

drawing disegnare

n. 68
idee immagini
ideas images

Rivista semestrale del Dipartimento di Storia, disegno
e restauro dell'architettura – Sapienza Università di Roma
*Biannual Journal of the Department of History, representation
and restoration of architecture – Sapienza Rome University*

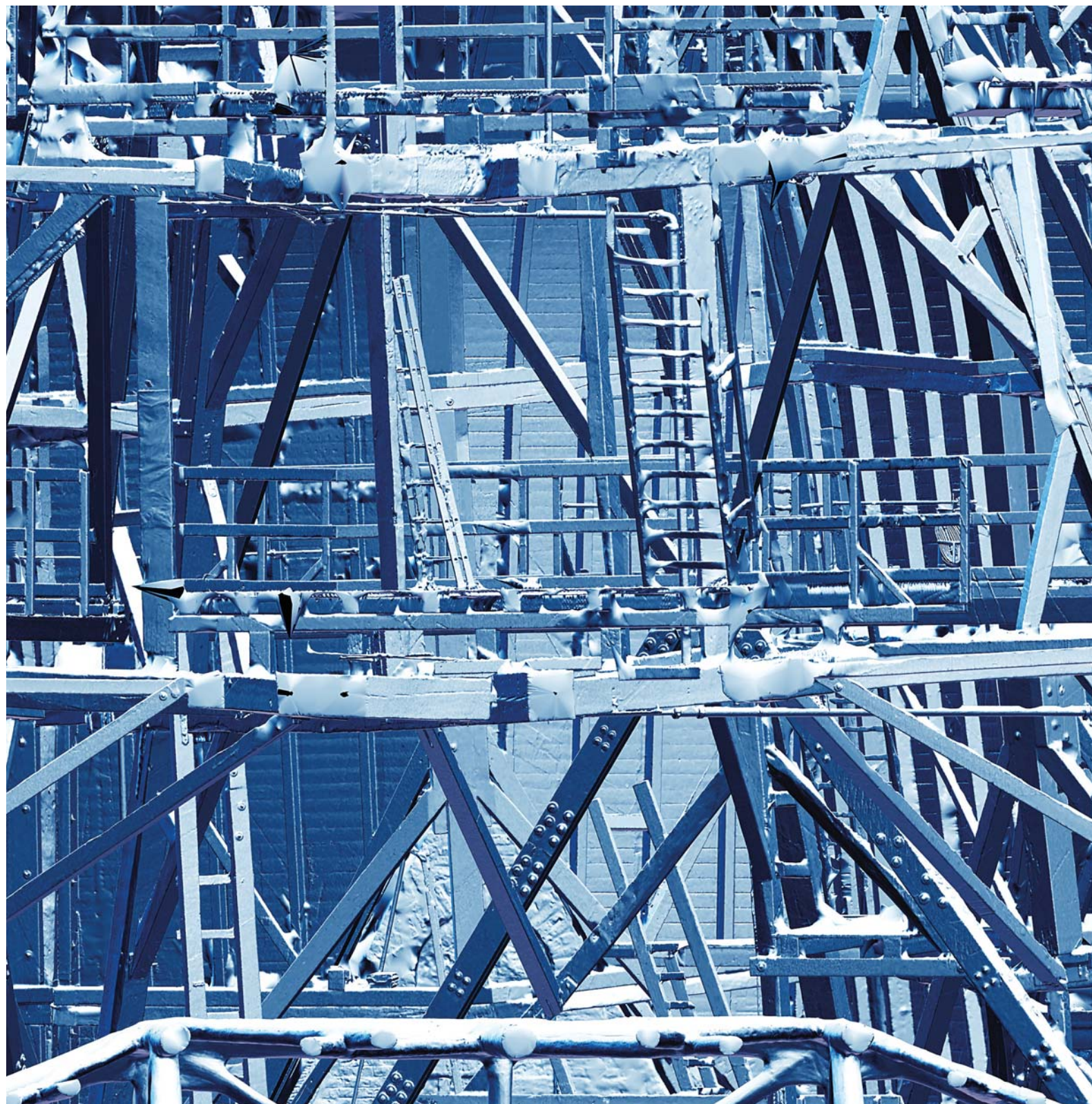
Worldwide distribution and digital version EBOOK
www.gangemeditore.it



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Anno XXXV, n. 68/2024
€ 15,00 - \$/£ 20.00

Full english text





<https://dsdra.web.uniroma1.it/it/disegnare-idee-immagini>



Rivista semestrale del Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura, pubblicata con il contributo di Sapienza Università di Roma
Biannual Journal of the Department of History, representation and restoration of architecture, published with the contribution of Sapienza Rome University

Registrazione presso il Tribunale di Roma
n. 00072 dell'11/02/1991

© proprietà letteraria riservata

GANGEMI EDITORE
INTERNATIONAL

via Giulia 142, 00186 Roma
tel. 0039 06 6872774 fax 0039 06 68806189

e-mail info@gangemieditore.it
catalogo on line www.gangemieditore.it

Le nostre edizioni sono disponibili in Italia e all'estero anche in versione ebook.
Our publications, both as books and ebooks, are available in Italy and abroad.

Un numero € 15,00 – estero € 20,00 / \$/£ 24.00
Arretrati € 30,00 – estero € 40,00 / \$/£ 48.00
Abbonamento annuo € 30,00 –
estero € 35,00 / \$/£ 45.00
One issue € 15,00 – Overseas € 20,00 / \$/£ 24.00
Back issues € 30,00 – Overseas € 40,00 / \$/£ 48.00
Annual Subscription € 30,00 –
Overseas € 35,00 / \$/£ 45.00

Abbonamenti/Annual Subscription

Versamento sul c/c postale n. 15911001
intestato a Gangemi Editore SpA
IBAN: IT 71 M 076 0103 2000 0001 5911 001
Payable to: Gangemi Editore SpA
post office account n. 15911001
IBAN: IT 71 M 076 0103 2000 0001 5911 001
BIC SWIFT: BPPIITRRXXX

Distribuzione/Distribution

Librerie in Italia e all'estero/
Bookstores in Italy and overseas
Emme Promozione e Messaggerie Libri Spa – Milano
e-mail: segreteria@emmepromozione.it
www.messaggerielibri.it

Edicole in Italia e all'estero/
Newsstands in Italy and overseas
Bright Media Distribution Srl
e-mail: info@brightmediadistribution.it

Abbonamenti/Annual Subscription

EBSCO Information Services
www.ebscohost.com

ISBN 978-88-492-5280-4
ISSN IT 1123-9247

Finito di stampare nel mese di giugno 2024
Gangemi Editore Printing

Direttore scientifico/Editor-in-Chief

Mario Docci
Sapienza Università di Roma
piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia
mario.docci@uniroma1.it

Direttore responsabile/Managing editor

Carlo Bianchini
Sapienza Università di Roma
piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia
carlo.bianchini@uniroma1.it

Comitato Scientifico/Scientific Committee

Alonzo Addison, *University of California, Berkeley, USA*
Piero Albinetti, *Sapienza Università di Roma, Italia*
Eduardo Antonio Carazo Lefort, *Universidad de Valladolid, Spagna*
Fabiana Carbonari, *Universidad de La Plata, Argentina*
Pilar Chías, *Universidad de Alcalá, Spagna*
Francis D.K. Ching, *Seattle, USA*
Livio De Luca, *CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique, Francia*
Marco Gaiani, *Università di Bologna, Italia*
Fernando Gandolfi, *Universidad de La Plata, Argentina*
Natalia Jorquera Silva, *Universidad del La Serena, Cile*
Joubert José Lancha, *Universidade de São Paulo, Brasile*
Cornelie Leopold, *Technische Universität Kaiserslautern, Germania*
Riccardo Migliari, *Sapienza Università di Roma, Italia*
Douglas Pritchard, *Robert Gordon University, Scozia*
Franco Purini, *Sapienza Università di Roma, Italia*
Mario Santana-Quintero, *Carleton University, Canada*

Comitato di Redazione/Editorial Staff

Laura Carlevaris (coordinatore)
Emanuela Chiavoni, Laura De Carlo,
Carlo Inglese, Alfonso Ippolito, Luca Ribichini

Staff edizione multimediale/Multimedia edition Staff

Marina Attenni, Adriana Caldarone, Flavia Camagni,
Marika Griffò, Sofia Menconero

Coordinamento editoriale e segreteria/Editorial coordination and secretarial services

Monica Filippa

Redazione/Editorial office

piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia
tel. 0039 6 49918890
disegnare@uniroma1.it

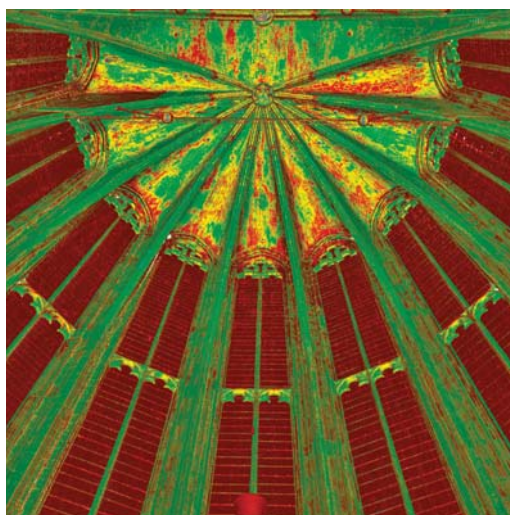
In copertina/Cover

Cattedrale di Aachen. Vista 3D delle strutture di sostegno della cupola esterna (elaborazione di Douglas Pritchard)
Aachen Cathedral. 3D model of the supporting structures of the outer dome (by Douglas Pritchard).

Anno XXXIV n. 68, giugno 2024

- 3 Editoriale di Mario Docci, Carlo Bianchini
La Cattedrale di Aachen, studi e ricerche
Editorial by Mario Docci, Carlo Bianchini
Aachen Cathedral, studies and research
- 7 Jan Richarz
L'importanza di un modello 3D per la Cattedrale di Aachen
The importance of a 3D model for Aachen Cathedral
- 12 Yannick Ley
L'evoluzione della Cattedrale di Aachen in sedici immagini
The evolution of Aachen Cathedral in sixteen figures
- 20 Douglas Pritchard
La documentazione della Cattedrale di Aachen: approcci integrati per la conservazione digitale utilizzando Terrestrial Laser Scanning e fotogrammetria
The documentation of Aachen Cathedral: integrated approaches for digital preservation using Terrestrial Laser Scanning and photogrammetry
- 38 Bruno Schindler
La geometria della Cappella Palatina di Aachen e il sistema di misurazione pratica applicato in cantiere
The geometry of the Aachen Palatine Chapel and the practical measurement system on the building site
- 56 Carlo Bianchini
Sulle unghie coniche della Cappella Palatina di Aachen
The conical vaults in the Palatine Chapel in Aachen
- 72 Martina Attenni, Roberto Barni, Marika Griffò
Sperimentazioni di Machine Learning per la mappatura della Cattedrale di Aachen
Machine Learning experiments for mapping Aachen Cathedral
- 90 Rilievo geometrico e architettonico: disegni tratti dal portfolio
Geometric and architectural survey: drawings from the portfolio

Cattedrale di Aachen. Vista texturizzata della nuvola
di punti del Coro gotico (elaborazione di Marika Griffò).
*Aachen Cathedral. Texturized view of the points cloud
of the Gothic Choir (by Marika Griffò).*





Douglas Pritchard

La documentazione della Cattedrale di Aachen: approcci integrati per la conservazione digitale utilizzando *Terrestrial Laser Scanning* e fotogrammetria

The documentation of Aachen Cathedral: integrated approaches for digital preservation using Terrestrial Laser Scanning and photogrammetry

<https://cdn.gangemieditore.com/DOI/10.61020/11239247-202468-04.pdf>

The digital documentation of Aachen Cathedral, a UNESCO World Heritage site of extraordinary historical significance, was achieved through the integration of advanced techniques (terrestrial laser scanning, terrestrial photogrammetry, and UAV-based photogrammetry). This approach enabled the creation of 3D models accurately representing the site's morphological and architectural characteristics. The workflow, developed over multiple campaigns, facilitated the collection of both exterior and interior data, their registration, and a complex post-production phase using advanced tools for data segmentation and optimization. Despite challenges related to managing large datasets and limited software interoperability, the results highlight the ability of modern technologies to provide powerful tools for digital preservation. The high precision and versatility of the research outputs make them indispensable for future interdisciplinary studies, relevant both to documentation and site management.

Keyword: Cultural Heritage, digital documentation, 3D models, conservation, data interoperability.

Information technologies and digital recording tools are becoming increasingly essential for monitoring, risk management, cultural education, maintenance facilitation, conservation development, and other activities at cultural heritage sites. This paper focuses on the practical planning and execution of the 3D recording project at the Aachen Cathedral World Heritage Site during 2023-2024. The multi-institutional recording project aimed to comprehensively document the building and the surrounding UNESCO precinct by employing various advanced recording technologies (fig. 1). The project aimed to create a highly detailed and comprehensive 2D and 3D dataset that would serve immediate requirements such as dimensional analysis, conservation planning, and public engagement while ensuring a high accuracy level to accommodate future unanticipated applications [Oliveira et al. 2014]. The Aachen Cathedral building and site are appropriate for this digital heritage research project. The unique structure spans various construction eras, such as Carolingian, Romanesque, Gothic, Baroque, and 19th-century, resulting in complex structural geometry, ornaments and surface textures.

