Storeide et al. 2023). Tale condizione è del resto confermata dalla grande variabilità dei criteri di selezione adottati dalla letteratura di riferimento, dove ogni autore include spesso soluzioni molto diverse a seconda della prospettiva adottata. Si confrontino ad esempio Scopigno et al. (2017), Statham (2019), Europeana Task Force (2019), Boutsi et al. (2019), Alaoui M'Darhri et al. (2019), Champion & Rahaman (2020), Fanini et al. (2021), Brunet et al. (2022), McAvoy et al. (2023), Gaspari et al. (2023), Storeide et al. (2023), Barzaghi et al. (2024).

²⁴⁰ Si veda la nota precedente.

Infine si tratta di una delle poche piattaforme a fornire un'ID per i modelli caricati (Champion & Rahaman 2020, Barzaghi et al. 2024); in questo modo, ad esempio, è possibile collegare gli assets alle relative pubblicazioni e soprattutto alla documentazione prodotta durante le elaborazioni, come report o fogli di calcolo.²⁴¹

Sul versante open-source, Visual Media Service, sviluppato dal Laboratorio di Visual Computing dell'Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Informazione (CNR-ISTI) nell'ambito dei progetti comunitari ARIADNE e PARTHENOS, rappresenta probabilmente una delle poche soluzioni paragonabili a Sketchfab per quanto riguarda la semplicità di caricamento dei dati (Alaoui M'Darhri et al. 2019, Brunet et al. 2022). A differenza di quest'ultimo, tuttavia, si tratta di un servizio progettato per favorire la condivisione non solo di contenuti 3D ma più in generale di "assets multimediali complessi" e per cui, in precedenza, non erano ancora disponibili canali di distribuzione adeguati (come ad esempio file RTI - Reflection Transformation Images). Come illustrato dagli autori, il servizio permette agli utenti di caricare i propri file in autonomia lasciando che i dati vengano adattati all'ambiente web attraverso metodi di codifica multi-risoluzione e streaming progressivo. Una volta terminata l'elaborazione viene infine trasmesso l'URL dell'assets pubblicato. In alternativa, per gli utenti più esperti, queste pagine web di base possono essere il punto di partenza per lo sviluppo di visualizzazioni più complesse, o per l'integrazione di questa visualizzazione in siti web esistenti (Ponchio et al. 2016). Visual Media Service cerca inoltre di garantire, insieme al trasferimento efficiente dei dati, anche una visualizzazione di alta qualità basata sul motore di rendering multi-risoluzione Nexus²⁴², già implementato nel framework 3DHOP, di cui si discuterà poco più avanti (Ponchio et al. 2016, Scopigno et al. 2017, Alaoui M'Darhri et al. 2019). Relativamente alla presentazione visiva, il servizio fornisce un'interfaccia molto semplice con comandi di base; tuttavia, a differenza di Sketchfab, sono disponibili strumenti per la misurazione e la creazione di sezioni, utili a isolare le porzioni di interesse.

1.3 Framework e self-hosting viewers

Prima del rilascio di Visual Media Service, il laboratorio del CNR-ISTI ha lavorato allo sviluppo del framework 3DHOP, acronimo di 3D Heritage Online Presenter, un sistema progettato per soddisfare esigenze specifiche del settore dei Beni Culturali (Potenziani et al. 2015). Si tratta più in particolare di un framework open-source scritto in JavaScript e basato sulla libreria SpiderGL²⁴³, una libreria di supporto per lo sviluppo di applicazioni grafiche 3D sul web a sua volta basata sull'API WebGL (Di Benedetto et al. 2010).

Uno dei punti di forza che rendono questa soluzione particolarmente interessante risiede nella sua capacità di lavorare con mesh o nuvole di punti estremamente complesse (decine di milioni di triangoli/vertici e oltre) (Scopigno et al. 2017); come accennato, ciò è reso possibile dall'approccio multirisoluzione usato da Nexus, una libreria di visualizzazione che appartiene agli algoritmi basati su cluster e dipendenti dalla vista (Ponchio et al. 2015, Potenziani et al. 2015). Questo approccio permette di dividere il modello in patch che vengono unite al volo a seconda dell'orientamento e della distanza di visualizzazione, permettendo di trasferire solo la parte dei dati necessaria. In questo modo

²⁴¹ Si vedano ad esempio alcuni dei modelli pubblicati dall'associazione spagnola AD&D 4D (Association for the Documentation and Diffusion 4D) per i quali gli autori hanno reso disponibili i report prodotti dal software di elaborazione Metashape Pro. Villanueva et al. (2022) <https://doi.org/10.5281/zenodo.7350833>

²⁴² <https://vcg.isti.cnr.it/vcgtools/nexus/> Più precisamente, Nexus è una raccolta di strumenti per la visualizzazione in streaming di modelli 3D di grandi dimensioni in OpenGL (C++ e Javascript). Il pacchetto supporta nuvole di punti e mesh con attributi per vertice e memorizza le texture internamente; per un approfondimento si vedano Ponchio-Dellepiane (2015), Potenziani et al. (2015).

²⁴³ <https://github.com/dibenedetto/SpiderGL>

è possibile caricare in pochi secondi un modello a bassa risoluzione, che tuttavia viene progressivamente migliorato in base alle interazioni dell'utente. Si tratta di un metodo molto utile anche per quanto riguarda il trasferimento dei dati su una rete lenta, poiché tali dati verranno trasferiti in piccoli blocchi riducendo il carico di rete. Un altro elemento chiave di 3DHOP è che, pur usando uno stile dichiarativo per definire la scena, fornisce funzioni JavaScript che consentono di far interagire i componenti di 3DHOP con il resto della logica della pagina web.²⁴⁴ In questo modo gli sviluppatori hanno a disposizione una serie di componenti di base con cui possono creare visualizzazioni interattive personalizzabili.²⁴⁵ Tra le piattaforme che seguono una filosofia molto simile a quella di 3DHOP, adottando un approccio modulare e configurabile in base alle esigenze, è possibile includere anche ATON, un framework inizialmente sviluppato dal Digital Heritage Innovation Lab (DHILab) del CNR-ISPC nell'ambito del progetto europeo ARIADNE per la visualizzazione sul web di grandi paesaggi 3D (Fanini et al. 2021).

L'architettura del framework, altamente scalabile e flessibile, permette adattamenti a un'ampia serie di sistemi hardware, dai dispositivi mobili fino ai PC nelle reti locali; inoltre può essere implementato in tutti i servizi cloud che supportano Node.js.²⁴⁶ La sua infrastruttura di base consiste in un Deployment Node (DN), che può essere una macchina virtuale o fisica, attraverso cui vengono distribuiti contenuti o applicazioni a un gran numero di utenti; grazie a Node.js infatti, il sistema riesce a gestire in modo efficiente molte connessioni simultanee, distribuendo il carico di servizi su diversi nodi. Una caratteristica peculiare del framework è la distinzione tra i concetti di "collezione" e "scena". Le collezioni possono comprendere vari tipi di contenuti come panoramiche e modelli 3D, mentre le scene dispongono i vari elementi delle collezioni in modo organizzato, in modo simile al sistema basato su livelli adottato in motori di gioco come Unreal Engine. Ad ogni scena inoltre viene assegnato un identificatore univoco (Scene-ID). Grazie a questa configurazione è possibile creare facilmente nuovi contenuti senza duplicare le risorse, nonché creare riferimenti incrociati con set ospitati su altri server. Come sistema di rendering viene utilizzato principalmente Three.js²⁴⁷, a sua volta basata sui principi del workflow PBR (Physically Based Rendering) e in grado pertanto di simulare proprietà fisiche in modo realistico (Anghelută et al. 2023).

Per quanto riguarda invece il sistema di navigazione, ATON permette di attivare diverse modalità a seconda della tipologia del dispositivo adottato: modalità orbita (default), modalità in

²⁴⁴ Lo stile dichiarativo e lo stile imperativo rappresentano due principali paradigmi per lo sviluppo di applicazioni Web, con il secondo supportato dall'introduzione di WebGL in HTML5 (Potenziani et al. 2015). Sebbene entrambe le tecniche consentano la creazione, la modifica, la condivisione e l'esperienza interattiva della grafica 3D sul Web, esse differiscono per l'approccio di base e per gli utenti a cui si rivolgono. Mentre l'approccio dichiarativo sfrutta il DOM dell'HTML per fornire l'accesso agli oggetti 3D di alto livello (più familiare agli sviluppatori web), l'approccio imperativo utilizza linguaggi di scripting per offrire l'accesso alle funzionalità di basso livello della fase di rendering (più comune per gli sviluppatori di computer grafica) (Potenziani et al. 2018). Il DOM (Document Object Model), come definito in Jankowski et al. (2013) è un'interfaccia indipendente dalla piattaforma e dal linguaggio che consente a programmi e script di accedere e aggiornare dinamicamente il contenuto, la struttura e lo stile dei documenti Web. Poiché il DOM fornisce l'accesso alle azioni dell'utente (ad esempio, la pressione di un tasto o il clic di un pulsante del mouse), dovrebbe essere utilizzato anche come interfaccia principale per interagire con i contenuti 3D. Jankowski et al. (2013)

²⁴⁵ Per un approfondimento sulle funzioni di 3DHOP si vedano Potenziani et al. (2015), Scopigno et al (2017), Potenziani et al. (2018).

²⁴⁶ Node.js (<https://nodejs.org/en>) è una piattaforma runtime costruita sul motore JavaScript, progettata per creare applicazioni scalabili e veloci; in particolare consente di migliorare le prestazioni di applicazioni web che richiedono la gestione di file pesanti e carichi di rete elevati. Shah et al. 2017. Node.js vengono offerte solitamente API REST per eseguire attività lato server o consentire una facile integrazione con servizi o piattaforme esterne. Fanini et al. 2021.

²⁴⁷ Three.js è una libreria di programmazione JavaScript che semplifica e snellisce il processo di lavoro con WebGL, rendendolo più accessibile agli sviluppatori (Anghelută et al. 2023); dal momento che la programmazione di WebGL direttamente da JavaScript per creare e animare scene 3D è un processo molto complesso e soggetto a errori, questa libreria di supporto permette di semplificare alcune procedure, come: la creazione di geometrie complesse, animazioni all'interno delle scene, applicazione di texture e materiali, caricamento di oggetti da software di modellazione 3D. Dirksen 2013

prima persona, modalità di orientamento del dispositivo e modalità di navigazione in Virtual Reality (VR) (Fanini et al. 2021). Tra queste, la modalità di orientamento, che consente di accedere ai sensori integrati nel dispositivo per controllare la telecamera virtuale, e quella in VR rappresentano delle significative implementazioni per quanto riguarda la fruizione interattiva del Patrimonio Culturale. Un ulteriore contributo risiede inoltre nella possibilità di collaborare con altri utenti in tempo reale; il framework fornisce infatti un sistema progettato per il settore dei Beni Culturali (VRoadcast) associato a un ID di sessione e basato sul protocollo web-socket.²⁴⁸ Durante le sessioni gli utenti possono interagire anche attraverso i microfoni integrati nei vari dispositivi, trasmettere contenuti video o ancora, il proprio punto di vista (focus streaming) concentrando l'attenzione su un particolare punto di interesse (Fanini et al. 2021). Sebbene alcuni degli strumenti descritti supportino anche il rendering di nuvole di punti, negli ultimi anni sono emerse delle soluzioni specificatamente dedicate alla visualizzazione di questo tipo di rappresentazioni. Uno degli esempi più noti è Potree (Schütz, 2016), un sistema web3D open-source, sviluppato per supportare la pubblicazione di grandi dataset georeferenziati come quelli prodotti dalle tecniche reality-based (Gaspari 2023). Si tratta di un framework interessante poiché rappresenta uno delle poche ricerche mirate alla presentazione di dati grezzi (o non necessariamente ottimizzati). Dal punto di vista delle tecniche di rendering, vengono utilizzati anche in questo caso algoritmi di multirisoluzione octree-based che permettono di visualizzare solo i punti necessari a seconda della distanza e dell'angolazione della camera (Schütz, 2016, Potenziani et al. 2018).²⁴⁹

In riferimento alle possibilità di interazione, il sistema offre gran parte delle funzioni già introdotte in altre soluzioni come l'aggiunta di annotazioni, accompagnate da immagini e link, o il calcolo di distanze point-to-point e la misurazione di aree e volumi. Trattandosi di un sistema orientato alla visualizzazione di point cloud, Potree, consente inoltre di filtrare la ricostruzione adottando sistemi basati ad esempio sulla classificazione dei punti. Occorre aggiungere che al fine di visualizzare meglio le caratteristiche del dataset, il framework supporta anche diverse modalità di colorazione basate ad esempio su parametri legati all'elevazione o all'intensità dei valori (Schütz, 2016). Sebbene non sia un sistema specificatamente progettato per il settore dei beni culturali, alcuni autori l'hanno scelto al fine di valutare le sue potenzialità "narrative"; come riportato in Gaspari et al. (2023), la struttura di base del visualizzatore comprende una barra laterale con diverse sezioni predefinite che contengono strumenti e controlli di misurazione, aspetto dell'oggetto e filtri. Il sistema supporta inoltre la visualizzazione delle immagini orientate, consentendo in questo modo di documentare e raccontare il processo di acquisizione eseguito sul campo. Come evidenziato in McAvoy (2023) le nuvole di punti sono un formato di visualizzazione ideale per l'anteprima dei dati, in quanto possono essere caricate rapidamente sui visualizzatori web e mostrano i dati così come sono (senza interpolare una geometria approssimativa sugli spazi vuoti). Gli autori, tuttavia, sottolineano il ricorso a una modalità di conversione in formato LAS/LAZ poco adatto a mantenere la struttura nativa dei dati lidar terrestri (McAvoy et al. 2023).

Infine, anche se si tratta in realtà di uno dei primi strumenti sviluppati per portare il 3D nel web, vale la pena menzionare X3DOM, lanciato nel 2009 per facilitare l'integrazione del formato X3D nelle applicazioni web (Behr et al. 2009). Come accennato, prima del rilascio di WebGL mancava un vero e proprio standard per la pubblicazione di grafica 3D online; un lavoro seminale in questa direzione è stato lo sviluppo dello standard Virtual Reality Modeling Language (VRML), proposto come formato logico di markup per la VR indipendente da piattaforme non proprietarie; in questo formato gli elementi fondamentali della scena virtuale venivano descritti per mezzo di semplici

²⁴⁸ L'API WebSocket <https://developer.mozilla.org/> consente di aprire una sessione di comunicazione interattiva bidirezionale tra il browser dell'utente e un server. In questo modo è possibile inviare messaggi a un server e ricevere risposte senza dover eseguire il monitoraggio del server per ottenere una risposta.

²⁴⁹ Si tratta di un metodo basato su una struttura ad albero e che consente di suddividere lo spazio tridimensionale in otto parti uguali e organizzare i dati in modo gerarchico (Schütz, 2016).

campi di testo che potevano avere degli attributi per definire proprietà specifiche (Raggett 1994). Nel 2004 VRML è stato sostituito da X3D, definito come uno standard aperto esente da royalty e un'architettura run-time per rappresentare e comunicare scene e oggetti 3D interattivi utilizzando XML. Per estendere il supporto dei browser per X3D, è stato proposto X3DOM un sistema dichiarativo libero da plug-in, in grado di integrare i nodi X3D direttamente nel contenuto DOM. Definendo un namespace XML e utilizzando uno speciale componente connettore, X3DOM cerca di integrare gli standard web in HTML e X3D, costruendo una sorta di ponte che consente di manipolare il contenuto 3D aggiungendo, rimuovendo o modificando gli elementi del DOM (Behr et al. 2010, Potenziani et al. 2018).

2. Nuovi approcci per l'esplorazione "verticale" degli oggetti acquisiti con tecniche image-based

Come risulta dall'esame degli strumenti finora descritti, l'intento di portare l'oggetto o le scene 3D in un ambiente web ben integrato con altri elementi multimediali, rappresenta uno dei primi obiettivi perseguiti dagli sviluppatori. Ancora oggi, nell'ambito dei progetti dedicati al Patrimonio Culturale, assistiamo a un significativo sforzo di creare sistemi che consentano il collegamento transmediale delle informazioni associate a diversi oggetti culturali. In un recente studio Scopigno (2021) si concentra sull'analisi di questi approcci, sottolineando l'importanza di utilizzare i diversi media in modo sinergico per aumentare la portata degli strumenti di visualizzazione e di comunicazione adottati per la fruizione pubblica del Patrimonio Culturale (Scopigno et al. 2021).