La documentazione digitale della Cattedrale di Aachen, sito UNESCO di straordinaria rilevanza storica, è stata realizzata attraverso l'integrazione di tecniche avanzate (scansione laser terrestre, fotogrammetria terrestre e con UAV). L'approccio adottato ha permesso di creare modelli 3D rappresentativi delle caratteristiche morfologiche e architettoniche del sito. Il workflow, articolato in più campagne, ha consentito la raccolta di dati dell'esterno e dell'interno della Cattedrale, la loro registrazione e una complessa fase di post-produzione, con strumenti avanzati per la segmentazione e ottimizzazione dei dati. Nonostante le sfide legate alla gestione di dataset di grandi dimensioni e alla limitata interoperabilità tra software, i risultati evidenziano la capacità delle moderne tecnologie di fornire strumenti potenti per la conservazione digitale. L'alta precisione e versatilità dei prodotti della ricerca li rendono necessari per studi futuri e interdisciplinari, connessi tanto alla documentazione quanto alla gestione del sito.

Parole chiave: Patrimonio Culturale, documentazione digitale, modelli 3D, conservazione, interoperabilità dei dati.

Le tecnologie informatiche e gli strumenti di registrazione digitale stanno diventando sempre più essenziali per il monitoraggio, la gestione dei rischi, la divulgazione culturale, la facilitazione della manutenzione, la programmazione di interventi di conservazione e altre attività nei siti del patrimonio culturale. Il presente contributo si focalizza sulla progettazione e realizzazione dell'acquisizione 3D della Cattedrale di Aachen, sito Patrimonio dell'Umanità, durante il biennio 2023-2024. Il progetto di acquisizione, condotto da più istituzioni, mirava a documentare in modo completo l'edificio e l'area circostante, appartenente al patrimonio UNESCO, utilizzando diverse tecnologie di rilevamento avanzato (fig. 1). L'obiettivo era quello di creare un dataset 2D e 3D estremamente dettagliato e completo che rispondesse a esigenze immediate, come l'analisi dimensionale, la programmazione degli interventi di conservazione e il coinvolgimento del pubblico, garantendo al contempo un livello di precisione elevato per applicazioni future [Oliveira et al. 2014].

La Cattedrale di Aachen e il centro storico della città rappresentano un contesto ideale per questo progetto di ricerca sul patrimonio digitale. Infatti la struttura unica della Cattedrale abbraccia diverse epoche di costruzione, tra cui quella carolingia, romanica, gotica, barocca e del XIX secolo, con una geometria strutturale complessa, decorazioni e texture superficiali articolate. La metodologia di rilievo e le varie fasi delle attività di produzione forniscono un quadro replicabile per analoghi contesti di documentazione digitale.

Il progetto è il risultato di una collaborazione tra Sapienza Università di Roma (Italia), la Robert Gordon University (Scozia) e la

RWTH Aachen University (Germania), in collaborazione con la *Dombauhütte* Aachen. Il contributo costituisce un avanzamento di due precedenti pubblicazioni focalizzate sul processo di acquisizione e sullo studio di elementi caratteristici [Pritchard et al. 2023; Attenni et al. 2023].

Questo articolo prende in esame gli aspetti inerenti le tecniche di acquisizione e i metodi di post-elaborazione dei dati utilizzati nella Cattedrale di Aachen, riconoscendo l'importanza di un processo di documentazione completo che bilanci gli aspetti di natura tecnica con analisi storiche e semantiche. Mentre la qualità e la precisione sono fondamentali in un progetto di documentazione digitale, è altrettanto importante rispettare e connettersi al contesto culturale più ampio. Per tale motivo il gruppo di ricerca ha beneficiato di una collaborazione multidisciplinare con specialisti in diversi campi, tra cui rilievo digitale 3D, architettura, modellazione 3D, storia dell'architettura e conservazione dei monumenti. Questa collaborazione ha facilitato lo scambio di conoscenze, consentendo di identificare aree di interesse dell'edificio altrimenti non adeguatamente valorizzate.

Pianificazione del progetto

Un importante requisito identificato nella pubblicazione della Commissione Europea del 2020, *Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage*, è quello di stabilire il livello di dettaglio da raggiungere, le aree da documentare e la precisione dei dati già dalle prime fasi di progettazione del rilievo. Tuttavia, come precisato nella pubblicazione, «non esiste un quadro generalmente accettato per specificare il livello di dettaglio e i requisiti di precisione per i diversi tipi di

1/ Immagine da drone del tetto della Cattedrale, vista verso ovest (foto di Douglas Pritchard).

Drone photograph of the roof of the Cathedral looking west (photo by Douglas Pritchard).

registrazione geometrica dei monumenti. Ogni monumento viene documentato geometricamente sulla base delle specifiche di precisione e costi fornite o concordate con il proprietario o lo *stakeholder*» [European Commission 2022].

Lo studio della Commissione Europea elenca quattro categorie per la pianificazione e le fasi di produzione della digitalizzazione 3D di beni immobili. La prima riguarda la pianificazione del progetto e affronta le decisioni iniziali relative alla gestione e descrizione del progetto; la seconda riguarda l'attività di acquisizione dei dati in situ e comprende tutte le osservazioni e le scelte operative necessarie per avviare l'attività in campo, compreso il metodo tecnico di acquisizione dei dati; la terza riguarda la produzione e il rilascio dei dati: si concentra sulle problematiche della post-elaborazione digitale, convenzioni di denominazione, registrazione di metadati e paradati, e output/consegne mentre l'ultima riguarda l'archiviazione e descrive le procedure necessarie per il backup della produzione e l'archiviazione dei dati.

Il progetto di Aachen ha incorporato un approccio integrato per la raccolta dei dati, combinando *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), fotogrammetria digitale terrestre (TDP) e fotogrammetria digitale aerea (UAVDP). Presi singolarmente, questi metodi di acquisizione possono fornire modelli 3D precisi che rappresentino anche la componente radiometrica, ma la loro integrazione permette di arrivare a ottenere modelli 3D geometricamente accurati e con texture fotorealistiche [Hassan, Fritsch 2019]. Questo approccio garantisce una copertura completa delle superfici dal punto di vista dimensionale, migliorando al contempo la qualità delle texture. Tali tecniche consolidate [Daneshmand et al. 2018; Remondino 2011] registrano con precisione la geometria delle superfici, rendendole strumenti preziosi per la conservazione digitale del patrimonio culturale costruito (figg. 2, 3).

La documentazione della Cattedrale di Aachen si basa su un presupposto fondamentale legato alla maggiore utilizzabilità di modelli virtuali derivati da nuvole di punti 3D, correttamente registrate e un'alta precisione

The recording methodology and various stages of production activities provide a replicable framework for similar digital documentation projects.

The project is a collaborative effort between the Sapienza University of Rome (Italy), Robert Gordon University (Scotland), and RWTH Aachen University (Germany), in partnership with the Dombauhütte Aachen. It builds upon two previous publications describing the development process and observations [Pritchard et al. 2023; Attenni et al. 2023].

Although this paper focuses on the recording techniques and data post-processing methods at the Aachen Cathedral, there is a recognised appreciation for a comprehensive recording process that balances technical precision with historical and semantic considerations. While quality and accuracy are fundamental in a digital documentation project, respecting and connecting the broader cultural context is equally important. For that reason, the documentation team benefited from a multidisciplinary collaboration with specialists from several fields, including 3D digital survey, architecture, 3D modelling, architectural history, and monument conservation. This collaboration facilitated the exchange of knowledge, enabling the identification of areas of the building that might not be obvious to a standard survey team.

Project planning

An important requirement identified in the 2020 European Commission publication, Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage, is to establish the level of detail, areas requiring recording, and precision at the outset of a documentation project. However, as described in the publication, "there is no generally accepted framework for specifying the level of detail and the accuracy requirements for the various kinds of geometric recording of monuments. Every monument is geometrically documented based on the accuracy and cost specifications supplied or agreed to by the owner or stakeholder" [European Commission 2022]. The European Commission study lists four categories for immovable 3D digitisation



2/ Scanner laser terrestre Z+F Imager 5016 davanti alla Cattedrale (foto di Douglas Pritchard).
The terrestrial laser scanner Z+F Imager 5016 in front of the Cathedral (photo by Douglas Pritchard).

planning and production stages. The first category, *Project planning*, addresses the early decisions on critical project management and project description requirements. The second category, *Documentation and site work*, are the observations and decisions needed at the start of the on-site work, including the technical data capture method. Production and delivery mainly address the digital processing issues, naming conventions, the recording of meta and paradata and output/deliverables. Archive lists the necessary production backup procedures and data archive.

The Aachen project incorporated an integrated data capture approach that combined Terrestrial Laser Scanning (TLS), Terrestrial Digital Photogrammetry (TDP), and Aerial Digital Photogrammetry (UAVDP). Individually, these data capture methods can provide precise, full-colour 3D models, but their integration enhances the creation of 3D models that are geometrically accurate and photo-realistically textured [Hassan, Fritsch 2019]. This approach provides comprehensive dimensional surface coverage while enhancing texture generation. These well-established techniques [Daneshmand et al. 2018; Remondino 2011] accurately record surface geometries, making them valuable tools for digitally preserving immovable cultural heritage (figs. 2, 3).

The recording of the Aachen Cathedral relied on the concept that virtual models derived from dense, properly registered 3D point clouds, with verifiable high geometric precision, offer greater credibility than less accurate computer-generated models. With a verifiable geometric connection to the structures they represent, these models are more valuable for future conservation, study and research. Dimensionally accurate and thoroughly captured 3D datasets of existing structures possess a timeless quality, as their accuracy preserves the essence of the physical structures they represent at that moment in time. This legitimacy extends beyond metric precision alone and reflects the tools, metadata and comprehensive rigour of the methods used to create them [Barrile et al. 2022; Pritchard et al. 2017].



geometrica verificabile rispetto a quelli nativi digitali, realizzati quindi solo a partire da processi di modellazione. Grazie alla loro connessione geometrica con le strutture che rappresentano, questi modelli giocano un ruolo di primaria importanza per la conservazione futura, lo studio e la ricerca. In quest'ottica, infatti, un dataset 3D accurato dal punto di vista dimensionale che ricalchi in maniera completa le strutture esistenti possiede una qualità senza tempo, poiché la sua struttura conserva i caratteri morfologici che l'edificio incarna in quel preciso momento storico. Questo valore si estende oltre la sola precisione metrica e riflette gli strumenti, i metadati e il rigore complessivo dei metodi utilizzati per crearli [Barrile et al. 2022; Pritchard et al. 2017].

Il progetto di Aachen è iniziato come una ricerca collaborativa tra le tre istituzioni accademiche, con il pieno supporto dell'amministrazione della Cattedrale. Sulla base dei risultati di precedenti progetti di documentazione del patrimonio culturale, delle attrezzature disponibili all'epoca, delle discussioni con il direttore della Cattedrale e degli output inizialmente desiderati, il TLS e la fotogram-

metria sono stati selezionati come principali metodi di registrazione. Questo flusso di lavoro operativo mirava a fornire il massimo livello di dettaglio 3D e la massima risoluzione delle immagini possibili [Adamopoulos, Rinaudo 2019]. Come in precedenti progetti complessi di visualizzazione del patrimonio, l'approccio adottato per il progetto della Cattedrale di Aachen segue tipicamente la struttura e la sequenza degli eventi delineati nello studio della Commissione Europea. La pubblicazione *Geospatial Survey Specifications for Cultural Heritage* di Historic England descrive una metodologia di pianificazione del progetto simile [Historic England 2024]. La pianificazione iniziale del progetto si è basata su disegni CAD 2D esistenti della Cattedrale per identificare le posizioni dei punti di controllo del rilievo topografico. I disegni hanno inoltre aiutato a determinare le posizioni degli scanner, garantendo una sufficiente sovrapposizione tra le scansioni. I disegni annotati sono stati poi utilizzati per stimare i tempi di lavoro sul posto, evidenziare eventuali problemi di salute e sicurezza e facilitare la comunicazione con la direzione della Cattedrale.

3/ Scanner laser terrestre Z+F Imager 5010C
sul parapetto del balcone del lato est della Cattedrale
(foto di Douglas Pritchard).
*The terrestrial laser scanner Z+F Imager 5010C on the east
parapet of the Cathedral (photo by Douglas Pritchard).*



Le aree di documentazione includevano l'intero perimetro esterno, comprendendo le strade circostanti, i camminamenti posti a quota superiore e i livelli delle terrazze; l'interno con i principali ambienti tra cui il *Westwork* (facciata occidentale), la sala d'ingresso, la sala del Coro gotico, l'ottagono carolingio (Cappella Palatina), il deambulatorio, la galleria superiore, la Cappella di san Nicola, la Cappella di Carlo, la Cappella di san Mattia, la Cappella di sant'Anna e la Cappella ungherese e, infine, diversi spazi aggiuntivi tra cui la torre campanaria e i diversi piani interstiziali tra le volte gotiche e la copertura (figg. 4, 5, 6).

Rete di controllo del sito

Un precedente rilievo topografico dell'esterno della Cattedrale ha permesso l'identificazione di capisaldi topografici permanenti che circondano l'edificio. Questi punti di controllo sono stati integrati nel dataset principale della nuvola di punti per garantire una georeferenziazione e un allineamento accurato dei dati acquisiti. La distanza tra le stazioni era inferiore ai 100 m, e tutte le posizioni TLS sono state registrate sulla rete di controllo del sito. Nella scelta della posizione degli scanner il

progetto di rilievo ha considerato diversi fattori, tra cui la necessità di acquisire integralmente la forma architettonica complessiva e le elaborate superfici esterne e interne. Il gruppo di lavoro ha attentamente valutato elementi come il raggio d'azione ideale del laser, la risoluzione dei dati, le aree di occlusione, la vicinanza ai punti di controllo del rilievo e le ostruzioni visive per ottenere risultati ottimali. La quantità di scansioni e la loro posizione ha inoltre reso possibile l'acquisizione anche del contesto architettonico adiacente. Infatti la maggior parte delle posizioni TLS è stata selezionata per garantire una significativa sovrapposizione (oltre il 60%) tra le scansioni.

Terrestrial Laser Scanning - TLS

Data la complessità architettonica delle superfici della Cattedrale di Aachen e la necessità di acquisire dati ad alta risoluzione, il progetto di rilievo ha previsto scansioni tra loro ravvicinate variando la configurazione delle posizioni di presa per un'estesa acquisizione digitale dell'esterno e dell'interno dell'edificio. Questo approccio ha garantito che quasi ogni dettaglio dell'edificio fosse accuratamente registrato, dagli interni riccamente decorati ai tetti e alla guglia esterna. In particolare, il rilievo della Cappella Palatina con la sua complessità strutturale e della travatura nel sottotetto sopra la sala del Coro gotico ha richiesto una progettazione ad hoc per garantire la corretta registrazione dei dati. Inoltre, una particolare attenzione è stata dedicata alla registrazione delle superfici superiori delle volte del coro e alla connessione strutturale unica tra queste [Bianchini 2020]. Ricerche precedenti [Wu et al. 2022] sottolineano i benefici del TLS e dei dati derivati dalla nuvola di punti mettendo in luce i vantaggi significativi rispetto ad altre tecniche grazie alla loro alta precisione, oggettività e portata di misurazione. Per le scansioni interne è stato utilizzato lo Zoller + Fröhlich Imager 5016, mentre per quelle esterne è stato impiegato l'Imager 5010X. Entrambi i sistemi impiegano una tecnologia a differenza di fase (*amplitude-modulated continuous wave*, AMCW), che offre maggiore precisione e velocità di misurazione rispetto ai sistemi basati sulla tecnologia a tempo di volo (ToF). Seb-

The Aachen project began as a collaborative research project between the three academic institutions, with the full support of the Cathedral administration. Based on the outcomes of previous cultural heritage documentation projects, the available equipment at that time, discussions with the Cathedral manager, and the initial desired outputs, TLS and photogrammetry were selected as the main recording methods. This operational workflow was intended to deliver the highest possible 3D detail and image resolution [Adamopoulos, Rinaudo 2019]. As in previous complex heritage visualisation projects, the approach taken in the Aachen Cathedral project typically follows the structure and sequence of events outlined in the European Commission study. The Historic England's Geospatial Survey Specifications for Cultural Heritage publication describes a similar project planning methodology [Historic England 2024].

Initial project planning relied on existing 2D CAD drawings of the cathedral to identify the locations of fixed survey control points. The drawings also helped determine the scanner positions, ensuring sufficient overlap between scans. The marked-up drawings were then used to estimate on-site work time, highlight potential health and safety issues, and facilitate communication with cathedral management. The documentation areas included the circumference of the exterior, including the ground, parapet, upper parapet, and balcony levels. The main interior spaces included the Westwork (the western facade), Entrance Hall, Gothic Choir Hall, the Carolingian Octagon (Palatine Chapel), the ambulatory, the upper gallery, the Chapel of Saint Nicholas, Chapel of Karls, Chapel of Saint Matthias, Chapel of Saint Anne, and the Hungarian Chapel. Additional spaces included the bell tower and the various levels of the attic (figs. 4, 5, 6).

Site control network

A previously generated topographic survey of the cathedral's exterior was provided, identifying the positions of ten permanent survey markers encircling the building. These markers served as survey control points and were integrated into the primary points cloud

4/ La cupola ornata della Cappella Palatina
(foto di Douglas Pritchard).
The ornate Palatine Chapel dome
(photo by Douglas Pritchard).

dataset to ensure accurate georeferencing and alignment of the captured data. The distance between these stations was less than 100 m, and all TLS positions were registered to the site control network.

When positioning the scanners, the Aachen project considered several factors, including capturing the overall architectural form and the elaborate exterior and ornate interior surface areas. The team carefully evaluated factors such as ideal laser range, data resolution, areas of occlusion, proximity to survey control points, and visual obstructions to achieve optimal scanning results. The adjacent architectural context was also captured. The positioning of most of the TLS locations was selected for significant (60%+) overlap between scans.

Terrestrial Laser Scanning - TLS

Given the Aachen Cathedral's complex architectural and surface features and the need for high-resolution data, the project employed short-distance scanning with multiple scan setups and extensive digital imaging of the building's exterior and interior. This approach ensured that almost every detail of the building was accurately recorded, from the intricately decorated interior to the roofs and spire of the exterior. A particular challenge was capturing the structural complexity of the Palatine Chapel dome and the trusswork in the attic above the Gothic Choir Hall. Specific attention was paid to recording the top surfaces of the choir vaults and the unique structural connection between them [Bianchini 2020].

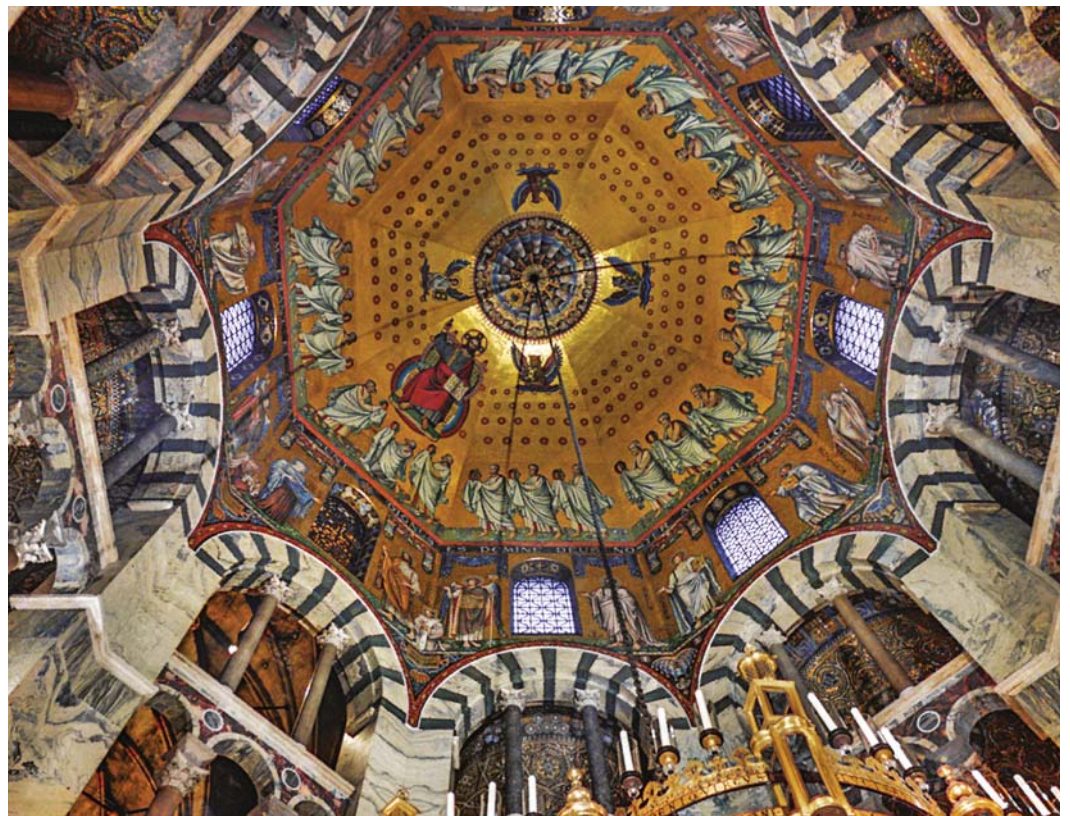
Previous research [Wu et al. 2022] highlights the benefits of TLS and the resulting points cloud data. TLS systems offer significant advantages over other techniques due to their high accuracy, objectivity, and measurement range. The Zoller + Fröhlich Imager 5016 was employed for the interior scanning, while the Imager 5010X was used for the exterior scanning. Both systems utilise the phase-shift (amplitude-modulated continuous wave, AMCW) technique, which delivers greater ranging accuracy and measurement speed than scanners that depend on the time-of-flight technique (ToF). While they have a

bene abbiano una portata inferiore rispetto ai sistemi ToF, quelli a differenza di fase sono particolarmente adatti per alta precisione e dettaglio, rendendoli ideali per rilevare le caratteristiche architettoniche della Cattedrale. I modelli 5010X e 5016 generano nuvole di punti a 360 gradi basati su un sistema di coordinate locale con valori di riflettanza associati. Il 5010X ha una portata approssimativa di 187 m, mentre il 5016 arriva a 360 m, ideale per strutture come la Cattedrale e l'area circostante. Entrambi i sistemi hanno una velocità di acquisizione di 1,06 milioni di punti al secondo e un errore lineare inferiore a 1 mm entro 20 m dalla superficie. Durante il rilievo, entrambe le impostazioni TLS hanno mantenuto una spaziatura dei punti tra i 6,3 mm a 10 m e i 3,1 mm a 10 m, con risoluzioni più elevate, come 1,6 mm a 10 m, selezionate per aree critiche che richiedevano dettagli più accurati.

Il 5010X e il 5016 integrano una fotocamera CCD posizionata nel punto nodale dell'unità di scansione. La fotocamera del 5010X è leggermente fuori asse, causando una lieve

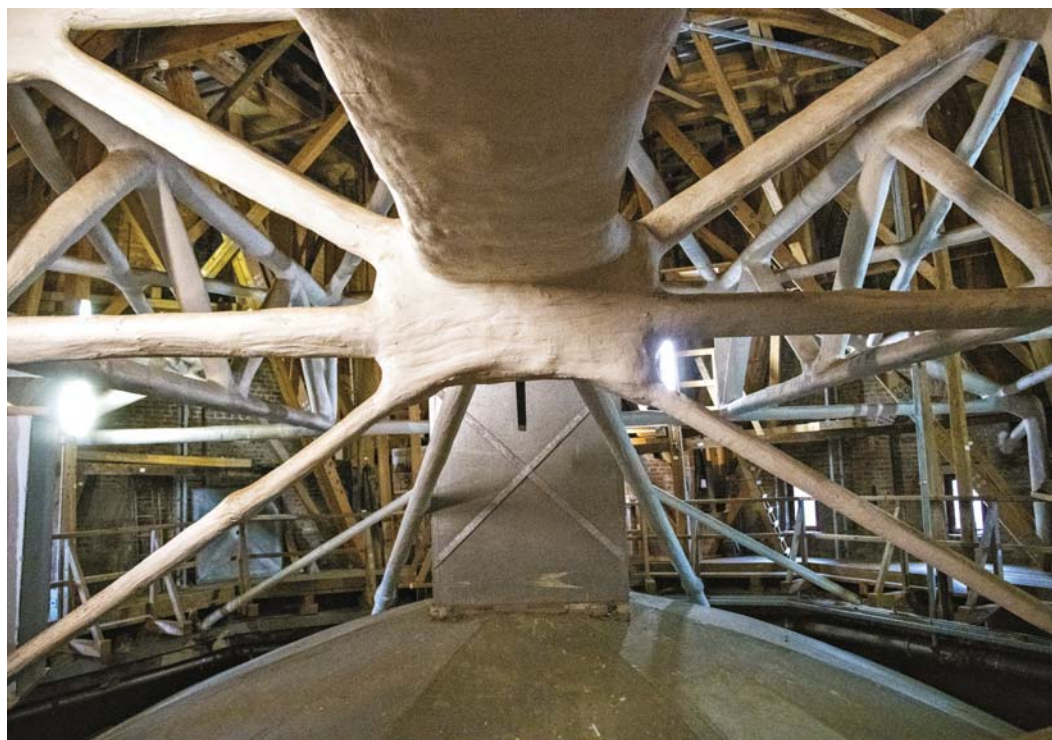
parallasse nei primi metri, problema superato nel 5016. Durante la post-elaborazione, le immagini si sovrappongono ai punti della nuvola senza parallasse, offrendo un dataset fotorealistico e correttamente allineato.

Completata la fase di scansione laser, il dispositivo avvia la ripresa fotografica mediante l'acquisizione di 42 singole fotografie HDR che si combinano per creare un'immagine panoramica a 360° da 80 megapixel. Inoltre, per illuminare gli spazi interni male illuminati, il 5016 è dotato di quattro spot LED integrati da 1000 lumen che evitano l'uso di fonti di luce esterne. La nuvola di punti texturizzata permette una maggiore riconoscibilità degli oggetti, e facilita la distinzione tra diverse colorazioni della pietra, migliorando l'accuratezza nelle applicazioni di mappatura e modellazione 3D. Sebbene non perfetta, l'integrazione del colore nei dati della nuvola di punti consente la creazione di modelli 3D visivamente più accurati e rappresentativi dell'ambiente reale [Huvila 2018]. Tutte le scansioni laser interne ed esterne della



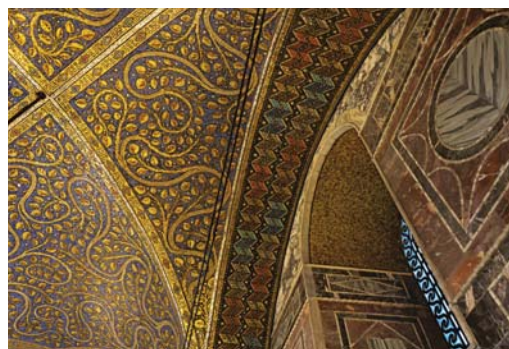
5/ Il rinforzo strutturale sopra la cupola della Cappella Palatina (foto di Douglas Pritchard).
The structural brace above the Palatine Chapel dome (photo by Douglas Pritchard).