Lo sforzo di interconnettere dati di diversa natura all'interno di un unico sistema di interazione è del resto ben documentato anche dai numerosi prototipi sviluppati nell'ambito dell'Heritage Building Information Modeling (HBIM).²⁵⁰ Riprendendo le classificazioni proposte negli studi relativi alle tecniche Info-Vis per il Patrimonio Culturale, si potrebbe dunque affermare che l'attenzione si è concentrata soprattutto sulla messa a punto di "approcci orizzontali", intendendo questi ultimi come metodi volti a creare elaborati sistemi di navigazione integrata di dati multimodali (Windhaget et al. 2019, Boutsis et al. 2019). D'altra parte non si registrano altrettanti sforzi per aumentare le possibilità di "immersione verticale" delle rappresentazioni tridimensionali prodotte attraverso le tecnologie digitali. Da questo punto di vista le possibilità di interazione e immersione in contesti VR permesse da framework come ATON, rappresentano certamente uno dei maggiori progressi nell'ambito delle tecniche di visualizzazione del Patrimonio Culturale.

Sebbene tali approcci costituiscano un grande passo avanti rispetto a sistemi Web3D più consolidati, al fine di promuovere una più estesa comprensione dei processi adottati per la raccolta dei dati, potrebbe essere necessaria la messa a punto di metodi di visualizzazione che vadano oltre la superficie degli artefatti digitali. In tal senso, le possibilità di ispezione basate sull'osservazione di vertici e poligoni o sulla variazione dell'aspetto tramite shader o tecniche di illuminazione potrebbero

²⁵⁰ L'adozione del Building Information Modelling (BIM), è iniziata nei primi anni 2000, ma solo all'inizio del decennio precedente la tecnologia ha cominciato a diffondersi e a essere utilizzata anche per gli edifici e i monumenti storici (Historic Building Information Modelling/HBIM) (Koutros et al. 2023). L'H-BIM persegue la modellazione e la documentazione di elementi architettonici, secondo tipologie artistiche, storiche e costruttive. L'H-BIM è considerato una speciale libreria di oggetti parametrici BIM che è stata specificamente progettata per preservare e gestire il patrimonio culturale nel quadro generale dello "smart heritage". In genere, la libreria H-BIM è costruita utilizzando manoscritti e documentazione architettonica storica, scansioni laser, tecniche fotogrammetriche e altri dati ottenuti dall'analisi fisica dell'edificio in questione (Lopez 2018). Per quanto riguarda i progetti basati su HBIM condotti negli ultimi anni esiste una vastissima letteratura; si veda ad esempio l'approccio olistico basato su sistemi GIS proposto in Brumana et al. (2019), l'integrazione della tecnologia BIM con le piattaforme di sviluppo basate su eXtended Reality (XR) sviluppato da Banfi et al. (2022), o il sistema in cloud "BIMLegacy" progettato da Palomar et al. (2020) per facilitare la collaborazione dei diversi stakeholder coinvolti nei progetti di restauro dei beni architettonici; la piattaforma online sviluppata in questo caso ha inoltre l'obiettivo di rendere tutta la documentazione prodotta dagli esperti anche a un pubblico più ampio (Palomar et al. 2020).

non essere sufficienti. Oggi il settore dei Beni Culturali si trova al centro di numerose ricerche innovative; come evidenziato dalle più recenti linee guida e studi redatti a livello nazionale e internazionale, occorre sviluppare nuove strategie di engagement al fine di rispondere alle esigenze del pubblico contemporaneo e favorire così il riuso delle rappresentazioni prodotte in ambito scientifico. Più in particolare gli aspetti evidenziati nel PND sembrano andare in questa direzione promuovendo la realizzazione di sistemi “user-centered design” capaci di generare nuove visioni del patrimonio culturale attraverso linguaggi inediti e rinnovate forme di documentazione della cultura materiale e immateriale.²⁵¹

D'altra parte, come già accennato nel report redatto per l'European Collaborative Cloud for Cultural Heritage (2022) viene posta particolare attenzione agli aspetti legati alla trasparenza e alla corretta interpretazione della documentazione digitale prodotta; come sottolineato dagli autori del rapporto, la comprensione delle enormi quantità di dati acquisiti richiede una rappresentazione e una visualizzazione congiunta dei dati stessi e della loro incertezza, poiché l'assenza di queste informazioni può portare a interpretazioni errate, a misurazioni sbagliate del modello e, nella maggior parte dei casi, alla mancata comprensione di ciò che viene trasmesso. In tal senso, secondo il report uno dei principali obiettivi da perseguire riguarda la creazione di modelli misurabili, in grado di codificare attributi e informazioni sull'incertezza locale (Brunet et al. 2022). Sulla base delle indagini sin qui svolte, non si registrano tentativi di offrire una visione degli errori generati con tecniche reality-based. Vi sono infatti ancora pochi studi orientati a esprimere in modo chiaro l'incertezza delle riproduzioni virtuali; tra questi vanno menzionati i diversi lavori prodotti nel contesto della ricostruzione architettonica, come esemplificato dal caso di studio dedicato all'ipotetica ricostruzione di Piazza delle Erbe a Verona. In questo lavoro, l'incertezza viene valutata e visualizzata applicando una delle viste in falsi colori aggiornata in base alla disponibilità, alla paternità, al tipo, alla qualità e alla quantità delle fonti utilizzate, che può essere applicata a tutte le caratteristiche di un modello 3D prodotto su scala urbana valutando geometria, sistema costruttivo, aspetto superficiale e posizione (Apollonio et al. 2024). Ma come suggerito in questo stesso studio c'è ancora molto lavoro da fare per sistematizzare le pratiche di documentazione dei processi di ricostruzione.

Come evidenziato in Brunet et al. (2022) un ulteriore passo che potrebbe essere utile compiere riguarda la ricerca di metodi di rappresentazione dell'incertezza locale che possano risultare intelleggibili anche a una comunità più ampia (Brunet et al. 2022). In effetti, sebbene tutte le “congetture” possano essere perfettamente documentate, il rischio che lo spettatore occasionale incorra in un'interpretazione errata davanti a una resa fotorealistica è molto alto (Münster et al. 2024). Anche dal punto di vista delle ricerche condotte nell'ambito dell'Info-Vis tali aspetti risultano fondamentali; i principi di criticità e incertezza esprimono a tal proposito la necessità di rappresentazioni in grado di aumentare le competenze di alfabetizzazione critica (sui dati e sulla visualizzazione) da parte degli utenti. Tali principi suggeriscono di non rendere invisibili le incertezze o i “rifiuti”, favorendo al contrario il riconoscimento dell'imprecisione che caratterizza le visualizzazioni create nel contesto del Patrimonio Culturale Digitale (Windhager et al. 2019). Facendo ancora riferimento ad alcune riflessioni espresse in Storeide et al. et al. (2023) la valutazione dei risultati dei progetti 3D è quindi ancora molto soggettiva nel campo del Cultural Heritage (CH); per questa ragione gli strumenti di valutazione numerica su variabili oggettive e statistiche dovrebbero essere una priorità per il settore nei prossimi anni, in modo che la variabilità del 3D possa essere quantificata almeno nelle dimensioni più ricorrenti (Storeide et al. et al. 2023). Alla luce dei risultati delle ricerche sin qui riferiti, risulta dunque opportuno compiere un ulteriore sforzo verso la presentazione di risultati che permettano di raggiungere una più ampia consapevolezza sui processi di digitalizzazione eseguiti per la rappresentazione 3D del Patrimonio Culturale. Per quanto riguarda ad esempio le ricostruzioni basate su immagini diversi software permettono, non solo di esportare un report completo del processo di ricostruzione, ma anche dati che illustrano la distribuzione di questi

²⁵¹ Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale (2022).

errori e permettono di avere un'idea complessiva dell'accuratezza delle elaborazioni.²⁵² Tali rappresentazioni potrebbero essere utilizzate quali metadati grafici in accompagnamento a quelli testuali/numerici e consentirebbero di estendere la comprensione degli artefatti anche a utenti che non rientrano nella comunità designata ma che potrebbero beneficiare di queste informazioni; ciò favorirebbe un uso più consapevole anche da parte degli utenti non esperti e che però potrebbero essere interessati a valutare l'accuratezza di una ricostruzione prima di effettuare il download.

Più in particolare le rappresentazioni grafiche degli errori potrebbero arricchire la documentazione fornita supportando la comprensione delle visualizzazioni, offrendo uno sguardo più critico, potrebbero aumentare l'inclusività e incoraggiare un uso creativo basato su queste visualizzazioni inedite. Sarebbe interessante, a tal proposito, poter includere queste informazioni direttamente all'interno dei modelli esportati in modo da favorire nuove forme di osservazione e incoraggiare visualizzazioni al contempo meno diffuse e più trasparenti degli oggetti acquisiti con tecniche image-based. Come riportato all'inizio della discussione, infatti, queste procedure hanno ormai raggiunto una comunità molto ampia e spesso inconsapevole dei processi di propagazione degli errori che spesso caratterizzano le ricostruzioni fotogrammetriche.

La convergenza ormai raggiunta nell'ambito dei sistemi di acquisizione image-based necessita pertanto di strategie che possano rendere maggiormente trasparenti le rappresentazioni prodotte tramite l'uso di software e applicazioni sempre più performanti; ciò consentirebbe di aumentare la consapevolezza degli utenti più inesperti (siano questi "creatori" o semplici fruitori) e andare oltre l'apparente realismo delle rappresentazioni trasmesse.

2.1 Test eseguiti e sviluppi futuri

Anche se la maggior parte dei software non rende pubblici gli algoritmi utilizzati per il processamento delle immagini, generalmente tali applicazioni consentono comunque di controllare la precisione e l'accuratezza delle elaborazioni fornendo una stima dei residui calcolati in fase di allineamento. Nel caso di Metashape, una prima serie di valori che è possibile verificare riguarda i parametri relativi alla calibrazione della camera regolati dal software; sulla base delle indicazioni fornite dagli sviluppatori, se alcuni di questi parametri, come quelli relativi alle coordinate del punto principale o quelli di distorsione assiale (cx, cy, b1, b2), presentano valori di centinaia o più pixel, ciò potrebbe significare che la stima di tali parametri è probabilmente errata.²⁵³ Oltre alle informazioni testuali, il programma mette a disposizione anche una serie di strumenti di analisi visiva che consentono di valutare l'entità delle distorsioni ottiche introdotte dalla fotocamera; nella prima scheda del pannello "Distorsion plot" la magnitudine degli errori in pixel per ogni punto misurato nelle immagini viene rappresentata attraverso dei vettori colorati che indicano la direzione e simultaneamente l'intensità dei residui che il software ha calcolato sulla base del modello pin-hole.²⁵⁴ Le rappresentazioni visive, se ben costruite, possono essere utili non solo per percepire più rapidamente le informazioni, ma anche per elaborare più informazioni contemporaneamente (Mazza 2009). In questo caso, dunque, l'uso di proprietà grafiche come colore, dimensioni e direzione delle linee permette di avere una visione d'insieme in grado di trasmettere un'idea più concreta della qualità delle regolazioni eseguite dal software. D'altra parte l'assenza di una scala cromatica che consenta di

²⁵² Si fa riferimento ad esempio al calcolo della matrice di covarianza all'interno del software Metashape Pro di cui si è parlato nel primo capitolo e che consente di valutare visivamente il grado di precisione dell'oggetto ricostruito.

²⁵³ Si veda a tal proposito <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000158119-what-does-camera-calibration-results-mean-in-metashape->

²⁵⁴ Occorre precisare che è possibile selezionare altri modelli oltre quello ideale; in Metashape ad esempio è possibile scegliere anche il modello Fisheye.

interpretare correttamente l'associazione dei colori potrebbe rivelarsi problematica (Fig. 20); sebbene infatti l'applicazione utilizzi un ordinamento convenzionale basato sulle tonalità del rosso, del giallo e del verde per indicare il progressivo miglioramento della qualità delle regolazioni, le connotazioni basate sul colore non possono essere decodificate in modo "universale" (Munzner 2014).

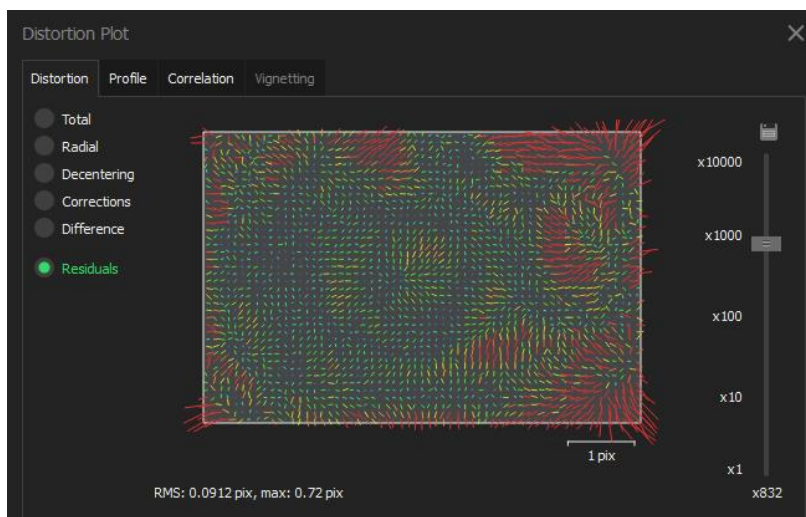


Fig. 20 - Residui calcolati da Metashape per il caso della Torre Est della Rocca di Riolo Terme

Un'ulteriore rappresentazione fornita all'interno del software, in seguito all'allineamento delle immagini, è quella relativa alla varianza dei punti di legame che, come già accennato, offre la possibilità di valutare la loro dispersione rispetto a un valore medio di riferimento (Remondino et al. 2017); seppure essa non fornisca direttamente una stima della precisione, per cui è preferibile adottare metriche come la deviazione standard (Granshaw 2020), tale visualizzazione può tuttavia suggerire il grado di correlazione tra i parametri, consentendo di percepire la distribuzione generale delle deviazioni.²⁵⁵ In questo caso, inoltre, Metashape fornisce anche una scala cromatica che consente di interpretare il codice utilizzato per mappare le deviazioni, associando alle tonalità più calde le misurazioni caratterizzate da una maggiore incertezza e andando via via a rappresentare i punti più stabili con colori che vanno dal verde al blu.

Al fine di produrre output 3D capaci di offrire un maggior grado di indagine visiva all'interno delle piattaforme di condivisione attualmente esistenti, si sono pertanto effettuati alcuni test per verificare la possibilità di esportare anche questo tipo di visualizzazione. Nonostante il software consenta di scegliere tra diversi formati per l'esportazione della nuvola di punti, si sono presi in considerazione in prima istanza quelli più ampiamente adottati all'interno dei sistemi di visualizzazione 3D, nonché quelli più frequentemente citati dalla letteratura di riferimento (Potenziani et al. 2015, Schuetz 2016, VIGIE 2020/654).

Per quanto riguarda la rappresentazione di nuvole di punti, ad esempio, alcuni formati ricorrenti sono .las/laz, .E57, .ply (Polygon File Format).²⁵⁶ Di questi il formato .ply, sviluppato negli anni '90 da alcuni ricercatori dello Stanford Computer Graphics Laboratory, consente la registrazione di un buon numero di proprietà tra cui colore, trasparenza e valori di affidabilità dei dati ("range data confidence"), mantenendo una descrizione relativamente semplice dell'oggetto (Turk 1994, VIGIE

²⁵⁵ Si veda la voce "Covariance matrix" del manuale [Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 1.7](#)

²⁵⁶ Per una panoramica sui formati dei file si in particolare l'allegato 3 del rapporto VIGIE/2020 in cui vengono presentati tutti gli standard utilizzati nell'ambito della documentazione, archiviazione, presentazione e conservazione digitale del Patrimonio Culturale; per quanto riguarda la codifica degli oggetti 3D, la tabella prodotta dagli autori elenca un totale di 125 formati.