6/ Immagine di dettaglio del soffitto che mostra i colori e la texture della superficie (foto di Douglas Pritchard).
Ceiling detail, demonstrating the surface colours and texture (photo by Douglas Pritchard).



Cattedrale includevano immagini, sebbene ciò abbia inciso considerevolmente sui tempi di acquisizione. Il 5010X è compatibile con un sistema di illuminazione esterno, mentre gli spot LED integrati del 5016 consentono l'acquisizione di immagini senza necessità di fonti di luce aggiuntive. Questa caratteristica è pratica per la scansione di siti storici con condizioni di illuminazione disomogenee, garantendo una qualità d'immagine costante e un'acquisizione dei dati senza l'ausilio di illuminazione esterna.

La tecnica di acquisizione mediante laser scanner permette di ottenere dati 3D in breve tempo con una grande accuratezza nella rappresentazione delle superfici di un oggetto e una precisione straordinaria, raggiungendo valori sub-millimetrici. Le fotocamere interne dei modelli 5010X e 5016 offrono prestazioni eccellenti sebbene abbiano una risoluzione inferiore rispetto alla fotografia digitale ad alta risoluzione e siano meno versatili (poiché limitate a un singolo centro di proiezione). Di contro, attraverso l'impiego di processi fotogrammetrici è possibile elaborare nuvole di punti con elevato dettaglio e con colori realistici an-



che se con una precisione metrica inferiore e a patto che si realizzi una corretta illuminazione. L'integrazione del TLS con la fotogrammetria sia terrestre sia basata su droni consente di mitigare i limiti di ciascun metodo sfruttando i loro punti di forza combinati. Ciò porta a una documentazione più completa delle superfici, con meno occlusioni e, infine, a una maggiore precisione nella modellazione e a una migliore generazione delle texture [Giuliano 2014].

Fotogrammetria digitale

I recenti progressi nell'ambito dello sviluppo software, della risoluzione delle fotocamere

shorter range than ToF, phase-shift systems are particularly well-suited for high precision and detail, making them ideal for capturing the architectural features of the Aachen Cathedral. The 5010X and 5016 generate 360-degree point data based on a local coordinate system with associated intensity values. The 5010X has an approximate range of 187 m, while the 5016 has a range of 360 m, ideal for structures such as the Aachen Cathedral and the adjacent precinct. The systems have an acquisition rate of 1.06 million points per second, with a linearity error of less than 1 mm within 20 m from the surface. Both TLS recording settings had a set point spacing (angular resolution) of 6.3 mm at 10 m or 3.1 mm at 10 m throughout the project. Higher resolutions, such as 1.6 mm at 10 m, were selected for critical areas requiring exceptional surface detail.

The 5010X and 5016 have an integrated camera system, the CCD, positioned at the nodal point of the scanning unit. The 5010X's camera is slightly off-centre, so a slight parallax is noticeable on the first few meters. Parallax is not an issue with the 5016. During post-processing, the imagery sits precisely onto the point data without parallax, providing an aligned, photorealistic scan dataset.

Upon completing the laser scanning sequence, the systems can initiate a series of 42 individual HDR photographs that combine to create an 80-megapixel 360-degree panoramic image. Additionally, to illuminate dark interior spaces within the Cathedral, the 5016 has four built-in 1000 lumen LED spotlights, avoiding using external lighting sources. Coloured points cloud data can provide better object recognition, such as different stone colours, and classification and enhance the accuracy of 3D mapping and modelling applications. Although not perfect, integrating colour into points cloud data also enables the creation of more visually accurate 3D models that closely represent the real-world environment [Huvila 2018]. All interior and exterior Aachen laser scans incorporated imagery. However, this added additional production time to the individual setups. The 5010X is compatible with an external illumination system, while the 5016's

integrated LED spotlights enable image capture without relying on additional light sources. This feature is practical for scanning heritage sites with inconsistent lighting conditions. The built-in lighting system provides consistent image quality and data capture without external lighting. TLS provides fast and accurate 3D point data of an object's surface with remarkable precision, achieving sub-millimetre accuracy. The 5010X and 5016 feature excellent internal cameras, although they have lower image resolution capabilities compared to high-resolution digital photography and are less versatile as they are restricted to line-of-sight capture. TDP produces highly detailed and realistically coloured points, although it has lower metric accuracy, extensive overlapping imagery, and requires proper lighting. By integrating TLS with terrestrial and drone-based photogrammetry, the limitations of each method can be mitigated while leveraging their combined strengths. This leads to more comprehensive surface capture, fewer occlusions, improved modelling precision, and enhanced texture generation [Giuliano 2014].

Digital photogrammetry

Recent software advancements, digital camera resolution, and increased computer processing power have significantly improved the speed and quality of photogrammetric texture generation and 3D model accuracy. Terrestrial photogrammetry and UAV photogrammetry can provide improved 3D surface coverage, including hard-to-capture niches, and generate high-quality seamless textures.

As the quality of photogrammetry depends on the image quality, file resolution, and the camera's angle to the surface, perpendicular and angled shots (30°-60°) were used.

Extreme oblique (70°+) images, which will distort features and reduce accuracy, and under/overexposed photos were deleted from the photogrammetric image dataset.

The Aachen project used two digital cameras for terrestrial imagery: a Nikon Z 7II (47.7 MP) mirrorless full-frame camera and a Sony Alpha ILCE-A7 II (24.3 MP) full-frame

digitali e della potenza di elaborazione dei computer hanno significativamente migliorato la velocità di produzione e la qualità in termini di accuratezza dei modelli 3D e di texture derivate da processi fotogrammetrici. L'impiego combinato di fotogrammetria terrestre e UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) permette di migliorare l'acquisizione di superfici fortemente articolate, consentendo di accedere a zone altrimenti non rilevabili producendo una texturizzazione continua e qualitativamente elevata.

Poiché la qualità della fotogrammetria dipende dalla qualità e risoluzione delle immagini e dalla inclinazione della fotocamera rispetto alla superficie, sono state utilizzate riprese perpendicolari e inclinate (30°-60°). Le immagini troppo oblique (oltre 70°), che distorcono le caratteristiche e riducono l'accuratezza, insieme alle foto sottoesposte o sovraesposte, sono state eliminate dal dataset delle immagini fotogrammetriche.

Per il progetto di rilievo della Cattedrale sono state utilizzate due fotocamere digitali per le immagini terrestri: una Nikon Z 7II (47,7 MP) *mirrorless full-frame* e una Sony Alpha ILCE-A7 II (24,3 MP) *full-frame*, entrambe dotate di obiettivi a focale fissa da 24 mm. L'uso di obiettivi con una sola lunghezza focale semplifica la calibrazione, riduce le distorsioni ottiche e consente al software di produrre ricostruzioni 3D accurate.

Software di produzione come Epic Games Reality Capture sono diventati più automatizzati, riducendo la necessità di interventi manuali e aumentando la velocità di elaborazione. Di conseguenza, la creazione di geometrie 3D completamente texturizzate è diventata più rapida, fluida e accurata.

Nonostante i progressi software, un modello 3D completamente fotogrammetrico può risultare problematico per quanto riguarda l'accuratezza metrica, che è generalmente meno affidabile rispetto a quella ottenuta con i sistemi TLS. Una particolare problematica legata alle acquisizioni fotogrammetriche riguarda la combinazione di dataset realizzati per ambienti esterni con quelli di ambienti interni. Infatti gli algoritmi fotogrammetrici faticano a registrare superfici altamente riflettenti, come quelle all'inter-

no della Cappella Palatina, o superfici con pochi dettagli. Al contrario, il LiDAR (*Light Detection and Ranging*) offre risultati dimensionali accurati, costanti e ripetibili nella documentazione dei dettagli superficiali, indipendentemente dalle condizioni di illuminazione e texture.

Fotogrammetria con UAV

L'impiego di procedure di acquisizione basate su processi fotogrammetrici con UAV offre numerosi vantaggi nel contesto della documentazione di strutture storiche, tra cui costi hardware relativamente bassi (rispetto al TLS), versatilità, non invasività e capacità di produzione di immagini ad alta risoluzione. Grazie agli UAV è possibile accedere con grande flessibilità ad aree non raggiungibili dai laser scanner o dalle attrezzature fotografiche terrestri, rendendoli strumenti di grande valore per la conservazione, il restauro e la documentazione.

Sebbene sia possibile equipaggiare i sistemi UAV con fotocamere ad alta risoluzione, telecamere termiche e sistemi LiDAR, tale configurazione tende inevitabilmente ad aumentare il peso del velivolo rendendo necessaria la richiesta di permessi speciali. In Germania l'operatività degli UAV è regolata dalla Legge sull'Aviazione (*Luftverkehrsgesetz*) e dall'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA). Le normative prevedono la registrazione di tutti gli UAV con peso superiore a 250 gr e procedure di volo rigorose e restrizioni simili sono presenti anche in altri paesi.

Nell'ambito del progetto, si è scelto di utilizzare un drone DJI Mini 3 Pro da 249 gr, dotato di un sensore CMOS da 1/1,3 pollici che fornisce immagini da 48 MP e un obiettivo f/1.7 da 24 mm. Il sistema automatico di acquisizione delle immagini del drone è in grado di produrre rapidamente centinaia di immagini. La sfida principale nell'utilizzo di un drone sotto i 250 gr presso la Cattedrale era legata alla sua suscettibilità ai venti improvvisi, che talvolta ne destabilizzavano il volo e compromettevano la qualità delle immagini.

La fotogrammetria basata su immagini derivate da UAV ha permesso di colmare sia le lacune causate da occlusioni sia quelle in

7/ Posizionamento del laser scanner tra due volte
(foto di Douglas Pritchard).
Positioning of the laser scanner between the two vaults
(photo by Douglas Pritchard).

8/ Rilievo della scala interna tramite Z+F Flexscan system
(foto di Douglas Pritchard).
Walking down the interior staircase using the Z+F Flexscan system
(photo by Douglas Pritchard).

corrispondenza di aree in quota difficilmente raggiungibili da laser scanner statici [Oliveira et al. 2014]. Tuttavia, il drone non è stato utilizzato all'interno della Cattedrale; per gli interni sono stati utilizzati solo scansioni laser e fotografie da terra.

La campagna fotografica ha complessivamente portato alla produzione di circa 8.145 immagini raw ad alta risoluzione. Circa il 55% delle foto, comprese quelle delle facciate, del campanile, della lanterna e dei tetti, coprivano l'intero esterno. La fotografia da terra e quella con drone sono state strutturate per integrarsi nel processo fotogrammetrico.

Oltre a completare i dati della nuvola di punti derivata da laser scanner 3D, l'elaborazione fotogrammetrica contribuisce significativamente a costruire un archivio fotografico consistente degli spazi primari e secondari di un sito. Se organizzate correttamente, le singole immagini possono costituire una preziosa fonte aggiuntiva di informazioni sull'edificio e sui manufatti che lo compongono. In caso di danni o distruzione di un sito monumentale, queste immagini risulterebbero inestimabili per la ricostruzione. Inoltre spingono il fotografo a documentare le aree meno interessanti o "di servizio", che potrebbero rivelarsi critiche in progetti o analisi future.

Scansione SLAM

Nell'ultima fase del progetto è stato utilizzato un sistema di scansione con *Simultaneous Localisation and Mapping* (SLAM) per incrementare la copertura dei dati derivanti da scansione laser. La tecnologia SLAM, relativamente recente, ottimizza la velocità del rilievo di ambienti interni complessi, come quelli della Cattedrale.

Il sistema di mappatura mobile utilizzato, Z+F FlexScan (Zoller + Fröhlich), abbinato all'Imager 5016, è stato utilizzato per documentare specifiche aree interne della Cattedrale con una morfologia particolarmente complessa: le due scale a chiocciola e il sottotetto sopra il coro e l'abside (figg. 7, 8). Mentre i sistemi TLS richiedono una messa in stazione su treppiede, la tecnologia SLAM consente di acquisire dati 3D in movimento. Questa facilità d'uso elimina la necessità di numerose scansioni statiche e permette una



raccolta di dati fluida e relativamente veloce su aree estese e complesse. Inoltre, l'integrazione con i dati acquisiti da TLS e con punti di controllo topografici, migliora la precisione dei dati, riducendo il processo laborioso di acquisizione di dati TLS georeferenziati, e compensa la ridotta accuratezza intrinseca nella scansione SLAM.

L'acquisizione dei dati degli ambienti interni è stata effettuata senza connettività GNSS e ha richiesto un percorso pianificato per calcolare con precisione l'algoritmo SLAM. Nelle aree delle due scale a chiocciola e del sottotetto sopra il coro e l'abside, i percorsi di scansione sono stati limitati a un massimo di 20 minuti di acquisizione continua per minimizzare l'errore progressivo, prevedendo un ritorno al punto di partenza per chiudere il percorso e garantire l'accuratezza della traiettoria. Questa scelta, definita in fase di progettazione del rilievo, ha considerato le specifiche tecniche dello strumento Z+F FlexScan 22, caratterizzato da una qualità di acquisizione dei dati comparabile al sistema statico Z+F IMAGER 5016. Ogni scansione è composta da 10.000 punti e garantisce una precisione fino a 2,5 mm, assicurando un elevato livello di dettaglio nel modello numerico complessivo.

Integrazione di dati aggiuntivi

La campagna di acquisizione dei dati non ha incluso l'utilizzo di tecnologie alternative, come il radar a penetrazione del suolo (GPR), né ha integrato i precedenti dati GPR 2D e 3D [Fernández-Steege et al. 2011; Barrile et al. 2022], poiché tali dataset non offrono la stessa precisione dimensionale rispetto ai

camera equipped with 24 mm prime lenses. Using fixed 24 mm prime lenses with a single focal length simplifies calibration, reduces optical distortions, and enables the software to produce accurate 3D reconstructions. Production software such as Epic Games Reality Capture has become more automated, reducing the need for manual intervention and increasing production processing speed. As a result, the creation of fully textured, 'watertight' 3D geometry has become faster, more streamlined and more accurate. Despite ongoing software development, a comprehensive photogrammetric-only 3D model can be challenging due to its dimensional accuracy, which is typically less dependable than that achieved with TLS. There are also issues related to integrating interior and exterior data. Photogrammetric algorithms can find it challenging to verify the registration of highly reflective surfaces, such as those in the interior of the Palatine Chapel, or of surfaces with sparse features. In contrast, LiDAR (Light, Detection and Ranging) provides accurate, consistent, and repeatable dimensional results when capturing surface detail, regardless of lighting and surface texture conditions.

UAV photogrammetry

UAV photogrammetry provides numerous advantages for recording heritage structures, including relatively low hardware cost (compared to TLS), versatility, noninvasiveness, and high-resolution imaging capabilities. UAVs are more flexible and can access areas well beyond the sight of terrestrial laser scanners or terrestrial photographic equipment, making

9/ Vista ortografica della nuvola di punti ottenuta dalla registrazione delle scansioni esterne e interne (elaborazione di Douglas Pritchard).
Orthographic plan view of the interior and exterior points cloud data (by Douglas Pritchard).

them invaluable conservation, restoration, and documentation tools.

Although UAV systems can carry high-resolution cameras, thermal cameras, and lidar systems, they tend to be heavy and require special permits. The operation of UAVs was subject in our case to the German Aviation Act (Luftverkehrsgesetz) and the European Union Aviation Safety Agency (EASA). The regulations also require the registration of all UAVs weighing more than 250 grams and strict flying procedures. Similar flight restrictions exist in other European countries.

The project used a 249 gram DJI Mini 3 Pro drone. This unit has a built-in 1/1.3 inch CMOS camera sensor that provides 48 MP imagery and an f1.7 24 mm lens. Its automatic image capture system can quickly produce hundreds of images. The challenge of flying a sub-250-gram drone at the cathedral was its susceptibility to gusting winds, which occasionally destabilised it and affected image quality.

The UAV photogrammetry filled in missing areas due to occlusions or hard-to-reach surfaces that the laser scanners may have missed [Oliveira et al. 2014]. The UAV was not flown inside the cathedral, and the interior dataset consisted of laser scans and terrestrial imagery.

The TDP and UAV produced approximately 8,145 high-resolution .raw images.

Approximately 55% of the photos, including the facades, bell tower, lantern, and roofs, encompass the entire exterior. Both terrestrial and drone photography were structured to complement the photogrammetric process.

In addition to using the imagery to complement the points cloud data, a photogrammetric project has the additional benefit of forcing extensive imaging of a heritage site's primary and secondary spaces. If properly organised, the individual images can provide an extra, highly valuable building and artefact information source. These images would be invaluable in reconstruction efforts if a cultural heritage property were damaged or destroyed. It also forces the photographer to record the less interesting, 'back-of-house' areas that may be critical in future projects or analyses.

SLAM scanning

In the later stages of the project, a Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM) scanning

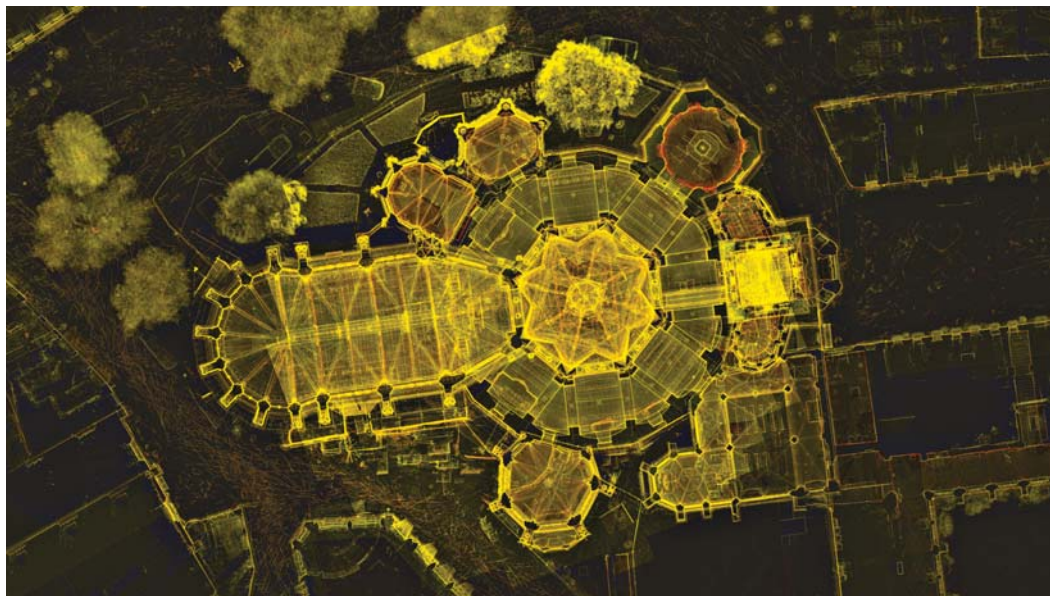
dati acquisiti tramite scanner laser e sistemi di fotogrammetria [Galeazzi 2017]. Analogamente, le precedenti scansioni laser 3D delle aree sottostanti il pavimento della cappella ottagonale non sono state considerate. Tuttavia l'integrazione dei dati raccolti con ulteriori dataset rappresenta un'importante opportunità di sviluppo per il progetto. Ad esempio, combinare i dati LiDAR aerei relativi alla regione di Aachen potrebbe fornire informazioni contestuali utili, offrendo una visione più ampia della relazione tra la Cattedrale e il suo contesto ambientale. La creazione di dataset integrati, derivanti dalla combinazione di diverse fonti, consentirebbe di sviluppare analisi predittive, come la simulazione dell'impatto dei venti, il drenaggio delle acque piovane, la valutazione del rischio di alluvioni, o l'ottimizzazione della gestione e del controllo dell'affollamento, in particolare durante eventi con alta affluenza o in situazioni di emergenza.

Acquisizione di dati

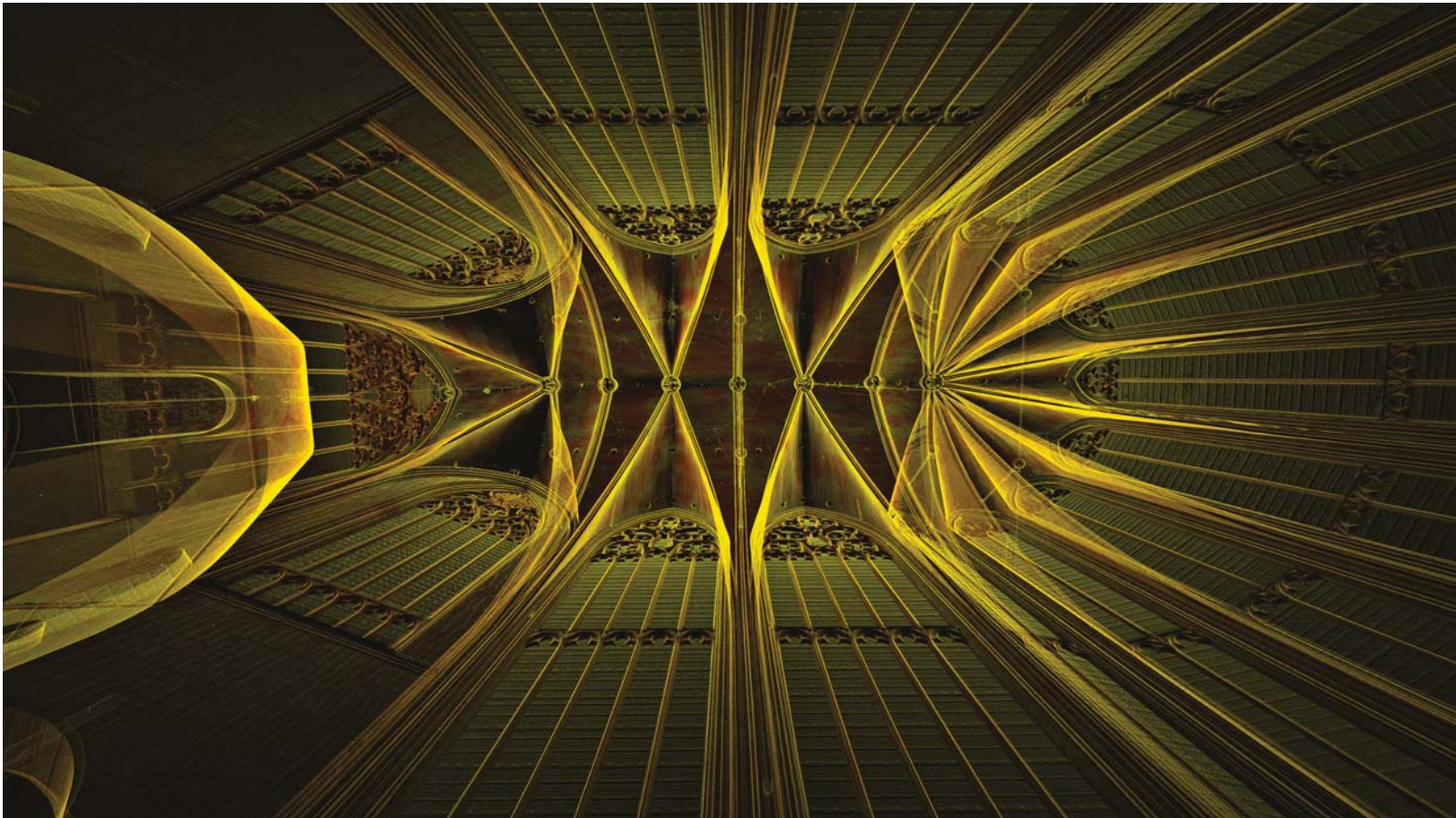
Nonostante il numero di turisti, membri dello staff e arredi mobili, i dati acquisiti hanno presentato ostruzioni minime, con errori di registrazione associati altrettanto ridotti. Dal punto di vista della costruzione geometrica del modello 3D numerico, il posizionamento del TLS all'interno della Cattedrale ha con-

sentito di rilevare da più angolazioni anche le aree nascoste, riducendo o eliminando le occlusioni. Dal punto di vista della costruzione di un modello 3D texturizzato, invece, la colorazione della nuvola di punti ottenuta tramite le fotocamere integrate del TLS ha dato ottimi risultati. I mosaici, i pannelli di marmo e la muratura risultano chiaramente visibili e ben leggibili nei dati texturizzati (fig. 9). Sebbene sia logisticamente auspicabile acquisire tutte le immagini e le scansioni in un'unica campagna, fattori come l'accesso limitato al sito, le condizioni meteorologiche, le occlusioni, i lavori di costruzione e gli imprevisti possono compromettere la quantità o la qualità dei dati iniziali raccolti.