2020/654). Esistono due versioni del formato, una in ASCII basata su una rappresentazione testuale leggibile dall'uomo, e l'altra in binario, più compatta, che permette un salvataggio e un caricamento più rapidi. La struttura tipica del file contiene un'intestazione in cui vengono definiti gli elementi e le proprietà associate al file, un elenco di triple (x, y, z) per descrivere i vertici e gli indici dei vertici per ogni faccia; è inoltre possibile definire elementi e proprietà personalizzati (Turk 1994). Le coordinate di ogni vertice vengono rappresentate come valori "float", in grado dunque di registrare misure con una parte decimale e garantire una maggiore precisione del modello grafico.

```
comment this file is a cube
element vertex 8          { define "vertex" element, 8 of them in file }
property float x           { vertex contains float "x" coordinate }
property float y           { y coordinate is also a vertex property }
property float z           { z coordinate, too }
element face 6             { there are 6 "face" elements in the file }
property list uchar int vertex_indices { "vertex_indices" is a list of ints }
end_header                 { delimits the end of the header }
0 0 0                      { start of vertex list }
0 0 1
0 1 1
0 1 0
1 0 0
1 0 1
1 1 1
1 1 0
4 0 1 2 3                  { start of face list }
4 7 6 5 4
4 0 4 5 1
4 1 5 6 2
4 2 6 7 3
4 3 7 4 0
```

Fig. 21 - Descrizione ASCII di un cubo. Turk 1994

Dal momento che il software non consente di esportare i valori associati alla varianza all'interno della nuvola sparsa, sulla base della guida pubblicata si è elaborato un semplice script python al fine di includere anche gli attributi calcolati per la varianza (fig. 21).²⁵⁷

```
import Metashape
import os

def export_sparse_cloud():
    """
    Esporta la nuvola sparsa in formato PLY.
    """
    print("Script iniziato...")

    doc = Metashape.app.document
    chunk = doc.chunk
    if not chunk:
        raise Exception("Nessun chunk trovato nel progetto.")

    if not chunk.point_cloud:
        raise Exception("La nuvola sparsa non esiste nel chunk corrente.")

    output_file = Metashape.app.getSaveFileName("Salva nuvola sparsa", "sparse_cloud.ply", "PLY Files (*.ply)")
    if not output_file:
        print("Esportazione annullata.")
        return

    try:
        chunk.exportPoints(output_file, source_data=Metashape.PointCloudData, save_colors=True, save_normals=True, save_tiepoint_covariance=True, format=Metashape.PointsFormat.PLY)
        print(f"Nuvola sparsa esportata con successo in: {output_file}")
    except Exception as e:
        print(f"Errore durante l'esportazione: {e}")

label = "Scripts/Export Sparse Cloud"
Metashape.app.addMenuItem(label, export_sparse_cloud)
print(f"Per eseguire questo script, seleziona: {label}")
```

Figure 22 - Script Python per l'esportazione della nuvola sparsa con matrice di covarianza

Tuttavia sebbene il software abbia avviato correttamente la procedura di salvaggio, il processo non ha prodotto alcun risultato. Si è dunque proceduto con un export della nuvola densa, selezionando l'opzione che consente di scrivere nel file i valori relativi alla confidenza dei punti; successivamente il file è stato aperto attraverso Notepad++ per verificare la presenza degli attributi ed è stato poi importato all'interno di Cloud Compare (fig. 22)

²⁵⁷ Metashape Python Reference, Release 1.7.1, Agisoft LLC, 2021

```

1 ply
2 format ascii 1.0
3 element vertex 32411712
4 property double x
5 property double y
6 property double z
7 property double nx
8 property double ny
9 property double nz
10 property uchar red
11 property uchar green
12 property uchar blue
13 property uchar class
14 property uchar confidence
15 end_header
16 -0.536 7.346 0.884 0.366217 0.495090 0.787890 81 72 60 0 2
17 -0.521 7.369 0.883 -0.003636 0.314415 0.949279 49 46 41 0 2
18 -0.518 7.349 0.880 0.139862 0.855519 0.498524 63 53 42 0 2
19 -0.482 7.366 0.863 0.071784 0.716444 0.693941 67 64 61 0 1
20 -0.500 7.367 0.883 0.074308 -0.017721 0.997078 44 44 40 0 2
21 -0.497 7.370 0.862 0.202604 0.813617 0.544957 52 50 47 0 1
22 -0.559 7.345 0.905 0.059453 0.823401 0.564337 39 34 26 0 2
23 -0.518 7.344 0.904 0.389736 0.471350 0.791161 62 52 39 0 1
24 -0.500 7.363 0.879 0.504665 0.333215 0.796417 56 52 44 0 2
25 -0.560 7.363 0.882 0.114291 0.937416 -0.328920 62 59 49 0 2

```

Fig. 23 Formato .ply in Notepad ++ con attributi relativi alla confidenza

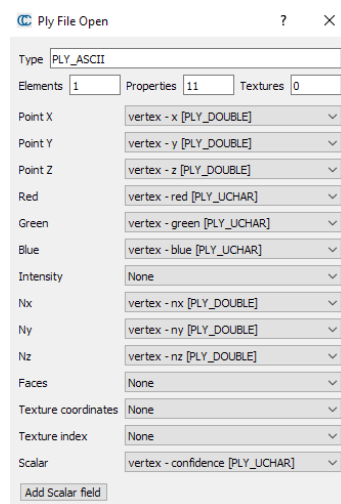


Fig. 24 - Import del file con mappatura degli attributi in Cloud Compare

A questo punto è stato possibile attivare la visualizzazione basata su campi scalari, che consentono di associare un insieme di valori, come la distanza di un punto da un'altra entità, visualizzandoli attraverso delle scale cromatiche.²⁵⁸ Un aspetto significativo che occorre sottolineare riguarda la diversa interpretazione della confidenza fornita dai due software. Mentre la rappresentazione offerta da Metashape sembra suggerire un alto grado di confidenza, basando tale stima sul numero di mappe di profondità utilizzato per generare ogni punto, in CloudCompare la maggior parte dei punti viene mappata come valori di confidenza di media entità, mostrando le aree più incerte come il tetto e la base della torre come aree scarsamente affidabili (fig. 23).

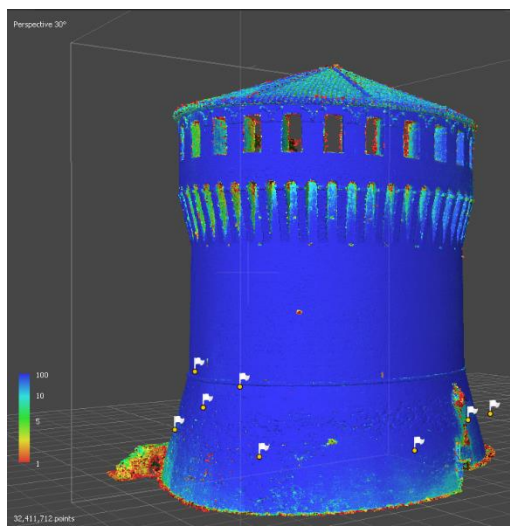


Fig. 25 - Visualizzazione della confidenza in Metashape

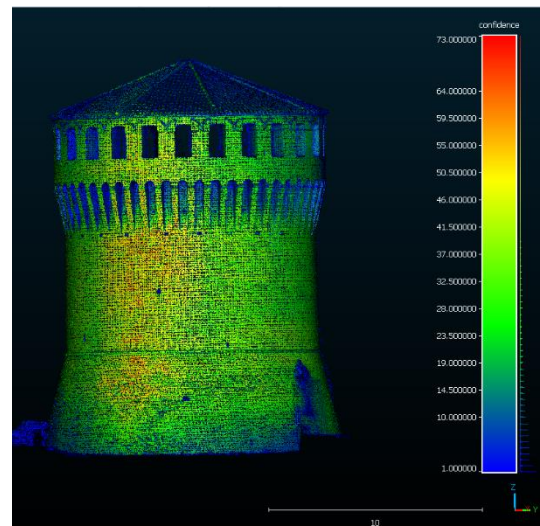


Fig. 26 - Visualizzazione della confidenza in Cloud Compare

²⁵⁸ <https://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>

Le due differenti rappresentazioni, quella di Metashape e quella di Cloud Compare, consentono di riconoscere immediatamente le aree caratterizzate da una minore affidabilità e offrono così un ulteriore supporto per l'interpretazione dei dati. Il loro inserimento all'interno delle piattaforme di condivisione potrebbe in tal senso garantire un maggior grado di analisi delle ricostruzioni eseguite, accompagnando lo stimolo visivo alle informazioni contestuali relative al processo di acquisizione.

Ulteriori sviluppi prevedono il confronto dei risultati sia grafici che testuali prodotti da altri software per individuare punti comuni e divergenze, mettendo a punto una logica di presentazione armonizzata; inoltre si prevede di adottare un approccio basato sull'export delle stime di errore e sulla loro traduzione in forme di visualizzazione interattiva che potrebbero essere usate all'interno di webapp come ATON o 3DHOP; sebbene alcune di queste soluzioni siano state progettate anche per il caricamento di grandi nuvole di punti, al momento la conversione necessaria per la visualizzazione dei progetti sembra non supportare l'upload dei modelli di confidenza. Occorrono tuttavia ulteriori ricerche e prove tecniche.

In definitiva, una più compiuta valorizzazione dei numerosi modelli 3D relativi al patrimonio culturale, oltre al necessario processo di standardizzazione e ottimizzazione delle procedure di acquisizione e all'altrettanto fondamentale sviluppo di repository aperti, efficienti ed efficacemente metadati, necessita, come si è cercato di mostrare in quest'ultima parte della ricerca, di una più consapevole attenzione all'impatto che quegli stessi modelli hanno sia nella comunicazione scientifica, sia in quella pubblica e divulgativa. Un approccio di natura visuale sembra indispensabile, anche per una corretta specificazione e documentazione delle incertezze. Solo in questo modo i modelli 3D potranno risultare efficaci per una più ampia e fondata comprensione degli oggetti cui si riferiscono, e non risultare simulacri se non falsificazioni di un patrimonio culturale che, malgrado la massiva attività di digitalizzazione in corso, rischia di sfuggire ancora una volta alla definizione di una complessiva metodologia condivisa, al di là delle specificità degli approcci, e dotata di una sua credibilità scientifica e disciplinare.

Bibliografia

- Abanda, F. H., Tah, J. H. M., & Keivani, R. (2013). Trends in built environment semantic Web applications: Where are we today? *Expert Systems with Applications*, 40(14), 5563–5577. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.04.027>
- Agosti, D., Nielsen, L. H., Dillen, M., & Groom, Q. (2019). *Digitisation infrastructure design for Zenodo. Deliverable D6.3. ICEDIG*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3346782>
- Ahmed, S., El-Shazly, A., Abed, F., & Ahmed, W. (2022). The Influence of Flight Direction and Camera Orientation on the Quality Products of UAV-Based SfM-Photogrammetry. *Applied Sciences*, 12(20), <https://doi.org/10.3390/app122010492>
- Aicardi, I., Chiabrando, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., & Spanò, A. (2016). Uav photogrammetry with oblique images: first analysis on data acquisition and processing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 835–842. XXIII ISPRS Congress, Commission I (Volume XLI-B1) - 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-835-2016>
- Aicardi, I., Chiabrando, F., Maria Lingua, A., & Noardo, F. (2018). Recent trends in cultural heritage 3D survey: The photogrammetric computer vision approach. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.006>
- Alaoui M'Darhri, A., Baillet, V., Bourineau, B., Calantropio, A., Carpentiero, G., Chayani, M., De Luca, L., Dudek, I., Dutailly, B., Gautier, H., Grilli, E., Grimaud, V., Hoffmann, C., Joffres, A., Jončić, N., Jordan, M., Kimball, J., Manuel, A., McInerney, ... Zuanni, C. (2019). *PARTHENOS White Paper II: Share — Publish — Store — Preserve. Methodologies, Tools and Challenges for 3D Use in Social Sciences and Humanities. This White Paper is the result of the PARTHENOS Workshop held in Marseilles at MAP Lab. (France), February 25th - February 27th, 2019*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3258316>
- Alcantarilla, P. F., Bartoli, A., & Davison, A. J. (2012). KAZE Features. In A. Fitzgibbon, S. Lazebnik, P. Perona, Y. Sato, & C. Schmid (edited by), *Computer Vision – ECCV 2012* (214–227). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33783-3_16
- Alemu, G. (2022). Introduction to Metadata. In *The Future of Enriched, Linked, Open and Filtered Metadata: Making Sense of IFLA LRM, RDA, Linked Data and BIBFRAME* (1–40). Facet. <https://doi.org/10.29085/9781783304943.002>
- Alexiev, V. (2018). Museum Linked Open Data: Ontologies, Datasets, Projects. *Digital Presentation and Preservation of Cultural and Scientific Heritage*, 8, 19–50. <https://doi.org/10.55630/dipp.2018.8.1>
- Aloia, N., Binding, C., Cuy, S., Doerr, M., Fanini, B., Felicetti, A., Fihn, J., Gavrili, D., Geser, G., Hollander, H., Meghini, C., Niccolucci, F., Nurra, F., Papatheodorou, C., Richards, J., Ronzino, P., Scopigno, R., Theodoridou, M., Tudhope, D., ... Wright, H. (2017). Enabling European Archaeological Research: The ARIADNE E-Infrastructure. *Internet Archaeology*, 43. <https://doi.org/10.11141/ia.43.11>
- Amico, N., & Felicetti, A. (2024). *3D Data Long-Term Preservation in Cultural Heritage* (arXiv:2409.04507). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.04507>
- Amorim, R. C., Castro, J. A., Rocha da Silva, J., & Ribeiro, C. (2017). A comparison of research data management platforms: Architecture, flexible metadata and interoperability. *Universal Access in the Information Society*, 16(4), 851–862. <https://doi.org/10.1007/s10209-016-0475-y>

Angheluță, L. M., Popovici, A. I., & Ratoiu, L. C. (2023). A Web-Based Platform for 3D Visualization of Multimodal Imaging Data in Cultural Heritage Asset Documentation. *Heritage*, 6(12) <https://doi.org/10.3390/heritage6120387>

Angheluță, L. M., & Rădvan, R. (2019). Macro photogrammetry for the damage assessment of artwork painted surfaces. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W15, 101–107. 27th CIPA International Symposium “Documenting the past for a better future” (Volume XLII-2/W15) - 1–5 September 2019, Ávila, Spain. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-101-2019>

Antinozzi, S., Ronchi, D., & Barba, S. (2021). Macro and micro photogrammetry for the virtualization of the Orphic Foil (V-IV BC) of National Museum of Vibo Valentia. *CONNETTERE un Disegno per Annodare e Tessere—UID, Congress of Unione Italiana per il Disegno*, 1538–1555.

Apollonio, F. I., Fallavollita, F., Foschi, R., & Smurra, R. (2024). Multi-Feature Uncertainty Analysis for Urban-Scale Hypothetical 3D Reconstructions: Piazza delle Erbe Case Study. *Heritage*, 7(1), <https://doi.org/10.3390/heritage7010023>

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

Atkinson, K. B. (2001) *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Roseleigh House, Scotland: Whittles.

Baca, M. (2013). *Introduction to metadata* (2nd ed). Los Angeles, Getty Research Institute.

Bajena, I., & Kuroczyński, P. (2023). Metadata for 3D Digital Heritage Models, in the Search of a Common Ground. In S. Münster, A. Pattee, C. Kröber, & F. Niebling (edited by), *Research and Education in Urban History in the Age of Digital Libraries* (45–64). Switzerland, Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38871-2_4

Balzani R., Barzaghi S., Bitelli G., Bonifazi F., Bordignon A., Cipriani L., Colitti S., Collina F., Daquino M., Fabbri F., Fanini B., Fantini F., Ferdani D., Fiorini G., Formia E., Forte A., Giacomini F., Alena Girelli V., Gualandi B., Heibi I., Iannucci A., Manganelli Del Fà R., Massari A., Moretti A., Peroni S., Pescarin S., Renda G., Ronchi D., Sullini M., Tini M. A., Tomasi F., Travaglini L., Vittuari L. (2024) Saving temporary exhibitions in virtual environments: The Digital Renaissance of Ulisse Aldrovandi – Acquisition and digitisation of cultural heritage objects, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 32, pp. 1 - 22, <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00309>.