I dati TLS sono stati controllati e registrati successivamente, identificando gli ostacoli, le connessioni di scarsa qualità e le aree mancanti; lo stesso approccio è stato applicato ai dataset fotogrammetrici. Questo è il motivo per cui progetti di documentazione complessi come questo richiedono diverse campagne per completare l'acquisizione dei dataset. Il rilievo della Cattedrale di Aachen, infatti, si è articolato in tre momenti differenti. Durante la prima campagna sono stati acquisiti la maggior parte dei dati, comprese le scansioni TLS e le immagini fotogrammetriche terrestri e da UAV. La seconda si è concentrata sulla scansione del campani-



10/ Il soffitto del coro, vista della nuvola di punti
(elaborazione di Douglas Pritchard).
*Rendering of the colourised points cloud data, looking
at the choir ceiling (by Douglas Pritchard).*
Tabella 1/ Numero di scansioni nelle diverse aree
(elaborazione di Douglas Pritchard).
*Table 1/ / Number of TLS Scans per Area
(by Douglas Pritchard).*



le, delle superfici superiori delle volte e dei livelli più alti delle aree del sottotetto del coro. Inoltre sono state fotografate le aree dell'esterno precedentemente ostruite da impalcature e reti di protezione. La terza campagna di rilievo, coincidente con un evento di divulgazione delle attività del pro-

getto [Aachen Cathedral 2024], ha previsto l'integrazione di alcune zone utilizzando lo scanner SLAM Z+F FlexScan (fig. 10). Un vantaggio fondamentale del TLS è la relativa facilità con cui i dataset interni ed esterni possono essere collegati. Gli scanner statici sono stati posizionati presso le soglie di tutte

backpack system was used to increase data acquisition. SLAM is a relatively new technology that excels at rapidly surveying complex indoor environments, such as the interior of a historic Cathedral. The Z+F FlexScan mobile mapping system (Zoller + Fröhlich), paired with the Imager 5016, was used to record specific interior areas of the Cathedral, specifically the two spiral staircases and the attic above the choir and apse (figs. 7, 8). Whereas TLS systems require a fixed tripod setup, the backpack-based SLAM camera lets the operator record 3D data while moving. The manoeuvrability removes the need for numerous static scans and allows seamless, comparatively fast data collection over large or complex regions. Integrating TLS data and survey control points further enhances SLAM data quality. This combined approach mitigates the labour-intensive process of acquiring georeferenced TLS data while addressing the

Number of TLS Scans Per Area			
Exterior Area	Scans	Interior Areas	Scans
North	16	Ground Level	40
South	22	Octagon / Choir	85
East	10	Bell Tower	42
West	8	Lantern / Dome	46
West Square	8	Attic / Vaults	40
South West	9	Connected Residential	15
Balconies	7	Interior / Exterior Connections	8
Courtyard	7	Total	276
Roof/Parapet	23		
Exterior / Interior Connections	10	Interior Slam	3
Total	120		

reduced accuracy inherent in SLAM scanning. Indoor scanning was done without GNSS connectivity and required a planned pathway to calculate the SLAM algorithm accurately. For Aachen, scanning routes were typically limited to a maximum of 20 minutes of continuous capture time to minimise dimensional drift, with a return to the starting point to complete a loop and ensure trajectory accuracy. According to the manufacturer, the Z+F FlexScan 22 delivers point data and range quality comparable to the static Z+F IMAGER 5016. It achieves an accuracy of up to 2.5 mm in the SLAM results. Each profile scanned with the FlexScan 22 includes 10,000 points, providing high detail in the resulting 3D dataset.

Additional recording methods

It is worth noting that certain acquisition technologies, such as ground-penetrating radar (GPR), were not used in this data capture campaign, nor were the previous GPR 2D and 3D data utilised [Fernández-Steege et al. 2011; Barrile et al. 2022]. GPR-derived 3D models do not have the same dimensional precision as data gathered through laser scanners and photogrammetry systems [Galeazzi 2017]. Similarly, the earlier 3D laser scans of the underfloor areas of the octagon chapel were not included. Integrating additional external 3D datasets presents a significant development opportunity for the future. For instance, combining aerial LiDAR data from the broader Aachen urban region could yield contextual information, providing a broader perspective on the Cathedral's relationship with its surrounding precinct. Given the capabilities of the registration and post-production software, there are methods to unite the various datasets for representation and predictive analysis. The combined datasets could simulate environmental impacts like wind patterns, rainwater drainage, and flood risks. They could also assist with crowd management and control planning, especially during high-traffic events or emergencies.

Data capture

Despite the number of tourists, staff, and movable furniture, the Aachen data had minimal occlusions, and the associated

le aperture esterne della Cattedrale, incluse porte, balconi e parapetti. Queste porzioni sono state accuratamente scansionate per collegare con precisione i dataset interni ed esterni. Il dataset 3D risultante dall'integrazione tra le nuvole di punti interne ed esterne ha consentito di comprendere e interpretare l'organizzazione spaziale della Cattedrale e il suo contesto. La possibilità di segmentare l'intero dataset 3D e di realizzare sezioni trasversali ha permesso un esame più approfondito delle caratteristiche architettoniche distintive come il tetto ornato, lo spazio del sottotetto e la cupola.

Nel complesso, sono state effettuate 396 singole scansioni TLS utilizzando i modelli 5010X e 5016, tre segmenti SLAM estesi (l'area del sottotetto e le due scale a chiocciola interne), e sono state scattate circa 8.145 immagini con il TDP e l'UAV (tabella 1). Per ottimizzare le operazioni di registrazione, i dati sono stati organizzati per spazi interni, esterni e livelli del tetto. Diciotto scansioni di collegamento hanno unito i dataset interni ed esterni, garantendo una registrazione accurata, inclusa l'integrazione tra i dati dei diversi ambienti.

Registrazione e post-produzione

Il processo di post-produzione dopo l'acquisizione dei dati si articola generalmente in quattro fasi: 1. registrazione dei dati, 2. pulizia dei dati, 3. segmentazione dei dati, 4. riconoscimento degli oggetti e 5. output [Pritchard et al. 2017; Wu et al. 2022]. Con TLS/TDP e all'interno del software fotogrammetrico Reality Capture di Epic, il *workflow* comprende: 1. organizzazione dei dati, 2. importazione dei dati .e57 e delle immagini, 3. allineamento, 4. ricostruzione, 5. texturizzazione e 6. output. Entrambi i flussi di lavoro si basano su dataset di nuvole di punti accurati e ben strutturati come componente fondamentale, necessari per la documentazione, la conservazione digitale a lungo termine e l'archiviazione.

I file delle scansioni interne ed esterne sono stati importati in Z+F Laser Control (Sapienza) e Leica Register 360 (RGU). Per ridurre gli errori, i file sono stati registrati *cloud-to-cloud* considerando solo l'architettura ed

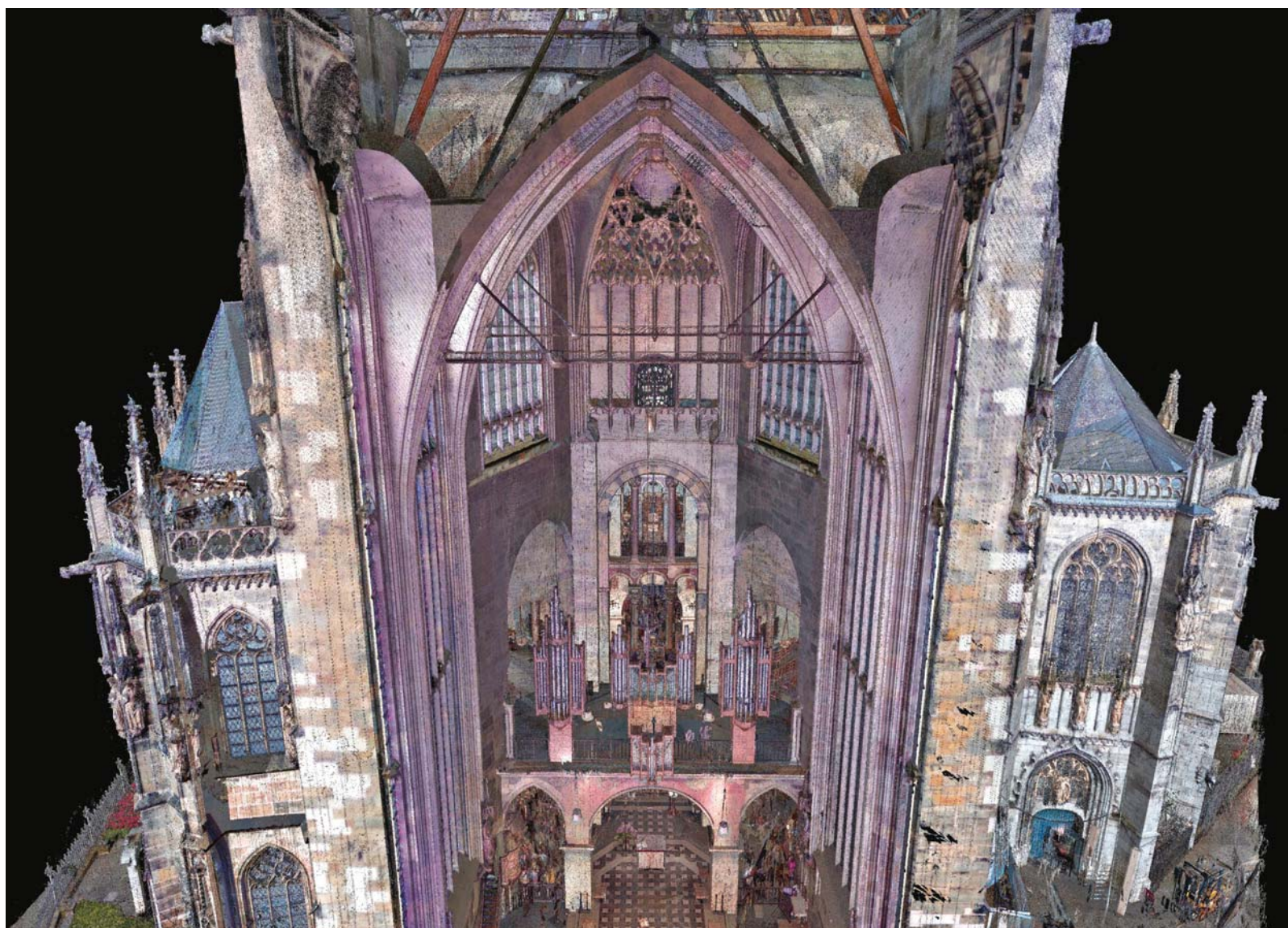
escludendo persone in movimento e chiome degli alberi, e successivamente collegati alla rete topografica.

I singoli file in formato .e57 del dataset registrato sono stati importati in Autodesk ReCap 360 (v. 2024, 2025) per ulteriore raffinamento e rimozione del rumore. Durante l'importazione in ReCap è stato applicato un filtro per la riduzione del rumore e i dati originali sono stati ottimizzati, con una conseguente lieve perdita di dettaglio. Le capacità di navigazione in tempo reale della piattaforma si sono dimostrate inestimabili per la revisione dei dati e le presentazioni. I file .rcp sono stati quindi integrati in altre applicazioni Autodesk per ulteriori sviluppi, inclusi AutoCAD e 3D Studio Max, e sono strutturati in modo tale da poter essere utilizzati anche all'interno di altri software come CloudCompare, Blender e Rhinoceros.

Come le scansioni, anche le immagini TDP e UAV acquisite sono state organizzate in gruppi relativi agli spazi interni, esterni, al sottotetto e ai livelli del tetto. Tutti i file immagine sono stati bilanciati cromaticamente e convertiti da .raw a .jpeg. I file .e57 registrati e puliti, insieme alle immagini, sono stati combinati e processati utilizzando il software Reality Capture. Per ottimizzare l'efficienza, sono state processate con il software Reality Capture due versioni del modello: una con le immagini dell'esterno, una con quelle dell'interno (figg. 11, 12). Ciò ha prodotto modelli 3D poligonali mesh eccezionalmente fotorealistici. Una delle principali sfide legate all'uso del software per la creazione di mesh 3D riguarda l'elaborazione di modelli di grandi dimensioni che, anche con una decimazione accurata e l'impiego di una workstation di alto livello, può richiedere tempi considerevoli. Inoltre, la navigazione all'interno di file pesanti risulta particolarmente dispendiosa in termini di risorse, mentre la pulizia dei poligoni, dei bordi e delle facce interconnessi per eliminare rumori e artefatti può essere un processo lungo e complesso.

Una volta esportati in applicazioni come Autodesk 3D Studio Max, la generazione di immagini è risultata lenta ma lineare. I modelli non ottimizzati sono stati importati a scopo

11/ Sezione trasversale del modello 3D mesh
(elaborazione di Douglas Pritchard).
Cross-section through the centre of the 3D mesh model
(by Douglas Pritchard).



sperimentale nel motore di gioco Unreal, all'interno di cui il peso delle mesh ha ridotto le prestazioni in real-time, ma mantenuto la visualizzazione fotorealistica dei modelli. Attualmente, sebbene siano in corso ricerche e avanzamenti da parte degli sviluppatori per migliorare gli strumenti finalizzati a una maggiore interoperabilità e scambio di conoscenze sui dati 3D [Bruno et al. 2022], la gestione di dataset di punti è più flessibile ed efficiente rispetto a quella dei modelli mesh 3D o ai modelli BIM/HBIM. Un vantaggio intrinseco della scansione laser è

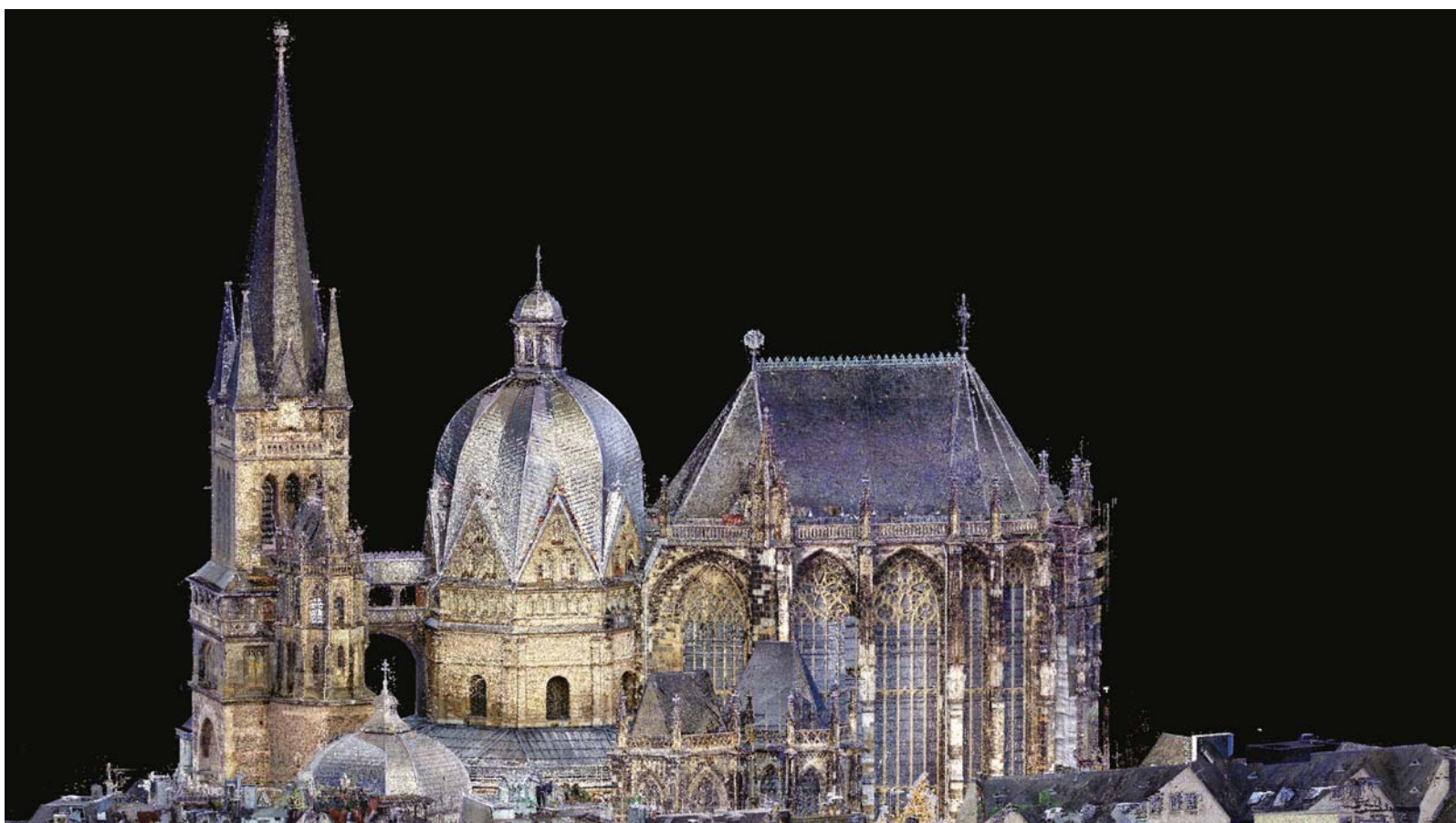
che, nonostante le numerose scansioni ad alta risoluzione incluse nel progetto, il dataset della nuvola di punti rimane relativamente semplice: si tratta di una serie di punti non correlati all'interno di uno spazio 3D (figg. 13, 14, 15).

Un'ulteriore riflessione è stata fatta su un problema altrettanto significativo: la generazione eccessiva di file temporanei e la struttura rigida di file proprietari. Scambiare i file di progetto o l'intero dataset di Aachen tra sistemi o tra i collaboratori è risultato dispendioso in termini di tempo e di risorse.

registration had minimal error. By placing the TLS in numerous locations within the interior, blocked/hidden areas were recorded from multiple angles, reducing or eliminating occlusions. The colourisation of the points cloud through the onboard cameras on the TLS worked well. The mosaics, marble panels, and masonry are clear and legible within the coloured data (fig. 9).

Although acquiring all imagery and scans during a single documentation trip may be logistically desirable, limited site access, weather, occlusions, construction and

12/ Vista ortografica del modello 3D mesh del Westwork, facciata ovest (elaborazione di Douglas Pritchard).
Orthographic rendering of the 3D mesh model of the Westwork, west facade (by Douglas Pritchard).



unexpected events may reduce the quantity or quality of initial data collection. The initial TLS data capture is reviewed and registered in the office, and any obstructions, poor registration connections, or missing spaces are identified. This approach also applies when addressing gaps in photogrammetric imagery. This is typical of most complex documentation projects, requiring a second or more visits to address missing data.

The Aachen project benefited from three site visits. The first documentation trip provided most of the project's data, including TLS scans and terrestrial/UAV photogrammetric imagery. The second trip focused on scanning the bell tower, the upper surfaces of the vaults, and the upper structural levels of the choir attic areas. Additional photography was taken of the exterior, including areas previously obstructed by scaffolding and construction netting. During the third trip, coinciding with a

se. Sebbene la capacità dei software 3D di scambiare e utilizzare informazioni sia migliorata di recente, è ancora limitata a un metodo basato su importazione/modifica/esportazione tramite più programmi – ad esempio, la registrazione dei dati in un'applicazione, la modifica dei dati di punti in un'altra e la generazione della mesh 3D fotogrammetrica in un'ulteriore applicazione. Questo approccio frammentato aumenta la complessità delle operazioni e crea una dipendenza da molteplici software, formati e tipi di file, influenzando in termini complessivi la gestione dei file, l'accessibilità e la sostenibilità dei dati.

A differenza della natura leggera dei dati grezzi di punti con il loro formato *open-source* .e57, anche l'archiviazione a lungo termine dei file di produzione fotogrammetrici rappresenta un problema. L'interoperabilità efficace dei dati di mesh pesanti all'interno di

applicazioni GIS, CAD, BIM e software per il gaming è ugualmente complessa.

In questo progetto è emerso chiaramente che i modelli mesh 3D fotorealistici risultano più vantaggiosi per la visualizzazione e la presentazione. Sebbene il progetto di Aachen comprenda una grande quantità di scansioni e immagini, che hanno presentato sfide significative di elaborazione anche su sistemi informatici di alto livello, i progressi in corso nell'hardware e nel software renderanno sempre più gestibili tali dataset di grandi dimensioni in futuro. Si prevede infatti che le tecnologie emergenti, tra cui l'elaborazione basata su *cloud*, l'intelligenza artificiale, la visione artificiale e algoritmi ottimizzati per la manipolazione di dati 3D, nuvole di punti e mesh, semplificheranno i flussi di lavoro, consentendo a ricercatori, architetti e amministratori di siti di gestire, archiviare e condividere dataset di grandi

13/ Vista dell'interno della nuvola di punti (elaborazione di Douglas Pritchard).
View of the interior of the points cloud (by Douglas Pritchard).

14/ Pagina successiva. Vista dell'interno della nuvola di punti (elaborazione di Douglas Pritchard).
Next page. View of the interior of the points cloud (by Douglas Pritchard).

dimensioni in modo più efficace [Mirzaei et al. 2022; Enenche et al. 2024].

Conclusioni

Le tecniche di registrazione dei dati e i risultati del progetto sulla Cattedrale di Aachen offrono un approccio replicabile per attività simili di documentazione del patrimonio. Questo progetto sottolinea i benefici e le sfide dell'uso di tecnologie di registrazione complementari per fornire una copertura completa delle superfici di una struttura storica, come la Cattedrale UNESCO. Grazie all'uso di scansione laser terrestre, fotogrammetria digitale terrestre e fotogrammetria digitale basata su UAV, il progetto ha beneficiato di dati ad alta risoluzione, geometricamente precisi e fotorealistici dell'architettura, delle superfici e dei materiali dell'edificio. L'applicazione di un approccio integrato di diverse metodologie di rilievo ha migliorato l'efficienza delle varie attività, in particolare per le aree complesse e di difficile accesso.

Il progetto della Cattedrale ha sottolineato l'importanza di creare modelli 3D con alta affidabilità geometrica, in particolare quelli derivati da dense nuvole di punti, il cui livello di affidabilità è fondamentale per la conservazione del patrimonio globale, dato il crescente rischio rappresentato da eventi naturali e antropici, come i cambiamenti climatici, il

turismo eccessivo, lo sviluppo urbano e i conflitti. I dati 3D acquisiti preservano l'essenza storica della Cattedrale in una forma digitale senza tempo, mantenendo una connessione geometrica dimostrabile con l'edificio. Inoltre, i dati possono adattarsi a future applicazioni non previste grazie all'elevata fedeltà della registrazione. La precisione del processo lo rende applicabile per documentare, in modo altrettanto approfondito e preciso, siti del patrimonio culturale di ambito nazionale e internazionale.

Ringraziamenti

Siamo grati a Jan Richarz, il Master Builder (*Dombaumeister*), e al personale della Cattedrale di Aachen per il loro supporto, la guida e l'accesso al sito. Il team di progetto è composto da Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffio, Carlo Inglese e Guglielmo Villa del Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura di Sapienza Università di Roma (Italia), e Yannick Ley e Bruno Schindler della RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Architekturgeschichte (Germania).

Ringraziamo per l'assistenza generosa Dr. Christoph Fröhlich, Christopher Held, Daniel Blerch e Zoller + Fröhlich.

Traduzione dall'inglese
di Martina Attenni e Marika Griffio

media dissemination event [Aachen Cathedral 2024], the team conducted scans using the Z+F FlexScan SLAM scanner (fig. 10).

The TLS systems were positioned at the thresholds of all the cathedral's external openings, including doorways, balconies, and parapets.

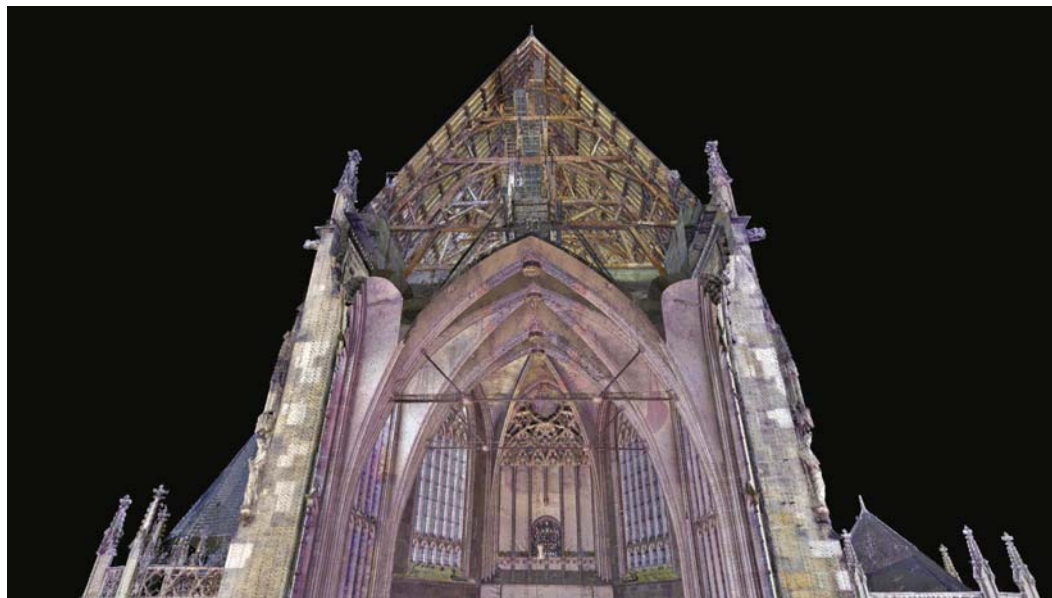
These position points were thoroughly scanned to accurately link the interior and exterior scan datasets. By combining interior and exterior points cloud data, the resulting 3D dataset of the building aids in understanding and interpreting its spatial organisation and context. Integrated points cloud data enables rapid data segmentation, cross-sections, and 2D plans, allowing for a closer examination of distinct architectural features such as the Cathedral's ornate roof, attic space, and dome. One critical advantage of TLS is the relative ease with which interior and exterior datasets can be linked – which is more challenging to achieve with a photogrammetric-only approach.

By the project's conclusion, 396 individual TLS scans were using the 5010X and 5016, three extensive SLAM segments (the attic area and the two internal spiral staircases), and approximately 8,145 images were captured with the TDP and UAV (table 1). The data was organised by interior spaces, exterior, and roof levels for production purposes. Eighteen cross-over scans connected the interior and exterior datasets. Registration worked well, including connecting the interior and exterior datasets through the cross-over scans.

Registration and post-production

Similar to previous TLS projects, the post-capture production process typically involves four stages: (1) data registration, (2) data clean-up, (3) data segmentation, (4) object recognition, and (5) output [Pritchard et al. 2017; Wu et al. 2022]. With TLS / TDP and within Epic's Reality Capture photogrammetric software, the workflow is: (1) data organisation, (2) .e57 and image data import, (3) data alignment, (4) reconstruction, (5) texturing and (6) output. Both production workflows rely on an accurate and well-structured points cloud dataset as their foundational component.

Due to its efficient structure, points cloud data is valuable for documentation, long-term digital







15/ *Pagina precedente*. Vista dell'esterno della nuvola di punti (elaborazione di Douglas Pritchard).
Previous page. View of the exterior of the points cloud (by Douglas Pritchard).

preservation, and archiving. The interior and exterior scan files were imported into Z+F Laser Control (Sapienza) and Leica Register 360 (RGU). To reduce errors, the files were registered cloud-to-cloud based on the immovable architecture, disregarding moving people and tree canopies and then connected to the ground survey network.

Individual .e57 format files from the registered dataset were imported into Autodesk ReCap 360 (v. 2024, 2025) for further data and noise clean-up. When importing into ReCap, a noise filter is applied and the original data is optimised, which can result in a slight loss of detail. The platform's real-time navigation capabilities have proven invaluable for data review and presentations. The .rcp files were then integrated into other Autodesk applications for further development, including AutoCAD and 3D Studio Max. The data could also be imported into other production applications such as CloudCompare, Blender and Rhino.