Banfi, F., Brumana, R., Roascio, S., Previtali, M., Roncoroni, F., Mandelli, A., & Stanga, C. (2022). 3D Heritage reconstruction and SCAN-TO-HBIM-TO-XR project of the Tomb of Caecilia Metella and Caetani Castle, Rome, Italy. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-2-W1-2022, 49–56. ISPRS WG II/89th International Workshop 3D-ARCH «3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures» ;4 March 2022, Mantua, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-49-2022>

Banfi, F., Brumana, R., Salvalai, G., & Previtali, M. (2022). Digital Twin and Cloud BIM-XR Platform Development: From Scan-to-BIM-to-DT Process to a 4D Multi-User Live App to Improve Building Comfort, Efficiency and Costs. *Energies*, 15(12), <https://doi.org/10.3390/en15124497>

Barazzetti, L., Remondino, F., & Scaioni, M. (2012). Automated and accurate orientation of complex image sequences. In Remondino F. and El-Hakim S (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5-W16, 277–284. WG V/44th ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2-4 Marzo 2011, Trento, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-277-2011>

- Barbasiewicz, A., Widerski, T., & Daliga, K. (2018). The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. *E3S Web of Conferences*, 26, 00012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182600012>
- Bardi, A., Baglioni, M., Artini, M., Mannocci, A., & Pavone, G. (2024). *The ARIADNEplus Knowledge Base: A Linked Open Data set for archaeological research*. In Atzori M., Ciaccia P., Ceci M., Mandreoli F., Malerba D., Sanguinetti (edited by) *Proceedings of the 32nd Symposium of Advanced Database Systems*, June 23-26, 2024, Villasimius, Sardinia, Italy 91-100. <https://hdl.handle.net/20.500.14243/484001>
- Barnes, C., Shechtman, E., Finkelstein, A., & Goldman, D. B. (2009). PatchMatch: A randomized correspondence algorithm for structural image editing. *ACM Trans. Graph.*, 28(3), 24:1-24:11. <https://doi.org/10.1145/1531326.1531330>
- Barsanti, S. G., Remondino, F., Fernández-Palacios, B. J., & Visintini, D. (2014). Critical Factors and Guidelines for 3D Surveying and Modelling in Cultural Heritage. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 3(1), 141–158. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.3.1.141>
- Barszcz, M., Montusiewicz, J., Pańnikowska-Łukaszuk, M., & Sałamacha, A. (2021). Comparative Analysis of Digital Models of Objects of Cultural Heritage Obtained by the “3D SLS” and “SfM” Methods. *Applied Sciences*, 11(12), <https://doi.org/10.3390/app11125321>
- Barzaghi, S., Bordignon, A., Gualandi, B., Heibi, I., Massari, A., Moretti, A., Peroni, S., & Renda, G. (2024). A Proposal for a FAIR Management of 3D Data in Cultural Heritage: The Aldrovandi Digital Twin Case. *Data Intelligence*. <https://doi.org/10.3724/2096-7004.di.2024.0061>
- Basso, A., Condorelli, F., Giordano, A., Morena, S., & Perticarini, M. (2024). Evolution of rendering based on radiance fields. the palermo case study for a comparison between nerf and gaussian splatting. In S. Campana, F. Fassi, and F. Remondino (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2-W4-2024*, 57–64. ISPRS / CIPA 10th International Workshop 3D-ARCH «3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures» - 21–23 February 2024, Siena, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-57-2024>
- Baylis, G. (2016). Photographs, Museums, Collections: Between Art and Information Edited by Elizabeth Edwards and Christopher Morton. *History of Photography*, 40(2), 218–219. <https://doi.org/10.1080/03087298.2016.1182333>
- Beacham, R.; H. Denard and Niccolucci, F. 2006, 'An Introduction to the London Charter', in Ioannides, M. et al. (edited by), *The e-volution of Information Communication Technology in Cultural Heritage: where hi-tech touches the past: risks and challenges for the 21st century*, CIPA/VAST/EG/EuroMed, Budapest, Archaeolingua.
- Behr, J., Eschler, P., Jung, Y., & Zöllner, M. (2009). X3DOM: A DOM-based HTML5/X3D integration model. In Spencer S. N. (edited by) *Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology (Web3D '09)*. Association for Computing Machinery, New York, USA, 127–135. <https://doi.org/10.1145/1559764.1559784>
- Behr, J., Jung, Y., Keil, J., Drevensek, T., Zoellner, M., Eschler, P., & Fellner, D. (2010). A scalable architecture for the HTML5/X3D integration model X3DOM. Knorich Zuffo M., Mouton C., Philipp Slusallek, Yoo B. Polys N. (edited by) *Web3D '10 Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology*, 185–194. <https://doi.org/10.1145/1836049.1836077>
- Benardou, A., Champion, E., Dallas, C., & Hughes, L. (2018) *Cultural Heritage Infrastructures in Digital Humanities*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315575278>

- Bermès, E., & Fauduet, L. (2011). The Human Face of Digital Preservation: Organizational and Staff Challenges, and Initiatives at the Bibliothèque nationale de France. *International Journal of Digital Curation*, 6(1), <https://doi.org/10.2218/ijdc.v6i1.184>
- Bianco, S., Ciocca, G., & Marelli, D. (2018). Evaluating the Performance of Structure from Motion Pipelines. *Journal of Imaging*, 4(8), <https://doi.org/10.3390/jimaging4080098>
- Bitelli, G. (2000). *Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali*. Atti VI Conferenza Nazionale ASITA. Perugia, 5 - 8 Novembre 2002, vol. I, IX-XXIV, ISBN: 88-900943-4-6
- Bitelli, G., Balletti, C., Brumana, R., Barazzetti, L., D'Urso, M. G., Rinaudo, F., & Tucci, G. (2019). The gamher research project for metric documentation of cultural heritage: current developments. In R. Brumana, V. Pracchi, F. Rinaudo, A. Grimoldi, M. Scaioni, M. Previtali, and L. Cantini (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2-W11*, 239–246. GEORES 2019 2nd International Conference of Geomatics and Restoration, 8-10 May 2019, Milan, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-239-2019>
- Bold, J. A., & Thornes, R. (1999). *Documenting the cultural heritage*. USA, Getty Research Institute for the History of Art and the Humanities.
- Boliini, A., Knoth, P., Perakakis, P., Rodrigues, E., Shearer, K., Sompel, V. de, & Walk, P. (2017). *Next Generation Repositories: Behaviours and Technical Recommendations of the COAR Next Generation Repositories Working Group (2017)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8077381>
- Borgman, C. L., Scharnhorst, A., & Golshan, M. S. (2019). Digital data archives as knowledge infrastructures: Mediating data sharing and reuse. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 70(8), 888–904. <https://doi.org/10.1002/asi.24172>
- Boutsi, A.-M., Ioannidis, C., & Soile, S. (2019). An Integrated Approach to 3D Web Visualization of Cultural Heritage Heterogeneous Datasets. *Remote Sensing*, 11(21), 2508. <https://doi.org/10.3390/rs11212508>
- Boyer, D. M., Gunnell, G. F., Kaufman, S., & McGeary, T. M. (2016). MORPHOSOURCE: ARCHIVING AND SHARING 3-D DIGITAL SPECIMEN DATA. *The Paleontological Society Papers*, 22, 157–181. <https://doi.org/10.1017/scs.2017.13>
- Brumana, R. (2023a). How to Measure Quality Models? Digitization into Informative Models Re-use. In M. Ioannides & P. Patias (edited by), *3D Research Challenges in Cultural Heritage III: Complexity and Quality in Digitisation* (77–102). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35593-6_5
- Brumana, R. (2023b). How to Measure Quality Models? Digitization into Informative Models Re-use. In M. Ioannides & P. Patias (edited by), *3D Research Challenges in Cultural Heritage III: Complexity and Quality in Digitisation* (77–102). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35593-6_5
- Brumana, R., Ioannides, M., & Previtali, M. (2019). Holistic heritage building information modelling (hhbim): from nodes to hub networking, vocabularies and repositories. In R. Brumana, V. Pracchi, F. Rinaudo, A. Grimoldi, M. Scaioni, M. Previtali, L. Cantini (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2-W11*, 309–316. GEORES 2019 2nd International Conference of Geomatics and Restoration, 10 May 2019, Milan, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-309-2019>
- Bruno, N., Mikolajewska, S., Roncella, R., & Zerbi, A. (2022). Integrated processing of photogrammetric and laser scanning data for frescoes restoration. In L. Fregonese, F. Fassi, F. Remondino (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-2-W1-2022*, 105–112. ISPRS WG II/89th International Workshop 3D-ARCH «3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures» - March 2022, Mantua, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-105-2022>

- Cabrelles, M., Lerma, J. L., & Villaverde, V. (2020). Macro Photogrammetry & Surface Features Extraction for Paleolithic Portable Art Documentation. *Applied Sciences*, 10(19), <https://doi.org/10.3390/app10196908>
- Champion, E. (2018). The role of 3D models in virtual heritage infrastructures. In Benardou, A., Champion, E., Dallas, C., & Hughes, L (edited by) *Cultural Heritage Infrastructures in Digital Humanities*. Routledge.
- Champion, E., & Rahaman, H. (2020). Survey of 3D digital heritage repositories and platforms. *Virtual Archaeology Review*, 11(23), <https://doi.org/10.4995/var.2020.13226>
- Chen, G., & Wang, W. (2024). *A Survey on 3D Gaussian Splatting* (arXiv:2401.03890). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.03890>
- Chum, O., Matas, J., & Kittler, J. (2003). Locally Optimized RANSAC. In B. Michaelis & G. Krell (edited by), *Pattern Recognition* (236–243). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45243-0_31
- Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R., & Ruggeri, L. (2016). SfM technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts. In L. Halounova, V. Šafář, F. Remondino, J. Hodač, K. Pavelka, M. Shortis, F. Rinaudo, M. Scaioni, J. (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5*, 229–236. XXIII ISPRS Congress, Commission V (Volume XLI-B5), 19 July 2016, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-229-2016>
- Corcho, O., Ekaputra, F. J., Heibi, I., Jonquet, C., Micsik, A., Peroni, S., & Storti, E. (2024). A maturity model for catalogues of semantic artefacts. *Scientific Data*, 11(1), 479. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03185-4>
- Cutugno, M., Robustelli, U., & Pugliano, G. (2022). Structure-from-Motion 3D Reconstruction of the Historical Overpass Ponte della Cerra: A Comparison between MicMac® Open Source Software and Metashape®. *Drones*, 6(9), <https://doi.org/10.3390/drones6090242>
- CWTS, Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), Elsevier, ESADE, Lisbon Council, Wareham, J., & Pujol Priego, L. (2019). *Zenodo: Open science monitor case study*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/298228>
- Dalal, A., Hagen, D., Robbersmyr, K. G., & Knausgård, K. M. (2024). Gaussian Splatting: 3D Reconstruction and Novel View Synthesis: A Review. *IEEE Access*, 12, 96797–96820. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3408318>
- D’Alberto, R., & Raggi, M. (2022, novembre 4). *CONSOLE Project—Deliverable 7.6—“Data Management Plan”* University of Bologna. <https://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/7076>
- Dallmeier-Tiessen, S., Khodiyar, V., Murphy, F., Nurnberger, A., Raymond, L., Whyte, A., Bloom, T., Austin, C. C., Tedds, J., Stockhause, M., & Vardigan, M. (2016). *RDA/WDS Publishing Data Workflows WG Recommendations*. <https://doi.org/10.15497/RDA00004>
- D’Andrea, A., & Fernie, K. (2013). CARARE 2.0: A metadata schema for 3D cultural objects. In Alonzo C. Addison, Livio De Luca, Gabriele Guidi, Sofia Pescarin (edited by) *Digital Heritage International Congress 2013 (DigitalHeritage)*, Marseille, France, 2, 137–143. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2013.6744745>
- De Paolis, L. T., De Luca, V., Gatto, C., D’Errico, G., & Paladini, G. I. (2020). Photogrammetric 3D Reconstruction of Small Objects for a Real-Time Fruition. In L. T. De Paolis & P. Bourdot (edited by), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (375–394). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58465-8_28

- Denard, H. (2012). A New Introduction to The London Charter. In *Paradata and Transparency in Virtual Heritage*. London, Routledge.
- Deng, Z., Gao, J., Li, T., Chen, Y., Gao, B., Fang, F., Culham, J. C., & Chen, J. (2024). Viewpoint adaptation revealed potential representational differences between 2D images and 3D objects. *Cognition*, 251, 105903. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2024.105903>
- D'Eredità, A. (2020). Il rilievo fotogrammetrico di Doclea. *Archeologia e Calcolatori*, 31(1), 213–230. <https://doi.org/10.19282/ac.31.1.2020.10>
- Deursen, D. V., Poppe, C., Martens, G., Mannens, E., & Walle, R. V. de. (2008). XML to RDF Conversion: A Generic Approach. In P Nesi, K Ng and J Delgado (edited by) *2008 International Conference on Automated Solutions for Cross Media Content and Multi-Channel Distribution*, 138–144. <https://doi.org/10.1109/AXMEDIS.2008.17>
- Di Benedetto, M., Ponchio, F., Ganovelli, F., & Scopigno, R. (2010). SpiderGL: A JavaScript 3D graphics library for next-generation WWW. *Proceedings of the 15th International Conference on Web 3D Technology*, New York, USA, 165–174. <https://doi.org/10.1145/1836049.1836075>
- Dimou, A., Vander Sande, M., Colpaert, P., Verborgh, R., Mannens, E., & Van de Walle, R. (2014). RML: A Generic Language for Integrated RDF Mappings of Heterogeneous Data. In C. Bizer, T. Heath, S. Auer, & T. Berners-Lee (edited by.), *Proceedings of the 7th Workshop on Linked Data on the Web* (Vol. 1184).
- Dirksen, J. (2013). *Learning Three.js: The JavaScript 3D Library for WebGL*. Birmingham, Packt Publishing. <http://archive.org/details/learningthreejsj0000dirk>
- Doerr, M., Ore, C.-E., & Stead, S. (2007). The CIDOC conceptual reference model: A new standard for knowledge sharing. *Tutorials, posters, panels and industrial contributions at the 26th international conference on Conceptual modeling - Volume 83*, 83, 51–56.
- Doerr, M., & Theodoridou, M. (2011). *CRMdig: A Generic Digital Provenance Model for Scientific Observation*. Workshop on the Theory and Practice of Provenance.
- Dörk, M., Carpendale, S., & Williamson, C. (2011). The information flaneur: A fresh look at information seeking. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1215–1224. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979124>
- Drucker, J. (2011). Humanities approaches to graphical display. *Digital Humanities Quarterly*, 5(1), 1-21. <https://www.digitalhumanities.org/dhq/vol/5/1/000091/000091.html>
- Durgut, T., & Maraş, E. E. (2023). Principles of self-calibration and visual effects for digital camera distortion. *Open Geosciences*, 15(1). <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0552>
- Đurić, I., Vasiljević, I., Obradović, M., Stojaković, V., Kićanović, J., & Obradović, R. (2021). Comparative Analysis of Open-Source and Commercial Photogrammetry Software for Cultural Heritage. *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 2, 243–252. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.2.243>
- Edwards, E., and Morton C. (2015). *Photographs, Museums, Collections: Between Art and Information*. London, Bloomsbury
- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV photogrammetry* [Doctoral Thesis, ETH Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005939264>
- Elings, M. W., & Waibel, G. (2007). Metadata for all: Descriptive standards and metadata sharing across libraries, archives and museums. *First Monday*. <https://doi.org/10.5210/fm.v12i3.1628>

- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellán, A. (2016). Image-based surface reconstruction in geomorphometry; merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Eltner, A., & Sofia, G. (2020). Structure from motion photogrammetric technique. In P. Tarolli & S. M. Mudd (Edited by), *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 23, 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>
- Evans, G., Jarrett, N., Daley, B., Strzelichowska, A., Mouzakiti, R., & Aldana, L. (2023). CNECT/LUX/2021/OP/0070 Deployment of a common European data space for cultural heritage. DS. *Communication and dissemination plan M2 Europeana Foundation*. 20 January 2023
- 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. *Applied Sciences*, 11(22), <https://doi.org/10.3390/app112211062>
- Fathalla, S., Lange, C., & Auer, S. (2019). A Human-Friendly Query Generation Frontend for a Scientific Events Knowledge Graph. In A. Doucet, A. Isaac, K. Golub, T. Aalberg, & A. Jatowt (edited by), *Digital Libraries for Open Knowledge* (200–214). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30760-8_18
- Federman, A., Santana Quintero, M., Kretz, S., Gregg, J., Lengies, M., Ouimet, C., & Laliberte, J. (2017). UAV photogrammetric workflows: a best practice guideline. In J. Hayes, C. Ouimet, M. Santana Quintero, S. Fai, and L. Smith (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2-W5*, 237–244. ICOMOS/ISPRS International Scientific Committee on Heritage Documentation (CIPA) 26th International CIPA Symposium; Digital Workflows for Heritage Conservation - 28 August - 1 September 2017, Ottawa, Canada. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-237-2017>
- Fensel, D., Facca, F. M., Simperl, E., & Toma, I. (2011). Semantic Web. In D. Fensel, F. M. Facca, E. Simperl, & I. Toma (edited by), *Semantic Web Services* (87–104). Berlin, Heidelberg, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-642-19193-0_6
- Fernandez, R., Fernandez, R., & The 84th Annual Meeting of the Society for American Archaeology. (2019). Digital Curation of Photogrammetric Data. In *The 84th Annual Meeting of the Society for American Archaeology*, Albuquerque, NM <https://doi.org/10.6067/XCV8451423>
- Fernie, K. (2024). 3D Content in Europeana: The Challenges of Providing Access. In M. Hostettler, A. Buhlke, C. Drummer, L. Emmenegger, J. Reich, & C. Stäheli (edited by), *The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology: State-of-the-Art, Data Management and Current Challenges in Archaeological 3D-Documentation* (167–177). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53032-6_10
- Fielding, R. T., & Taylor, R. N. (2002). Principled design of the modern Web architecture. *ACM Trans. Internet Technol.*, 2(2), 115–150. <https://doi.org/10.1145/514183.514185>
- Flotyński, J., & Walczak, K. (2017). Ontology-Based Representation and Modelling of Synthetic 3D Content: A State-of-the-Art Review. *Computer Graphics Forum*, 36(8), 329–353. <https://doi.org/10.1111/cgf.13083>
- Freire, N., Voorburg, R., Cornelissen, R., de Valk, S., Meijers, E., & Isaac, A. (2019). Aggregation of Linked Data in the Cultural Heritage Domain: A Case Study in the Europeana Network. *Information*, 10(8) <https://doi.org/10.3390/info10080252>
- Fridovich-Keil, S., Meanti, G., Warburg, F. R., Recht, B., & Kanazawa, A. (2023). K-Planes: Explicit Radiance Fields in Space, Time, and Appearance. *2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 12479–12488. <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.01201>

- Friedewald, M., Székely, I., & Karaboga, M. (2024). Access to Public Archives in Europe: Progress in the implementation of CoE Recommendation R (2000)13 on a European policy on access to archives. *Archives and Records*, 45(1), 55–71. <https://doi.org/10.1080/23257962.2023.2285954>
- Furferi, R., Colombini, M. P., Seymour, K., Pelagotti, A., & Gherardini, F. (2024). The Future of Heritage Science and Technologies: Papers from Florence Heri-Tech 2022. *Heritage Science*, 12(1), 155.
- Furferi, R., et al. "Enhancing traditional museum fruition: current state and emerging tendencies." *Heritage Science* 12.1 (2024): 20.
- Furukawa, Y., & Hernández, C. (2015). Multi-View Stereo: A Tutorial. *Found. Trends. Comput. Graph. Vis.*, 9(1–2), 1–148. <https://doi.org/10.1561/06000000052>
- Gaiani, M., Apollonio, F. I., & Fantini, F. (2019). Evaluating smartphones color fidelity and metric accuracy for the 3d documentation of small artifacts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W11, 539–547. GEORES 2019 2nd International Conference of Geomatics and Restoration ;10 May 2019, Milan, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-539-2019>
- Gao, K., Gao, Y., He, H., Lu, D., Xu, L., & Li, J. (2023). *NeRF: Neural Radiance Field in 3D Vision, A Comprehensive Review* (arXiv:2210.00379). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.00379>
- Garozzo, R., Murabito, F., Santagati, C., Pino, C., & Spampinato, C. (2017). Culto: an ontology-based annotation tool for data curation in cultural heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W5, 267–274. ICOMOS/ISPRS International Scientific Committee on Heritage Documentation (CIPA) 26th International CIPA Symposium & Digital Workflows for Heritage Conservation (Volume XLII-2/W5) - 28 August–1 September 2017, Ottawa, Canada. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-267-2017>
- Gaspari, F., Ioli, F., Barbieri, F., Rivieri, C., Dondi, M., & Pinto, L. (2023). Rediscovering cultural heritage sites by interactive 3d exploration: a practical review of open-source webgl tools. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2–2023, 661–668. 29th CIPA Symposium “Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage. Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future” - 25–30 June 2023, Florence, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-661-2023>
- Girelli, V. A., Tini, M. A., Dellapasqua, M., & Bitelli, G. (2019). High resolution 3d acquisition and modelling in cultural heritage knowledge and restoration projects: the survey of the fountain of neptune in bologna. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W11, 573–578. GEORES 2019 2nd International Conference of Geomatics and Restoration (Volume XLII-2/W11) - 8–10 May 2019, Milan, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-573-2019>
- Gooding, D. C. (2010). Visualizing Scientific Inference. *Topics in Cognitive Science*, 2(1), 15–35. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01048.x>
- Granshaw, S. I. (2018). Structure from motion: Origins and originality. *The Photogrammetric Record*, 33(161), 6–10. <https://doi.org/10.1111/phor.12237>
- Granshaw, S. I. (2020). Photogrammetric terminology: Fourth edition. *The Photogrammetric Record*, 35(170), 143–288. <https://doi.org/10.1111/phor.12314>
- Gruen, A. (2012). Development and Status of Image Matching in Photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 27(137), 36–57. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2011.00671.x>

- Gruen, A., & Beyer, H. A. (2001). System Calibration Through Self-Calibration. In A. Gruen & T. S. Huang (edited by), *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision* (163–193). Berlin, Heidelberg, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04567-1_7
- Gualandi, B., Pareschi, L., & Peroni, S. (2022). What do we mean by “data”? A proposed classification of data types in the arts and humanities. *Journal of Documentation*, 79(7), 51–71. <https://doi.org/10.1108/JD-07-2022-0146>
- Gualandi, B., & Peroni, S. (2024). *Data Management Plan: Second version*. <https://zenodo.org/records/10727879>
- Guidi, G., Beraldin, J.-A., & Atzeni, C. (2004). High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: The digitizing of Donatello’s «Maddalena». *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(3), 370–380. *IEEE Transactions on Image Processing*. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.822592>
- Hardesty, J. L., Johnson, J., Wittenberg, J., Hall, N., Cook, M., Lischer-Katz, Z., Xie, Z., & McDonald, R. (2020). 3D Data Repository Features, Best Practices, and Implications for Preservation Models: Findings from a National Forum. *College & Research Libraries*, 81(5), <https://doi.org/10.5860/crl.81.5.789>
- Harpring, P. (2010). *Introduction to controlled vocabularies: Terminology for art, architecture, and other cultural works*. Los Angeles, Calif, Getty Research Institute. <http://archive.org/details/introductiontoco0000harp>
- Haslhofer, B., Warner, S., Lagoze, C., Klein, M., Sanderson, R., Nelson, M. L., & Sompel, H. van de. (2013). *ResourceSync: Leveraging Sitemaps for Resource Synchronization* (arXiv:1305.1476). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1305.1476>
- Higgins, S. (2008). The dcc curation lifecycle model. *Proceedings of the 8th ACM/IEEE-CS joint conference on Digital libraries*, 453. <https://doi.org/10.1145/1378889.1378998>
- Hinrichs, U., Forlini, S., & Moynihan, B. (2016). Speculative Practices: Utilizing InfoVis to Explore Untapped Literary Collections. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(1), 429–438. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2015.2467452>
- Hirschmuller, H., & Scharstein, D. (2007). Evaluation of Cost Functions for Stereo Matching. *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383248>
- Hollink, L., Schreiber, A. Th., Wielinga, B. J., & Worring, M. (2004). Classification of user image descriptions. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(5), 601–626. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.03.002>
- Homburg, T., Cramer, A., Raddatz, L., & Mara, H. (2021). Metadata schema and ontology for capturing and processing of 3D cultural heritage objects. *Heritage Science*, 9(1), 91. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00561-w>
- Hugo, W., Le Franc, Y., Coen, G., Parland-von Essen, J., & Bonino, L. (2020). *D2.5 FAIR Semantics Recommendations Second Iteration*. <https://zenodo.org/records/5362010>
- Huvila, I. (2022). Improving the usefulness of research data with better paradata. *Open Information Science*, 6(1), 28–48. <https://doi.org/10.1515/opis-2022-0129>
- Ioannides M. et al. (2005), Standards in cultural heritage: the missing grammar for the digital documentation of the past. 2005. *Proceedings of the XX International Symposium CIPA 2005 CIPA 2005 XX International Symposium*, 26 September – 01 October, 2005, Torino, Italy

- Ioannides, M., & Patias, P. (2023). The Complexity and Quality in 3D Digitisation of the Past: Challenges and Risks. In M. Ioannides & P. Patias (edited by), *3D Research Challenges in Cultural Heritage III: Complexity and Quality in Digitisation* (1–33). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35593-6_1
- Jäckel, D., & Lehmann, A. (2023). Benefits and Challenges: Data Management Plans in Two Collaborative Projects. *Data Science Journal*, 22(1). <https://doi.org/10.5334/dsj-2023-025>
- Jankowski, J., Ressler, S., Sons, K., Jung, Y., Behr, J., & Slusallek, P. (2013). Declarative integration of interactive 3D graphics into the world-wide web: Principles, current approaches, and research agenda. *Proceedings of the 18th International Conference on 3D Web Technology*, 39–45. <https://doi.org/10.1145/2466533.2466547>
- Jiang, N., Cui, Z., & Tan, P. (2013). A Global Linear Method for Camera Pose Registration. *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, 481–488. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.66>
- Kamin, D. (2017). Mid-Century Visions, Programmed Affinities: The Enduring Challenges of Image Classification. *Journal of Visual Culture*, 16(3), 310–336. <https://doi.org/10.1177/1470412917739739>
- Kamran-Pishhesari, A., Moniri-Morad, A., & Sattarvand, J. (2024). Applications of 3D Reconstruction in Virtual Reality-Based Teleoperation: A Review in the Mining Industry. *Technologies*, 12(3) <https://doi.org/10.3390/technologies12030040>
- Karatas, T., & Lombardo, V. (2020). A Multiple Perspective Account of Digital Curation for Cultural Heritage: Tasks, Disciplines and Institutions. In *Adjunct Publication of the 28th ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, (UMAP '20 Adjunct). Association for Computing Machinery, New York, USA, 325–332. <https://doi.org/10.1145/3386392.3399277>
- Kassimi, M. A., & Beqqali, O. (2011). 3D Model Classification and Retrieval Based on Semantic and semantic And Ontology. *IJCSI*. 8.
- Kelly, E. J. (2019). Digital Cultural Heritage and Wikimedia Commons Licenses: Copyright or Copywrong? *Journal of Copyright in Education & Librarianship*, 3(3) <https://doi.org/10.17161/jcel.v3i3.9771>
- Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkuehler, T., & Drettakis, G. (2023). 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *ACM Trans. Graph.*, 42(4), 139:1-139:14. <https://doi.org/10.1145/3592433>
- Kingsland, K. (2020). Comparative analysis of digital photogrammetry software for cultural heritage. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 18, e00157. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00157>
- Klapa, P., Mitka, B., & Zygmunt, M. (2017). Application of Integrated Photogrammetric and Terrestrial Laser Scanning Data to Cultural Heritage Surveying. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 95(3), 032007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/3/032007>
- Knazook, B., Murphy, J., Barner, K., Cassidy, K., Claeysens, S., Cortese, C., Manchester, E. J., Padilla, T., Reijerkerk, D., Robson, G., Schmidt, A., Sherratt, T., & Warren, M. (2023). *WorldFAIR Project (D13.2) Cultural Heritage Image Sharing Recommendations Report*. <https://zenodo.org/records/7897244>
- Koller, D., Frischer, B., & Humphreys, G. (2010). Research challenges for digital archives of 3D cultural heritage models. *J. Comput. Cult. Herit.*, 2(3), 7:1-7:17. <https://doi.org/10.1145/1658346.1658347>
- Kovanič, L., Topitzer, B., Pet'ovský, P., Blišťan, P., Gergel'ová, M. B., & Blišťanová, M. (2023). Review of Photogrammetric and Lidar Applications of UAV. *Applied Sciences*, 13(11) <https://doi.org/10.3390/app13116732>

Lannom, L., Broeder, D., & Manepalli, G. (2015). *RDA Data Type Registries Working Group Output*. <https://doi.org/10.15497/A5BCD108-ECC4-41BE-91A7-20112FF77458>

Lauria, G., Sineo, L., & Ficarra, S. (2022). A detailed method for creating digital 3D models of human crania: An example of close-range photogrammetry based on the use of Structure-from-Motion (SfM) in virtual anthropology. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 14(3), 42. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01502-9>

Lauro, V., & Lombardo, V. (2023a). *A Digital Data Curation-Based Photogrammetric Acquisition Methodology for Cultural Heritage, expanded with CIDOC CRM Compatibility: Protocol BeA-PG*. The Eurographics Association. <https://doi.org/10.2312/gch.20231169>

Lauro, V., & Lombardo, V. (2023b). The Cataloging and Conservation of Digital Survey in Archaeology: A Photogrammetry Protocol in the Context of Digital Data Curation. *Heritage*, 6(3) <https://doi.org/10.3390/heritage6030166>

Lehoczky, M., & Abdurakhmonov, Z. (2021). Present Software of photogrammetric processing of digital images. In Krüger, J. Niessner M. and Stückler, J., *Annual International Scientific Conference on Geoinformatics – GI 2021: “Supporting sustainable development by GIST”*. *E3S Web of Conferences*, 227, 04001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122704001>

Lengauer, S., Komar, A., Karl, S., Trinkl, E., Preiner, R., & Schreck, T. (2020). *Visual Exploration of Cultural Heritage Collections with Linked Spatiotemporal, Shape and Metadata Views*. The Eurographics Association. <https://diglib.eg.org:443/handle/10.2312/vmv20201196>

Leutenegger, S., Chli, M., & Siegwart, R. Y. (2011). BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints. *2011 International Conference on Computer Vision*, 2548–2555. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126542>

Liang, Y., Yang, Y., Fan, X., & Cui, T. (2023). Efficient and Accurate Hierarchical SfM Based on Adaptive Track Selection for Large-Scale Oblique Images. *Remote Sensing*, 15(5) <https://doi.org/10.3390/rs15051374>

Liu, F., Hindmarch, J., & Hess, M. (2023). A review of the cultural heritage linked open data ontologies and models. In G. Tucci, C. Balletti, V. Bonora, F. Fassi, A. Spanò, E. I. Parisi, M. Previtali, and G. Sammartano (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-M-2–2023*, 943–950. 29th CIPA Symposium “Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage. Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future”, 30 June 2023, Florence, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-943-2023>

Liu, Y., Zhang, H., Guo, H., & Xiong, N. N. (2018). A FAST-BRISK Feature Detector with Depth Information. *Sensors*, 18(11) <https://doi.org/10.3390/s18113908>

Lo Brutto M., (2016). I SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto) per il rilievo e il monitoraggio del territorio: stato dell’arte e applicazioni fotogrammetriche. Palermo, *GEOLOGI DI SICILIA*, 2/2015 (Anno XXXIII - Numero 2/2015), 21-33. <https://hdl.handle.net/10447/180660>

Lo Brutto, M., & Spera, M. (2011). *Sperimentazione di procedure automatiche in fotogrammetria close-range per il rilievo di Beni Culturali*. In Atti 15a Conferenza Nazionale ASITA Parma, ASITA, 2011 1427-1438) <https://iris.unipa.it/handle/10447/64462>.

López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018a). A Review of Heritage Building Information Modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 21 <https://doi.org/10.3390/mti2020021>

Lopez Menchero V. M. – Grande A., Seville Charter: V. M. Lopez Menchero - A. Grande, The principles of the Seville Charter, *Atti del convegno XXIII CIPA Symposium*, Prague, Czech Republic, 12-16 settembre 2011

- Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Luhmann, T., Chizhova, M., & Gorkovchuk, D. (2020). Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia. *Drones*, 4(3) <https://doi.org/10.3390/drones4030053>
- Luhmann, T., Fraser, C., & Maas, H.-G. (2016). Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006>
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2023). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Berlin, Boston, De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110607253>
- Lynch, C. A. (2003). Institutional Repositories: Essential Infrastructure for Scholarship In The Digital Age. *Portal: Libraries and the Academy*, 3(2), 327–336. <https://doi.org/10.1353/pla.2003.0039>
- Macgregor, G. (2023). Digital Repositories and Discoverability: Definitions and Typology. In Woolcott L., Shiri A. *Discoverability in Digital Repositories*. Routledge.
- McHenry, K., & Bajcsy, P. (2008). An overview of 3d data content, file formats and viewers. *National Center for Supercomputing Applications*, 1205, 22.
- Mackinnon, S. (2023). The Ontological Multiplicity of Digital Heritage Objects: 3D Modelling in the Cherish Project. *Heritage*, 6(2) <https://doi.org/10.3390/heritage6020076>
- Marziali, S., & Marziali, E. (2019). Focus-Stacking Technique in Macro-Photogrammetry. *Proceedings of the 22nd International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2017*.
- Masci, M. E., De Santis, A., Fernie, K., & Pletinckx, D. (2012). 3D in the CARARE project: Providing Europeana with 3D content for the archaeological and architectural heritage: The Pompeii case study. *VSM 2012 Conference 18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Milan, Italy, 2-5 September 2012, 227–234. <https://doi.org/10.1109/VSM.2012.6365929>
- Masenya, T. M. (2021). The use of metadata systems for the preservation of digital records in cultural heritage institutions. *Journal of the South African Society of Archivists*, 54, 55–70. <https://doi.org/10.4314/jsasa.v54i1.5>
- Massaccesi (2023) Da Bertrando di Saint-Geniès a Nicolò di Lussemburgo: l'area presbiteriale in mutazione tra prospettiva liturgica, arte e propaganda in Scaloni, C. (ed.) *Il Duomo di Udine. Storia e architettura tra Medioevo e Rinascimento*. Gaspari, Udine.
- Mauri, M., Pini, A., Ciminieri, D., & Ciuccarelli, P. (2013). Weaving data, slicing views: A design approach to creating visual access for digital archival collections. *Proceedings of the Biannual Conference of the Italian Chapter of SIGCHI*, 1–8. <https://doi.org/10.1145/2499149.2499159>
- McAvoy, S., Ristevski, J., Rissolo, D., & Kuester, F. (2023). Openheritage3d: building an open visual archive for site scale giga-resolution lidar and photogrammetry data. In Tucci G., Balletti C., Bonora V., Fassi F., Spanò A., Parisi E. I., Previtali M., and Sammartano G (edited by). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-M-1-2023, 215–222. 29th CIPA Symposium «Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage. Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future» - 25-30 June 2023, Florence, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-M-1-2023-215-2023>

- McCarthy, J. (2014). Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *Journal of Archaeological Science*, 43, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.01.010>
- McCool, M. D., & Heidrich, W. (1999). Texture shaders. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*, 117–126. <https://doi.org/10.1145/311534.311585>
- McKenzie, P. J. (2003). A model of information practices in accounts of everyday-life information seeking. *Journal of Documentation*, 59(1), 19–40. <https://doi.org/10.1108/00220410310457993>
- McQuilton, P., Hodson, S., Lawrence, R., Sansone, S.-A., & FAIRsharing Registry: Connecting Data Policies, Standards and Databases RDA WG. (2019). The FAIRsharing Registry and Recommendations: Interlinking Standards, Databases and Data Policies (Version 1). Research Data Alliance. <https://doi.org/10.15497/RDA00030>
- Menna, F., Nocerino, E., Remondino, F., Dellepiane, M., Callieri, M., & Scopigno, R. (2016). 3D digitization of an heritage masterpiece - a critical analysis on quality assessment. In L. Halounova, V. Šafář, F. Remondino, J. Hodač, K. Pavelka, M. Shortis, F. Rinaudo, M. Scaioni, J. (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5*, 675–683. XXIII ISPRS Congress, Commission V (Volume XLI-B5) – 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-675-2016>
- Meyer, É., Grussenmeyer, P., Perrin, J.-P., Durand, A., & Drap, P. (2007a). A web information system for the management and the dissemination of Cultural Heritage data. *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.07.003>
- Micheletti, N. Chandler, J.; Lane, S. N. (2015). Structure from motion (SfM) photogrammetry. In Clarke, L.E. and Nield, J.M. (edited by) *Geomorphological Techniques Loughborough University*. Journal contribution. London: British Society for Geomorphology. <https://hdl.handle.net/2134/17493>
- Mildenhall, B., Srinivasan, P. P., Tancik, M., Barron, J. T., Ramamoorthi, R., & Ng, R. (2021). NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. *Commun. ACM*, 65(1), 99–106. <https://doi.org/10.1145/3503250>
- Mohr data management specialist, A. H., Bishoff, J., Bishoff, C., Braun, S., Storino, C., & Johnston, L. R. (2015). When Data Is a Dirty Word: A Survey to Understand Data Management Needed by Across Diverse Research Disciplines. *Bulletin of the Association for Information Science and Technology*, 42(1), 51–53. <https://doi.org/10.1002/bul2.2015.1720420114>
- Moore, J. A., Rountrey, A., & Kettler, H. S. (2022). *3D Data Creation to Curation: Community Standards for 3D Data Preservation*. Chicago, Illinois, Association of College & Research Libraries., 2022
- Moore, R., Stotzka, R., Cacciari, C., & Benedikt, P. (2015). Practical policy (1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.15497/83E1B3F9-7E17-484A-A466-B3E5775121CC>
- Moretti, A., Heibi, I., & Peroni, S. (2024). A Workflow for GLAM Metadata Crosswalk. arXiv preprint arXiv:2405.02113.
- Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., Bienvenido-Huertas, D., & Marín-García, D. (2020). Validation of Close-Range Photogrammetry for Architectural and Archaeological Heritage: Analysis of Point Density and 3D Mesh Geometry. *Remote Sensing*, 12(21), <https://doi.org/10.3390/rs12213571>
- Münster, S. (2013). Workflows and the role of images for virtual 3d reconstruction of no longer extant historic objects. Grussenmeyer P. *Isprs Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

Sciences, II-5-W1, 197–202. TC VXXIV International CIPA Symposium (Volume II-5/W1) – 2 - 6 September 2013, Strasbourg, France. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-197-2013>

Münster, S. (2023). Advancements in 3D Heritage Data Aggregation and Enrichment in Europe: Implications for Designing the Jena Experimental Repository for the DFG 3D Viewer. *Applied Sciences*, 13(17) <https://doi.org/10.3390/app13179781>

Münster, S., Apollonio, F. I., Bluemel, I., Fallavollita, F., Foschi, R., Grellert, M., Ioannides, M., Jahn, P. H., Kurdiovsky, R., Kuroczyński, P., Lutteroth, J.-E., Messemer, H., & Schelbert, G. (2024). *Handbook of Digital 3D Reconstruction of Historical Architecture* (Vol. 28). Switzerland Springer Nature <https://doi.org/10.1007/978-3-031-43363-4>

Münster, S., Hegel, W., & Kröber, C. (2016). A Model Classification for Digital 3D Reconstruction in the Context of Humanities Research. In Münster S., Pfarr-Harfst M., Kuroczyński P., & Ioannides M. (edited by), *3D Research Challenges in Cultural Heritage II* (3–31). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47647-6_1

Münster, S., Kröber, C., Hegel, W., Pfarr-Harfst, M., Prectel, N., Uhlemann, R., & Henze, F. (2016b). First Experiences of Applying a Model Classification for Digital 3D Reconstruction in the Context of Humanities Research. In M. Ioannides, E. Fink, A. Moropoulou, M. Hagedorn-Saupe, A. Fresa, G. Liestøl, V. Rajcic, & P. Grussenmeyer (edited by), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection* (477–490). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_37

Munzner, T. (2014). *Visualization Analysis and Design*. A K Peters/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17511>

Murtiyoso, A., Koehl, M., Grussenmeyer, P., & Freville, T. (2017). Acquisition and processing protocols for uav images: 3d modeling of historical buildings using photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2-W2, 163–170. ICOMOS/ISPRS International Scientific Committee on Heritage Documentation (CIPA) 26th International CIPA Symposium & Digital Workflows for Heritage Conservation - 28 August–1 September 2017, Ottawa, Canada. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-163-2017>

Nappi, M. L., Buono, M., Chivăran, C., & Giusto, R. M. (2024). Models and tools for the digital organisation of knowledge: Accessible and adaptive narratives for cultural heritage. *Heritage Science*, 12(1), 112. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01219-z>

Näslund, A. (2024). Image metadata. From information management to interpretative practice. *Museum Management and Curatorship*, 39(4), 398–418. <https://doi.org/10.1080/09647775.2022.2073562>

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>

Niccolucci, F. (2017). Extending, mapping, and focusing the CIDOC CRM. *International Journal on Digital Libraries*, 18(4), 251–252. <https://doi.org/10.1007/s00799-016-0198-y>

Niccolucci, F., Meghini, C., Felicetti, A., & Pezzati, L. (2018). Condivisione dei dati sui beni culturali: DIGILAB, l'esperienza di ARIADNE e di E-RIHS. In *Conferenza GARR_17 Selected papers*. GARR. <https://doi.org/10.26314/GARR-Conf17-proceedings-24>

Nicolae, C., Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). Photogrammetry applied to Problematic artefacts. In F. Remondino and F. Menna (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL–5, 451–456. ISPRS Technical Commission V Symposium - 25 June 2014, Riva del Garda, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-451-2014>

- Nocerino, E., Lago, F., Morabito, D., Remondino, F., Porzi, L., Poiesi, F., Rota Bulo, S., Chippendale, P., Locher, A., Havlena, M., Van Gool, L., Eder, M., Fötschl, A., Hilsmann, A., Kausch, L., & Eisert, P. (2017). A smartphone-based 3d pipeline for the creative industry the replicate eu project. Aguilera D., Georgopoulos A, T. Kersten, Remondino F., Stathopoulou E., *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2-W3*, 535–541. TC II & CIPA3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (Volume XLII-2/W3) - 3 March 2017, Nafplio, Greece. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-535-2017>
- RLG/OCLC Working Group on Digital Archive Attributes, Research Libraries Group, & OCLC. (2002). *Trusted digital repositories: Attributes and responsibilities: an RLG-OCLC report*. RLG. Mountain View, CA, May 2002 <https://www.oclc.org>
- Oldman, D., De Doerr, M., De Jong, G., Norton, B., & Wikman, T. (2014). Realizing Lessons of the Last 20 Years: A Manifesto for Data Provisioning and Aggregation Services for the Digital Humanities (A Position Paper) System. *D-Lib Magazine*, 20(7/8). <https://doi.org/10.1045/july2014-oldman>
- Orihuela, A., & Molina-Fajardo, M. A. (2021). UAV Photogrammetry Surveying for Sustainable Conservation: The Case of Mondújar Castle (Granada, Spain). *Sustainability*, 13(1) <https://doi.org/10.3390/su13010024>
- Padfield, J. (2024). *E-RIHS IP D.5.2 Data Management Plan for E-RIHS ERIC*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12607922>
- Palomar, I. J., García Valdecabres, J. L., Tzortzopoulos, P., & Pellicer, E. (2020). An online platform to unify and synchronise heritage architecture information. *Automation in Construction*, 110, 103008. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103008>
- Paris L. (2012) Fotogrammetria e/o fotomodellazione. - *STAMPA*. (2), 55-62
- Peinado-Santana, S., Hernández-Lamas, P., Bernabéu-Larena, J., Cabau-Anchuelo, B., & Martín-Caro, J. A. (2021). Public Works Heritage 3D Model Digitisation, Optimisation and Dissemination with Free and Open-Source Software and Platforms and Low-Cost Tools. *Sustainability*, 13(23) <https://doi.org/10.3390/su132313020>
- Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. (2020). Desktop vs cloud computing software for 3D measurement of building façades: The monastery of San Martín Pinario. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 149, 106984. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106984>
- Pepe, M., Alfio, V. S., Costantino, D., & Scaringi, D. (2022). Data for 3D reconstruction and point cloud classification using machine learning in cultural heritage environment. *Data in Brief*, 42, 108250. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108250>
- Peroni, S., & Shotton, D. (2020). OpenCitations, an infrastructure organization for open scholarship. *Quantitative Science Studies*, 1(1), 428–444. https://doi.org/10.1162/qss_a_00023
- Peters, I., Kraker, P., Lex, E., Gumpenberger, C., & Gorraiz, J. I. (2017). Zenodo in the Spotlight of Traditional and New Metrics. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 2, 13. <https://doi.org/10.3389/frma.2017.00013>
- Peursen, W. V. (2011). Text Comparison And Digital Creativity: An Introduction. In *Text Comparison and Digital Creativity* (1–27). https://brill.com/display/book/edcoll/9789004190078/Bej.9789004188655.i-328_002.xml
- Pfarr-Harfst, M. (2016). Typical Workflows, Documentation Approaches and Principles of 3D Digital Reconstruction of Cultural Heritage. In S. Münster, M. Pfarr-Harfst, P. Kuroczyński, & M. Ioannides (Edited

- by), *3D Research Challenges in Cultural Heritage II* (32–46). Springer Cham International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47647-6_2
- Piemonte, A., Caroti, G., Martínez-Espejo Zaragoza, I., Fantini, F., & Cipriani, L. (2018). A Methodology for Planar Representation of Frescoed Oval Domes: Formulation and Testing on Pisa Cathedral. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(8) <https://doi.org/10.3390/ijgi7080318>
- Ponchio, F., & Dellepiane, M. (2015). Fast decompression for web-based view-dependent 3D rendering. *Proceedings of the 20th International Conference on 3D Web Technology*, 199–207. <https://doi.org/10.1145/2775292.2775308>
- Poroykov, A., Pechinskaya, O., Shmatko, E., Eremin, D., & Sivov, N. (2023). An Error Estimation System for Close-Range Photogrammetric Systems and Algorithms. *Sensors*, 23(24) <https://doi.org/10.3390/s23249715>
- Ponchio F., & Potenziani, M. & Dellepiane, M. & Callieri M. & Scopigno, R. (2016). ARIADNE Visual Media Service: Easy Web Publishing of Advanced Visual Media. In Campana S., Scopigno R., Carpentiero G., CAA2015. *Keep The Revolution Going Proceedings of the 43rd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*
- Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., Ponchio, F., & Scopigno, R. (2015). 3DHOP: 3D Heritage Online Presenter. *Computers & Graphics*, 52, 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.07.001>
- Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., & Scopigno, R. (2018). Publishing and Consuming 3D Content on the Web: A Survey. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 10(4), 244–333. <https://doi.org/10.1561/06000000083>
- Potenziani, M., Callieri, M., & Scopigno, R. (2018). Developing and Maintaining a Web 3D Viewer for the CH Community: An Evaluation of the 3DHOP Framework. *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, 10 <https://doi.org/10.2312/GCH.20181356>
- Praveen, S., Chandra, U., & Wani, A. A. (2017). A Literature Review on Evolving Database. *International Journal of Computer Applications*, 162(9), 35–41.
- Rabby, A. S. A., & Zhang, C. (2024). *BeyondPixels: A Comprehensive Review of the Evolution of Neural Radiance Fields* (arXiv:2306.03000). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.03000>
- Rahaman, H. (2021). Photogrammetry: What, How, and Where. In E. M. Champion (edited by), *Virtual Heritage* (25–38). Ubiquity Press. <https://www.jstor.org/stable/j.ctv2dt5m8g.7>
- Rahaman, H., & Champion, E. (2019). To 3D or Not 3D: Choosing a Photogrammetry Workflow for Cultural Heritage Groups. *Heritage*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/heritage2030112>
- 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*, 13, e00102. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2019.e00102>
- Reggiani, P. (2022). I preparati zoologici di Ulisse Aldrovandi. *Aldrovandiana. Historical Studies in Natural History*, 1(2) <https://doi.org/10.30682/aldro2202a>
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Remondino, F., & Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI (5), 266–272. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000158067>

- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., & Menna, F. (2017a). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, 591–599. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>
- Remondino, F., Nocerino, E., Toschi, I., & Menna, F. (2017b). A critical review of automated photogrammetric processing of large datasets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W5, 591–599. ICOMOS/ISPRS International Scientific Committee on Heritage Documentation (CIPA) 26th International CIPA Symposium – Digital Workflows for Heritage Conservation (Volume XLII-2/W5) - 28 August–1 September 2017, Ottawa, Canada. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-591-2017>
- Remondino, F., Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014). State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29(146), 144–166. <https://doi.org/10.1111/phor.12063>
- Confederation of Open Access Repositories. (2022). COAR Community Framework for Good Practices in Repositories, Version 2 (Versione 2). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7108101>
- Richards, J. D. (2017). Twenty Years Preserving Data: A View from the United Kingdom. *Advances in Archaeological Practice*, 5(3), 227–237. <https://doi.org/10.1017/aap.2017.11>
- Richards-Rissetto, H., & von Schwerin, J. (2017a). A catch 22 of 3D data sustainability: Lessons in 3D archaeological data management & accessibility. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 6, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2017.04.005>
- Rickards, L., Vardigan, M., Diepenbroek, M., Dillo, I., Genova, F., L'hours, H., Hugo, W., Khodiyar, V., Li, G., Minster, J.-B., Trilsbeek, P., Wyborn, L., Edmunds, R., Mokrane, M., & Panagou, E. (2016). *DSA–WDS Partnership Working Group Catalogue of Common Procedures for Certification*. <https://doi.org/10.15497/RDA00019>
- Riley, J. (2017). *Understanding Metadata: What is Metadata, and What is it For?* UNT Digital Library; National Information Standards Organization (U.S.). <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc990983/>
- Rodrigues, J., & Lopes, C. T. (2022). Solutions for Data Sharing and Storage: A Comparative Analysis of Data Repositories. In G. Silvello, O. Corcho, P. Manghi, G. M. Di Nunzio, K. Golub, N. Ferro, & A. Poggi (Edited by), *Linking Theory and Practice of Digital Libraries* (512–517). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16802-4_55
- Romanoni, A., & Matteucci, M. (2019). TAPA-MVS: Textureless-Aware PATCHMATCH Multi-View Stereo. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 10412–10421. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.01051>
- Rong, F., Xie, D., Zhu, W., Shang, H., & Song, L. (2021). A Survey of Multi View Stereo. *2021 International Conference on Networking Systems of AI (INSAI)*, 129–135. 2021 International Conference on Networking Systems of AI (INSAI). <https://doi.org/10.1109/INSAI54028.2021.00033>
- Sande, M. V., Verborgh, R., Hochstenbach, P., & Sompel, H. V. de. (2018). Toward sustainable publishing and querying of distributed Linked Data archives. *Journal of Documentation*, 74(1), 195–222. <https://doi.org/10.1108/JD-03-2017-0040>
- Sapirstein, P. (2018). A high-precision photogrammetric recording system for small artifacts. *Journal of Cultural Heritage*, 31, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.10.011>
- Saponaro, M., Capolupo, A., Caporusso, G., Borgogno Mondino, E., & Tarantino, E. (2020). Predicting the accuracy of photogrammetric 3d reconstruction from camera calibration parameters through a multivariate statistical approach. In N. Paparoditis, C. Mallet, F. Lafarge, F. Remondino, I. Toschi, and T. Fuse (edited by)

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2020, 479–486. XXIV ISPRS Congress, Commission II (Volume XLIII-B2-2020) - 2020 edition. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-479-2020>

Savolainen, R. (1995). Everyday life information seeking: Approaching information seeking in the context of “way of life”. *Library & Information Science Research*, 17(3), 259–294. [https://doi.org/10.1016/0740-8188\(95\)90048-9](https://doi.org/10.1016/0740-8188(95)90048-9)

Scalon, C. (ed.) *Il Duomo di Udine. Storia e architettura tra Medioevo e Rinascimento*. Gaspari, Udine (2023).

Scharstein, D., & Szeliski, R. (2002). A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1), 7–42. <https://doi.org/10.1023/A:1014573219977>

Schindler, K., & Förstner, W. (2020). Photogrammetry. In *Computer Vision: A Reference Guide* (1–3). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_139-1

Schönberger, J. L., Zheng, E., Frahm, J.-M., & Pollefeys, M. (2016). Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo. In B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, & M. Welling (edited by), *Computer Vision – ECCV 2016* (501–518). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46487-9_31

M. Schuetz. (2015) *Rendering large point clouds in web browsers*. Central European Seminar on Computer Graphics.

Scopigno, R. (2021). Mixing Visual Media for Cultural Heritage. In M. Shehade & T. Stylianou-Lambert (edited by), *Emerging Technologies and the Digital Transformation of Museums and Heritage Sites* (297–315). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83647-4_20

Scopigno, R., Callieri, M., Dellepiane, M., Ponchio, F., & Potenzi, M. (2017). Delivering and using 3D models on the web: Are we ready? *Virtual Archaeology Review*, 8(17) <https://doi.org/10.4995/var.2017.6405>

Sebar, L. E., Angelini, E., Grassini, S., Parvis, M., & Lombardo, L. (2020). A trustable 3D photogrammetry approach for cultural heritage. *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC43012.2020.9129480>

Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., & Szeliski, R. (2006). A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, 1, 519–528. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.19>

Sharma, P. (2022). “Digital Repository: Need of Modern Libraries /Emerging trends of Modern libraries. *International Journal of CurrentResearch*, 14, (10)

Sheehan, B. (2015). Comparing Digital Archaeological Repositories: tDAR Versus Open Context. *Behavioral & Social Sciences Librarian*, 34(4), 173–213. <https://doi.org/10.1080/01639269.2015.1096155>

Shin, H., Im, S., & Lee, J. (2023). Heritage data visualisation service for museum stakeholders. In G. Tucci, C. Balletti, V. Bonora, F. Fassi, A. Spanò, E. I. Parisi, M. Previtali, and G. Sammartano (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-M-2-2023*, 1465–1472. 29th CIPA Symposium “Documenting, Understanding, Preserving Cultural Heritage. Humanities and Digital Technologies for Shaping the Future” - 25–30 June 2023, Florence, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1465-2023>

Shneiderman, B. (1996). The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. *Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages*, 336–343. <https://doi.org/10.1109/VL.1996.545307>

- Silva, A. L., & Terra, A. L. (2024). Cultural heritage on the Semantic Web: The Europeana Data Model. *IFLA Journal*, 50(1), 93–107. <https://doi.org/10.1177/03400352231202506>
- Sinha, S. N. (2020). Multiview Stereo. In *Computer Vision: A Reference Guide* (1–9). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03243-2_203-1
- Smale, N., Denyer, G., Unsworth, K., Magatova, E., & Barr, D. (2020). A review of the history, advocacy and efficacy of data management plans. *International Journal of Digital Curation*. <https://doi.org/10.2218/ijdc.v15i1.525>
- Smale, N., Unsworth, K., Denyer, G., & Barr, D. (2018). *The History, Advocacy and Efficacy of Data Management Plans* (443499). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/443499>
- Snow, J. C., & Culham, J. C. (2021). The Treachery of Images: How Realism Influences Brain and Behavior. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(6), 506–519. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.02.008>
- Spanò, A., Bonfanti, C., Chiabrando, F., & Pellegrino, M. (2012). La fotogrammetria digitale per la descrizione delle strutture architettoniche; rilievo della forma e delle alterazioni. In D'andria, F., Caggia, M.P., Ismaelli, T. (edited by), *Hierapolis di Frigia V. Le attività delle campagne di scavo e restauro 2004-2006, Istanbul 2012*. <https://hal.science/hal-01205795>
- Spanò, A. T., Bonfanti, C., Chiabrando, F., & Pellegrino, M. (2012). *La fotogrammetria digitale per la descrizione delle strutture architettoniche; rilievo della forma e delle alterazioni*. TUR. <https://iris.polito.it/handle/11583/1993803>
- Statham, N. (2019). Scientific rigour of online platforms for 3D visualization of heritage. *Virtual Archaeology Review*, 10(20) <https://doi.org/10.4995/var.2019.9715>
- Stathopoulou, E. K., & Remondino, F. (2023). A survey on conventional and learning-based methods for multi-view stereo. *The Photogrammetric Record*, 38(183), 374–407.
- Stathopoulou, E.-K., & Remondino, F. (2019). Multi-view stereo with semantic priors. D. Gonzalez-Aguilera, F. Remondino, I. Toschi, P. Rodriguez-Gonzalvez, and E. Stathopoulou (edited by) *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W15, 1135–1140. 27th CIPA International Symposium “Documenting the past for a better future” (Volume XLII-2/W15) - 1–5 September 2019, Ávila, Spain. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1135-2019>
- Storeide, M. S. B., George, S., Sole, A., & Hardeberg, J. Y. (2023). Standardization of digitized heritage: A review of implementations of 3D in cultural heritage. *Heritage Science*, 11(1), 249. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01079-z>
- Szeliski, R. (2022). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9>
- Tang, Y., Cerasoni, J. N., & Hallett, E. Y. (2022). *High Resolution «DIY» Photogrammetry—'HRP' Protocol*. <https://www.protocols.io/view/high-resolution-34-diy-34-photogrammetry-39-hrp-39-b53xq8pn>
- Tareen, S. A. K., & Saleem, Z. (2018). A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK. *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies Sukkur, Pakistan, 2018*, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICOMET.2018.8346440.
- Tewari, A., Thies, J., Mildenhall, B., Srinivasan, P., Tretschk, E., Yifan, W., Lassner, C., Sitzmann, V., Martin-Brualla, R., Lombardi, S., Simon, T., Theobalt, C., Nießner, M., Barron, J. T., Wetzstein, G., Zollhöfer, M., & Golyanik, V. (2022). Advances in Neural Rendering. *Computer Graphics Forum*, 41(2), 703–735. <https://doi.org/10.1111/cgf.14507>

- Tucci, G., Parisi, E. I., Bonora, V., Fiorini, L., Conti, A., Corongiu, M., Ortiz-Sanz, J. P., Gil-Docampo, M., Rego-Sanmartín, T., & Arza-García, M. (2020). Improving quality and inclusive education on photogrammetry: new teaching approaches and multimedia supporting materials. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B5-2020, 257–264. XXIV ISPRS Congress, Commission V and Youth Forum (Volume XLIII-B5-2020) - 2020 edition. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2020-257-2020>
- Tucci, G., Parisi, E. I., Conti, A., Corongiu, M., Fiorini, L., & Panighini, F. (2019). EDUCATIONAL AND TRAINING EXPERIENCES IN GEOMATICS: TAILORED APPROACHES FOR DIFFERENT AUDIENCE. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W11, 1097–1104. GEORES 2019 2nd International Conference of Geomatics and Restoration (Volume XLII-2/W11); 10 May 2019, Milan, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-1097-2019>
- Tzitzikas, Y., Mountantonakis, M., Fafalios, P., & Marketakis, Y. (2022). CIDOC-CRM and Machine Learning: A Survey and Future Research. *Heritage*, 5(3) <https://doi.org/10.3390/heritage5030084>
- Vacca, G. (2019). OVERVIEW OF OPEN SOURCE SOFTWARE FOR CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4-W14, 239–245. FOSS4G 2019; Academic Track (Volume XLII-4/W14) –; 30 August 2019, Bucharest, Romania. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-239-2019>
- Verhoeven, G. (2016). Basics of photography for cultural heritage imaging. In Stylianidis E. & Remondino F. *3D recording, documentation and management of cultural heritage* (127–251). Caithness: Whittles Publishing. <http://hdl.handle.net/1854/LU-8050621>
- Verhoeven, G. J. (2017, agosto 29). Computer graphics meets image fusion. 26th International CIPA Symposium: Digital Workflows for Heritage Conservation (CIPA 2017), Ottawa, Canada. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.886541>
- Verykokou, S., & Ioannidis, C. (2018). A photogrammetry-based structure from motion algorithm using robust iterative bundle adjustment techniques. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-4-W6, 73–80. 13th 3D GeoInfo Conference 2018 (Volume IV-4/W6) 2 October 2018, Delft, The Netherlands. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W6-73-2018>
- Verykokou, S., & Ioannidis, C. (2023). An Overview on Image-Based and Scanner-Based 3D Modeling Technologies. *Sensors*, 23(2) <https://doi.org/10.3390/s23020596>
- Verykokou, S., Soile, S., Bourexis, F., Tokmakidis, P., Tokmakidis, K., & Ioannidis, C. (2021). A Comparative Analysis of Different Software Packages for 3D Modelling of Complex Geometries. M. Ioannides, E. Fink, L. Cantoni, & E. Champion (edited by), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection* (228–240). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73043-7_19
- Villanueva, R. M., Sancho, P., & AD&D 4D. (2022). *Ermita del Calvari, Sumacàrcer—Proyecto de digitalización integral 2D, 3D, 4D* [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7350833>
- Vlachidis, A., Bikakis, A., Kyriaki-Manessi, D., Triantafyllou, I., & Antoniou, A. (2017). The CrossCult Knowledge Base: A Co-inhabitant of Cultural Heritage Ontology and Vocabulary Classification. In M. Kirikova, K. Nørnvåg, G. A. Papadopoulos, J. Gamper, R. Wrembel, J. Darmont, & S. Rizzi (Edited by), *New Trends in Databases and Information Systems* (353–362). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67162-8_35
- Wackrow, R., & Chandler, J. H. (2008). A convergent image configuration for DEM extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model. *The Photogrammetric Record*, 23(121), 6–18. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2008.00467.x>

- Walsh, D., & Hall, M. (2015). Just looking around: Supporting casual users initial encounters with Digital Cultural Heritage. *CEUR Workshop Proceedings*, 1338. http://ceur-ws.org/Vol-1338/paper_6.pdf
- Walsh, D., & Hall, M. M. (2015). *Just looking around: Supporting casual users initial encounters with Digital Cultural Heritage*. Poster session presented at Proceedings of the First International Workshop on Supporting Complex Search Tasks at ECIR 2015, Vienna, Austria. http://ceur-ws.org/Vol-1338/paper_6.pdf
- Ware, C. (2004). *Information visualization: Perception for design*. San Francisco, Morgan Kaufman. <http://archive.org/details/informationvisua0000ware>
- Webb, E. K., Robson, S., & Evans, R. (2020). Quantifying depth of field and sharpness for image-based 3d reconstruction of heritage objects. In Paparoditis N., Mallet C., Lafarge F., Remondino F., Toschi I., and Fuse T. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2020*, 911–918. XXIV ISPRS Congress, Commission II (Volume XLIII-B2-2020) - 2020 edition. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-911-2020>
- Weigel, T., Di Lauro, T., & Zastrow, T. (2015). *PID Information Types WG final deliverable*. <https://doi.org/10.15497/FDAA09D5-5ED0-403D-B97A-2675E1EBE786>
- Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D., & Haala, N. (2013). Image acquisition and model selection for multi-view stereo. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5-W1*, 251–258. WG V/4 3D-ARCH 2013 – 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures (Volume XL-5/W1) - 26 February 2013, Trento, Italy. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-251-2013>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, Ij. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Williams, M., Bagwell, J., & Nahm Zozus, M. (2017). Data management plans: The missing perspective. *Journal of Biomedical Informatics*, 71, 130–142. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2017.05.004>
- Wilson, K., & Snavely, N. (2014). Robust Global Translations with 1DSfM. In D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, & T. Tuytelaars (edited by), *Computer Vision – ECCV 2014* (61–75). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10578-9_5
- Windhager, F., Federico, P., Mayr, E., Schreder, G., & Smuc, M. (2016). A Review of Information Visualization Approaches and Interfaces to Digital Cultural Heritage Collections. *Proceedings of the 9th Forum Media Technology (FMT2016)* (74–81). St. Pölten University of Applied Sciences, Institute of Creative Media/Technologies. <http://hdl.handle.net/20.500.12708/56893>
- Mayr, E., Federico, P., Miksch, S., Schreder, G., Smuc, M., & Windhager, F. (2016). Visualization of Cultural Heritage Data for Casual Users. In *Workshop on Visualization for the Digital Humanities* (4). 24-ott-2016 Baltimore, MD, USA <http://hdl.handle.net/20.500.12708/56535>
- Windhager, F., Federico, P., Schreder, G., Glinka, K., Dork, M., Miksch, S., & Mayr, E. (2019). Visualization of Cultural Heritage Collection Data: State of the Art and Future Challenges. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(6), 2311–2330. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2830759>
- Windhager, F., Mayr, E., Schreder, G., Smuc, M., Federico, P., & Miksch, S. (2016). Reframing Cultural Heritage Collections in a Visualization Framework of Space-Time Cubes. In *Proceedings of the 3rd HistoInformatics Workshop on Computational History (HistoInformatics 2016)*, 20–24. <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/55430>

- Woodford, C., Treloar, A., Leggott, M., Payne, K., Jones, S., Lopez Albacete, J., Madalli, D., Genova, F., Dharmawardena, K., Chibhira, N., Åkerström, W. N., Macneil, R., Nummerger, A., Pfeiffenberger, H., Tanifuji, M., Zhang, Q., Jones, N., Sesink, L., Wood-Charlson, E., & WG, R. G. I. M. (2023). *The Global Open Research Commons International Model, Version 1*. <https://doi.org/10.15497/RDA00099>
- Wu, S., & Feng, B. (2019). *Parallel SURF Algorithm for 3D Reconstruction*. 153–157. <https://doi.org/10.2991/smont-19.2019.34>
- Wu, T., Yuan, Y.-J., Zhang, L.-X., Yang, J., Cao, Y.-P., Yan, L.-Q., & Gao, L. (2024). Recent advances in 3D Gaussian splatting. *Computational Visual Media*, 10(4), 613–642. <https://doi.org/10.1007/s41095-024-0436-y>
- Xu, B., Zhang, L., Liu, Y., Ai, H., Wang, B., Sun, Y., & Fan, Z. (2021). Robust hierarchical structure from motion for large-scale unstructured image sets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 181, 367–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.09.019>
- Yu, J., Liu, Y., Zhang, Z., Gao, F., Gao, N., Meng, Z., & Jiang, X. (2022). High-accuracy camera calibration method based on coded concentric ring center extraction. *Optics Express*, 30(23), 42454–42469. <https://doi.org/10.1364/OE.470990>
- Zachar, P., Ostrowski, W., Płatek-Żak, A., & Kurczyński, Z. (2022). The Influence of Point Cloud Accuracy from Image Matching on Automatic Preparation of Training Datasets for Object Detection in UAV Images. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(11) <https://doi.org/10.3390/ijgi11110565>
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. <https://doi.org/10.1109/34.888718>
- Zheng, E., Dunn, E., Jojic, V., & Frahm, J.-M. (2014). PatchMatch Based Joint View Selection and Depthmap Estimation. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1510–1517. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.196>
- Zhou, L., Wu, G., Zuo, Y., Chen, X., & Hu, H. (2024). A Comprehensive Review of Vision-Based 3D Reconstruction Methods. *Sensors*, 24(7) <https://doi.org/10.3390/s24072314>
- Zhou, P. (2020). Towards a Sustainable Infrastructure for the Preservation of Cultural Heritage and Digital Scholarship. *Proceedings of the ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries in 2020*, 3–4. <https://doi.org/10.1145/3383583.3398497>
- Zoldoske, T. (2024). Metadata for Discovery. Planning for an Information Network. *Internet Archaeology*, 65. <https://doi.org/10.11141/ia.65.6>
- Žóltak, M., Trognitz, M., & Ďurčo, M. (2022). ARCHE Suite: A Flexible Approach to Repository Metadata Management. *CLARIN Annual Conference*, 190–199. <https://doi.org/10.3384/ecp18917>

Raccomandazioni, Report

CCSDS (Magenta Book) *Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS)*. *Recommended Practice*, Issue 2, CCSDS 650.0-M-2, ISO 14721:2012. Washington, DC: Consultative Committee for Space Data Systems, Giugno 2012.

CCSDS. (2020). *Reference model for an Open Archival Information System (OAIS)*. Magenta Book. CCSDS 650.0-M-3, Draft Recommended Practice, Issue 3, Consultative Committee for Space Data Systems October 2020

CCSDS (2024). *Reference model for an Open Archival Information System (OAIS)*. Magenta Book. CCSDS 650.0-M-3, Recommended Practice, Issue 3, Dicembre 2024
<https://public.ccsds.org/publications/refmodel.aspx>

Commission Recommendation of 27 October 2011 on the digitisation and online accessibility of cultural material and digital preservation, OJ L 283, 29.10.2011, 39–45 (2011/711/EU)
ELI: <http://data.europa.eu/eli/reco/2011/711/oj>

Commission staff working document on Common European Data Spaces, SWD (2024) 21 final, Brussels, 24.1.2024 <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/second-staff-working-document-data-spaces>

Confederation of Open Access Repositories. (2022). COAR Community Framework for Good Practices in Repositories, Version 2 (Versione 2). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7108101>

Commission Recommendation (EU) 2021/1970 of 10 November 2021 on a common European data space for cultural heritage C/2021/7953, OJ L 401, 12.11.2021, 5–16, (2021/1970/EU) ELI: <http://data.europa.eu/eli/reco/2021/1970/oj>

Commission Implementing Decision (EU) 2017/1358 of 20 July 2017 on the identification of ICT Technical Specifications for referencing in public procurement (Text with EEA relevance) C/2017/5055, OJ L 190, 21.7.2017, p. 16–19 ELI: http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2017/1358/oj

Council Recommendation of 20 December 2012 on the validation of non-formal and informal learning, OJ C 398, 22.12.2012, p. 1–5 (2012/C 398/01)
[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32012H1222\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32012H1222(01))

Directive (EU) 2020/1828 (Data Act) (Text with EEA relevance) PE/49/2023/REV/1 OJ L, 2023/2854, 22.12.2023, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2854/oj>

Directive 2014/24/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on public procurement and repealing Directive 2004/18/EC Text with EEA relevance OJ L 94, 28.3.2014, p. 65–242 ELI: <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/24/oj>

Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), EOSC Executive Board, Corcho, O., Eriksson, M., Kurowski, K., Ojsteršek, M., Choirat, C., Sanden, M. van de, & Coppens, F. (2021). *EOSC interoperability framework: Report from the EOSC Executive Board Working Groups FAIR and Architecture*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/620649>

Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), Brunet, P., De Luca, L., Hyvönen, E., Joffres, A., Plassmeyer, P., Pronk, M., Scopigno, R., & Sonkoly, G. (2022). *Report on a European collaborative cloud for cultural heritage: Ex – ante impact assessment*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/64014>

Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology (European Commission). (2022). *Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: Mapping parameters, formats,*

standards, benchmarks, methodologies, and guidelines: final study report (VIGIE 2020/654). Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2759/471776>

Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. *Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: Mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines: Annex 2 – Exemplifications of Complexity*, Publications Office of the European Union (2022).

Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage. (VIGIE 2020/654). ARC Humanities Press. <https://doi.org/10.1515/9781942401353>

European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Commission Implementing Decision (EU) 2017/1358 of 20 July 2017 on the identification of ICT Technical Specifications for referencing in public procurement http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2017/1358/oj

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Wareham, J. and Pujol Priego, L., Zenodo – Open science monitor case study, Publications Office, 2019, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/298228>;

Europeana Network Association Members Council – *Task Force report. 3D content in Europeana task force*. 27 Novembre 2019, versione 1.0, 7 gennaio 2020

Ministero della Cultura. *Linee guida per la digitalizzazione del patrimonio culturale | Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale*. Agenzia per l'Italia Digitale, 2022
<https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html>

Regulation (EU) 2023/2854 of the European Parliament and of the Council of 13 December 2023 on harmonised rules on fair access to and use of data and amending Regulation (EU) 2017/2394

Science Europe, (2021). *Practical Guide to the International Alignment of Research Data Management—Extended Edition*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4915862>

Sitografia

3D-ICONS <http://3dicons-project.eu/guidelines-and-case-studies/guidelines>

ACCADEMIA DELLA CRUSCA <https://accademiadellacrusca.it/>

BEARCHAEO (resource site) <https://bearchaeo.unito.it/omeka-s/s/bearchaeo-resources-site/page/welcome>

BEARCHAEO <https://bearchaeo.unito.it/>

CARARE <https://www.carare.eu/en/our-association/>

CHANGES <https://www.fondazionechanges.org/>

CIPA Heritage Documentation <https://www.cipaheritagedocumentation.org/>

CLARIN <https://www.clarin.eu/>

CLASSICAL ART RESEARCH CENTRE <https://www.carc.ox.ac.uk/carc/pottery>

CONFLUENCE CLOUD <https://europeana.atlassian.net/wiki/spaces>

CORDIS <https://cordis.europa.eu/project/id/101122956>

DARIAH <https://www.dariah.eu>

DOCS ITALIA (Piano nazionale di digitalizzazione del patrimonio culturale)
<https://docs.italia.it/italia/icdp/icdp-pnd-digitalizzazione-docs/it/v1.0-giugno-2022/index.html>

DOCS ITALIA <https://docs.italia.it/>

EOSC <https://eosc.eu/>

EUROPEANA PRO (Open and reusable digital cultural heritage) <https://pro.europeana.eu/page/open-and-reusable-digital-cultural-heritage>

EUROPEANA PRO (Share 3D Dashboard) <https://pro.europeana.eu/page/dashboard>

FAIRSHARING.ORG <https://fairsharing.org/search?page=1&recordType=repository>

GOFAIR <https://www.go-fair.org/>
 HISTORIC ENGLAND <https://historicengland.org.uk/advice/find/latest-guidance/>
 ICOMOS (1996). Principles for the recording of monuments, groups of buildings and sites. Sofia 11th ICOMOS General Assembly <https://www.icomos.org/en/charters-and-texts/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/387-principles-for-the-recording-of-monuments-groups-of-buildings-and-sites-1996>
 INCEPTION <https://www.inception-project.eu/en>
 NETWORK DIGITAAL ERFGOED <https://netwerkdigitaalerfgoed.nl/>
 OPEN DATA CHARTER <https://opendatacharter.org/>
 OPENAIR <https://explore.openaire.eu/participate/deposit/search>
 OPENDOAR <https://v2.sherpa.ac.uk/opendoar/about.html>
 RE3DATA.ORG <https://www.re3data.org/search?query>
 REGISTRY OF OPEN ACCESS REPOSITORIES <https://roar.eprints.org/>
 RESEARCH DATA ALLIANCE <https://www.rd-alliance.org/about-the-rda/>
 SHAPING EUROPE'S DIGITAL FUTURE (Basic principles and tips for 3D digitisation of cultural heritage) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/basic-principles-and-tips-3d-digitisation-cultural-heritage>
 SHAPING EUROPE'S DIGITAL FUTURE (Commission showcases a pan-European collection of emblematic 3D-digitised cultural heritage assets) <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-showcases-pan-european-collection-emblematic-3d-digitised-cultural-heritage-assets>
 SKETCHFAB BLOG <https://sketchfab.com/blogs/community/fab-publishing-portal-open-for-sketchfab-migration/>

Piattaforme e Repository

3D-ICONS <http://3dicons-project.eu/>
 3DHOP <https://3dhop.net/>
 ARCHAEOLOGY DATA SERVICE <https://archaeologydataservice.ac.uk/>
 ARIADNE PLUS www.ariadne-infrastructure.eu/
 ATON FRAMEWORK <https://osiris.itabc.cnr.it/aton/>
 AUSTRIAN CENTRE FOR DIGITAL HUMANITIES AND CULTURAL HERITAGE <https://arche.acdh.oeaw.ac.at/>
 CULTURA ITALIA (indice delle risorse) https://www.culturaitalia.it/indice-delle-risorse/?q=*%&cat=indice&language=it&pag=1
 CULTURA ITALIA <https://www.culturaitalia.it/>
 DATA ARCHIVING AND NETWORKED SERVICES <https://dans.knaw.nl/en/data-stations/>
 DATAVERSENL <https://dataverse.nl/>
 EUROPEANA (Results) <https://www.europeana.eu/en/search?page=1&qf=TYPE%3A%223D%22&query=&view=list>
 EUROPEANA <https://www.europeana.eu/it>
 FEDORA <https://www.fedoraproject.org/it/>
 INCEPTION <https://www.inception-project.eu/en>
 MYMINIFACTORY <https://www.myminifactory.com/>
 P3D.IN <https://p3d.in/>
 POTREE <https://potree.github.io/>
 SHARE – PRATICHE DI CULTURA AL DIGITALE <https://dicolab.it/share-pratiche-di-cultura-al-digitale/>
 SHARECG <https://www.sharecg.com/>
 SKETCHFAB <https://sketchfab.com/>
 SMITHSONIAN VOYAGER <https://smithsonian.github.io/dpo-voyager/>
 THE DIGITAL ARCHAEOLOGICAL RECORD (Guides to good practice) <https://archaeologydataservice.ac.uk/help-guidance/guides-to-good-practice/>
 THE DIGITAL ARCHAEOLOGICAL RECORD <https://www.tdar.org/about/>
 TURBOSQUID <https://www.turbosquid.com/>
 VISUAL MEDIA SERVICE <https://visual.ariadne-infrastructure.eu/>
 WIDEN EUROPEAN ACCESS TO CULTURAL COMMUNITIES VIA EUROPEANA <https://weave-3dviewer.com/>
 DSPACE <https://dspace.org/>

FIGSHARE <https://figshare.com/>
MORPHOSOURCE DOCUMENTATION
<https://duke.atlassian.net/wiki/spaces/MD/pages/274268722/Data+Deposit+Costs>
MORPHOSOURCE <https://www.morphosource.org/>
MORPHOSOURCE <https://www.morphosource.org/?locale=en>
ZENODO <https://zenodo.org/>

Software

3DFLOW <https://www.3dflow.net/it/>
3DSURVEY <https://3dsurvey.si/>
ADOBE <https://www.adobe.com/it/>
AGISOFT (Helpdesk Portal) <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000158119-what-does-camera-calibration-results-mean-in-metashape-#Example-of->
AGISOFT CLOUD <https://www.agisoft.com/features/cloud/>
AGISOFT <https://www.agisoft.com/>
ALICEVISION <https://alicevision.org/>
AUTODESK <https://www.autodesk.com/>
BENTLEY <https://it.bentley.com/>
BLENDER <https://www.blender.org/>
CLOUDCOMPARE <https://www.danielgm.net/cc/>
COLMAP <https://colmap.github.io/>
D-FLIGHT <https://www.d-flight.it/web-app/>
DJI <https://www.dji-store.it/dji-mavic-2/>
ECLIPSE THEIA <https://theia-ide.org/>
GOOGLE EARTH <https://www.google.it/intl/it/earth/index.html>
HEXAGON <https://hexagon.com/>
INSTANT MESHES <https://github.com/wjakob/instant-meshes>
KIRI ENGINE <https://www.kiriengine.app/>
MATLAB <https://it.mathworks.com/>
MESH LAB <https://www.meshlab.net/>
MICMAC <http://micmac.ensg.eu/>
OPENDRONEMAP <https://opendronemap.org/>
OPENMVG [openMVG documentation! — openMVG library](#)
PIX4D <https://www.pix4d.com/>
POLYCAM <https://poly.cam/>
PYTHON PHOTOGRAMMETRY TOOLBOX <https://github.com/decentropy/photogrammetry>
REALITY CAPTURE <https://www.capturingreality.com/>
REGARD3D <https://www.regard3d.org/>
UNREAL ENGINE <https://www.unrealengine.com/en-US>
VISUALSFM <http://ccwu.me/vsfm/>
WEBODM <https://opendronemap.org/webodm/>

Strumentazione

LEICA <https://leica-geosystems.com/it-it/>
MANFROTTO <https://www.manfrotto.com/>
MICROGEO <https://www.microgeo.it/>
NIKON D5500 <https://nikonimglib.com/it/products/196/D5500.html>
NIKON DSLR <https://www.nikonstore.it/macchine-fotografiche/fotocamere-dslr/>
SONY DSC-QX100 <https://www.sony.it/electronics/support/compact-cameras-dsc-qx-series/dsc-qx100/specifications>
SONY ILCE-6000 <https://www.sony.it/electronics/fotocamere-obiettivo-intercambiabile/ilce-6000-body-kit>
XRITE <https://www.xrite.com/>

Formati

.3MF <https://3mf.io/>
.GLTF <https://www.khronos.org/Gltf>
.JPEG <https://jpeg.org/>
.PNG <http://www.libpng.org/>
.STL https://www.fabbers.com/tech/STL_Format
.X3D <https://www.web3d.org/x3d/what-x3d>

Standard e specifiche

CIDOC CRM 7.2.4 <https://cidoc-crm.org/Version/version-7.2.4>
CIDOC CRM <https://cidoc-crm.org>.
CRMDIG V 4.0 <https://cidoc.mini.icom.museum/>
DUBLIN CORE <https://www.dublincore.org/specifications/dublin-core/>
EDM <https://pro.europeana.eu/page/edm-documentation>
<https://site2024.cidoc-crm.org/ModelVersion/version-4.0>
IPFS <https://docs.ipfs.tech/>
JAVASCRIPT <https://Web/JavaScript>
JSON <https://json-ld.org/>
NEXUS <https://vcg.isti.cnr.it/vcgtools/nexus/>
NODES <https://nodejs.org/en>
OPENCITATIONS DATA MODEL <https://opencitations.net/model>
OPEN-DATA-ACQUISITION-LAB <https://github.com/nfreire/data-aggregation-lab>
OPENGL <https://www.khronos.org/opengl/>
OWL <https://www.w3.org/OWL/>
PREMIS <https://www.loc.gov/standards/premis/>
PROV-O <https://www.w3.org/TR/prov-o/>
RDF 1.1. TURTLE <https://www.w3.org/TR/turtle/>
RDF 1.2 <https://www.w3.org/TR/rdf12-concepts/>
RDF <https://www.w3.org/RDF/>
RDF MAPPING LANGUAGE <https://rml.io/specs/rml/>
RDF SCHEMA 1.1 <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/>
SPARQL 1.1 <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>
SPIDERGL <https://github.com/dibenedetto/SpiderGL>
WEBGL <https://www.khronos.org/webgl/>
WEBSOCKET API <https://developer.mozilla.org/>
XML <https://www.w3.org/XML>.

Borsa di dottorato del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014IT16M2OP005), risorse FSE REACT-EU, Azione IV.4 “Dottorati e contratti di ricerca su tematiche dell’innovazione” e Azione IV.5 “Dottorati su tematiche Green.”

CUP: J35F21003040006