For the Aachen project, the acquired TDP and UAV images were organised into interior, exterior, attic and roof-level groups for further production. All the image files were colour-balanced and converted from .raw to .jpeg. The registered and cleaned .e57 files and images were combined and processed using the Reality Capture software.

For efficiency, two model versions were processed using the Reality Capture software, one with a textured exterior and one with a textured interior (figs. 11, 12). This resulted in exceptionally photorealistic 3D polygonal meshed models. Once exported into an application such as Autodesk 3D Studio Max, generating images was slow but straightforward. The unoptimised models were brought into the Unreal Game Engine as a trial. The heavy mesh reduced the real-time performance, but the visual results were photorealistic.

The challenge of 3D meshing software is that even with careful decimation on a high-end workstation, processing large mesh models can be time-consuming. Navigating the heavy files is resource-intensive, and cleaning the interconnected polygons, edges, and faces to remove noise and artefacts can be laborious.

Although there is ongoing research and commercial advancements to enhance tools for better interoperability and knowledge exchange of 3D data [Bruno et al. 2022], managing point data is more flexible and efficient than heavy 3D meshes or BIM/HBIM models. One inherent benefit of laser scanning is that despite the numerous high-resolution scans within the project, the points cloud dataset is relatively straightforward: it consists of a series of unrelated points within a 3D space (figs. 13, 14, 15).

A notable concern is the excessive generation of temporary production files and a rigid proprietary file structure. Transferring project files or the entire Aachen dataset between system or collaborators can be challenging. While the ability of 3D software to exchange and use information has improved recently, it is still limited to a multi-program import/edit/export production method – for example, data registration in one application, editing point data in another, and generating photogrammetric 3D mesh in yet another.

This disjointed approach increases production complexity and creates a reliance on multiple software formats and file types. These activities present long-term challenges for file management, accessibility, and data sustainability. Unlike the lightweight nature of raw point data with its open-source .e57 format, the long-term data archiving of photogrammetric production files is also an issue. The effective interoperability of heavy mesh data within GIS, CAD, BIM, and game engine applications is equally challenging. It was evident in this project that photorealistic 3D mesh models are more advantageous for visualisation and presentation. Although the Aachen project generated an extensive quantity of scans and imagery that presented significant processing challenges even on high-end computing systems, ongoing advancements in hardware and software will make handling such large datasets increasingly feasible in the future. Emerging technologies, including cloud-based processing, artificial intelligence, machine vision, and optimised algorithms for 3D, point cloud, and mesh manipulation, are anticipated to streamline workflows, enabling researchers, architects, and site managers to manage,

store, and share large datasets more effectively [Mirzaei et al. 2022; Enenche et al. 2024].

Conclusion

The Aachen Cathedral project's extensive recording techniques and results offer a replicable approach for similar heritage documentation projects. This project highlights the benefits and challenges of using complementary recording technologies to provide comprehensive surface coverage of a historic structure, such as the UNESCO Cathedral. Using Terrestrial Laser Scanning, Terrestrial Digital Photogrammetry, and UAV-based Digital Photogrammetry, the project successfully captured high-resolution, geometrically precise, and photorealistic data of the building's intricate architecture, surfaces, and materials. Integrating a combined laser scanning and photogrammetric approach enhanced the project's efficiency, particularly for complex and hard-to-reach areas.

The Aachen Cathedral project emphasised the importance of creating 3D models with high geometric accuracy, particularly those derived from captured dense 3D point clouds, as they are more legitimate than less accurate computer-generated 3D models. The level of accuracy is critical for conserving global heritage, given the growing threats from natural and man-made events, such as climate change, excessive tourism, urban development, and conflict. The acquired 3D data preserves the cathedral's historical essence in a timeless digital form by maintaining a demonstrable geometric connection to the building. Additionally, the data can accommodate future unanticipated applications due to the high fidelity of the recording. Similar national and international heritage sites should be recorded as thoroughly and precisely as possible through reliable methods if the resources are available.

Acknowledgements

We are grateful to Jan Richarz, the Master Builder (Dombaumeister) and the staff of the Aachen Cathedral for their support, guidance and access.

The project team consisted of Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini,

Marika Griffó, Carlo Inglese, and
Guglielmo Villa from the Department of
History, representation and restoration
of architecture, Sapienza University of

Rome (Italy), and Yannick Ley and Bruno
Schindler from RWTH Aachen University,
Lehrstuhl für Architekturgeschichte
(Germany).

We are grateful for the generous assistance of
Dr. Christoph Fröhlich, Christopher Held,
Daniel Blersch, and Zoller + Fröhlich.
English text by the author

References

- Aachen Cathedral 2024 = *An almost perfect digital twin of Aachen Cathedral*. <<https://www.aachenerdom.de/en/2024/01/13/an-almost-perfect-digital-twin-of-aachen-cathedral/>>.
- Adamopoulos, Rinaudo 2019 = Efstathios Adamopoulos, Fulvio Rinaudo. 3D interpretation and fusion of multidisciplinary data for heritage science: a review. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W15-17-2019, pp. 17-24. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-17-2019>>.
- Attenni et al. 2023 = Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffó, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pritchard, Guglielmo Villa. The vaulting system of the Palatine Chapel: The Aachen Cathedral World Heritage Site Documentation Project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 119-128. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-119-2023>>.
- Barrile et al. 2022 = Vincenzo Barrile, Ernesto Bernardo, Antonino Fotia, Giuliana Bilotta. Integration of laser scanner, ground-penetrating radar, 3D models, and mixed reality for artistic, archaeological, and cultural heritage dissemination. *Heritage*, 5 (3), 2022, pp. 1529-1550. ISSN: 2571-9408. <<https://doi.org/10.3390/heritage5030081>>.
- Bianchini 2020 = Carlo Bianchini. A Methodological Approach for the Study of Domes. *Nexus Network Journal*, 22 (4), 2020, pp. 983-1013. ISSN: 1590-5896. <<https://doi.org/10.1007/s00004-020-00526-9>>.
- Bruno et al. 2022 = Silvana Bruno, Albina Scioti, Alessandra Pierucci, Rocco Rubino, Tommaso Di Nola, Fabio Fatiguso. VERBUM - Virtual enhanced reality for building modelling (virtual technical tour in digital twins for building conservation). *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 2022, pp. 20-47. ISSN: 1874-4753. <<https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.002>>.
- Daneshmand et al. 2018 = Morteza Daneshmand, Ahmed Helmi, Egils Avots, Fatemeh Noroozi, Fatih Alisinanoglu, Hasan Sait Arslan, Jelena Gorbova, Rain Eric Haamer, Cagri Ozcinar, Gholamreza Anbarjafari. 3D scanning: A comprehensive survey. *arXiv.org*, 24, January 2018. ISSN: 2331-8422. <<https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.08863>>.
- Enenche et al. 2024 = Patrick Enenche, Dong Ho Kim, Dongo You. On the road to the metaverse: Point cloud video streaming: Perspectives and enablers. *ICT Express*, 2024. ISSN: 2405-9595. <<https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.11.001>>.
- European Commission 2022 = 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 - Executive summary*. Publications Office of the European Union, 2022. ISBN: 9789276513162. <<https://data.europa.eu/doi/10.2759/581678>>.
- Fernández-Steeger et al. 2011 = Toms Fernández-Steeger, Christoph Grützner, Klaus Reicherter, Andreas Schaub. Aquisgrani terrae motus factus est (part 1): The Aachen cathedral (Germany) built on weak ground? *Quaternary International*, 242, 2011, pp. 138-148. ISSN: 1040-6182. <<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.05.004>>.
- Galeazzi 2017 = Fabrizio Galeazzi. 3D recording, documentation and management of cultural heritage. *International Journal of Heritage Studies*, 23 (7), 2017, pp. 671-673. ISSN: 1470-3610. <<https://doi.org/10.1080/13527258.2017.1300933>>.
- Giuliano 2014 = M.G. Giuliano. Cultural heritage: An example of graphic documentation with automated photogrammetric systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5, 2014, pp. 251-255. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-251-2014>>.
- Hassan, Fritsch 2019 = Amin Talha Hassan, Dieter Fritsch. Integration of laser scanning and photogrammetry in 3D/4D cultural heritage preservation - A review. *International Journal of Applied Science and Technology*, 9, 4, 2019, pp. 9-16. ISSN: 2277-8691. doi:10.30845/ijast.v9n4p9.
- Huvila 2018 = Isto Huvila. The subtle difference between knowledge and 3D knowledge. *Hamburger Journal für Kulturanthropologie*, 7, 2018, pp. 99-111. ISSN: 2363-8753. <<https://journals.sub.uni-hamburg.de/hjk/article/view/1196>>.
- Historic England 2024 = Historic England. *Geospatial survey specifications for cultural heritage*. York: Historic England, 2024. <<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/geospatial-survey-specifications-cultural-heritage/>>.
- Mirzaei et al. 2022 = Kaveh Mirzaei, Mehrdad Arashpour, Ehsan Asadi, Hossein Masoumi, Yu Bai, Ali Behnood. 3D point cloud data processing with machine learning for construction and infrastructure applications: A comprehensive review. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 2022, 101501. ISSN: 1474-0346. <<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101501>>.
- Oliveira et al. 2014 = Adriano Oliveira, João F. Oliveira, João M. Pereira, Bruno R. De Araújo, João Boavida. 3D modelling of laser scanned and photogrammetric data for digital documentation: The Mosteiro da Batalha case study. *Journal of Real-Time Image Processing*, 9(4), 2014, pp. 673- 688. ISSN: 1861-8219. <<https://doi.org/10.1007/s11554-012-0276-2>>.
- Pritchard et al. 2017 = Douglas Pritchard, Joerg Sperner, Sophie Hoepner, Ruth Tenschert. Terrestrial laser scanning for heritage conservation: The Cologne Cathedral documentation project. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W2, 2017, pp. 213-217. ISSN: 2194-9050. <<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-213-2017>>.
- Pritchard et al. 2023 = Douglas Pritchard, Marika Griffó, Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Carlo Inglese, Yannick Ley. Evolution of recording methods: the Aachen CathedralWorld Heritage Site documentation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1241-1249. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1241-2023>>.
- Remondino 2011 = Fabio Remondino. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3 (6), 2011, pp. 1104-1138. ISSN: 2072-4292. <<https://doi.org/10.3390/rs3061104>>.
- Wu et al. 2022 = Chao Wu, Yongbo Yuan, Yang Tang, Boquan Tian. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*, 22 (1), 2022, p. 265. ISSN: 1424-8220. <<https://doi.org/10.3390/s22010265>>.

La rivista è inclusa nella Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics), dove è indicizzata nell'Arts & Humanities Citation Index e nel database di Scopus dove sono presenti gli abstract dei contributi.

La selezione degli articoli per *Disegnare. Idee Immagini* prevede la procedura di revisione e valutazione da parte di un comitato di referee (*blind peer review*); ogni contributo viene sottoposto all'attenzione di almeno due revisori, scelti in base alle loro specifiche competenze. I nomi dei revisori sono resi noti ogni anno nel numero di dicembre.

The journal has been selected for coverage in the Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics); it is indexed in the Arts & Humanities Citation Index and abstracted in the Scopus database.

The articles published in Disegnare. Idee Immagini are examined and assessed by a blind peer review; each article is examined by at least two referees, chosen according to their specific field of competence.

The names of the referees are published every year in the December issue of the journal.

Gli autori di questo numero
Authors published in this issue

Martina Attenni

*Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 martina.attenni@uniroma1.it*

Roberto Barni

*Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 roberto.barni@uniroma1.it*

Carlo Bianchini

*Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 carlo.bianchini@uniroma1.it*

Marika Griffio

*Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 marika.griffio@uniroma1.it*

Yannick Ley

*Chair of Architectural History
 RWTH Aachen University
 Schinkelstraße 1
 52062 Aachen, Germania
 yannick.ley@rwth-aachen.de*

Douglas Pritchard

*Scott Sutherland School of Architecture
 Robert Gordon University
 Garthdee House, Garthdee Road
 Aberdeen, AB10 7QB, Scozia, Regno Unito
 d.pritchard1@rgu.ac.uk*

Jan Richarz

*Domkapitel Aachen
 Dombauhütte
 Klosterplatz 2
 52062 Aachen, Germania
 Klosterplatz 3 / 1.OG*

Bruno Schindler

*RWTH Aachen University
 Templergraben 55
 52062 Aachen, Germania
 schindler@ages.rwth-aachen.de*

Jan Richarz

L'importanza di un modello 3D
per la Cattedrale di Aachen
*The importance of a 3D model
for Aachen Cathedral*

Yannick Ley

L'evoluzione della Cattedrale di Aachen
in sedici immagini
*The evolution of Aachen Cathedral
in sixteen figures*

Douglas Pritchard

La documentazione della Cattedrale di Aachen:
approcci integrati per la conservazione digitale
utilizzando *Terrestrial Laser Scanning*
e fotogrammetria

*The documentation of Aachen Cathedral:
integrated approaches for digital preservation
using Terrestrial Laser Scanning
and photogrammetry*

Bruno Schindler

La geometria della Cappella Palatina
di Aachen e il sistema di misurazione pratica
applicato in cantiere

*The geometry of the Aachen Palatine Chapel
and the practical measurement system
on the building site*

Carlo Bianchini

Sulle unghie coniche della Cappella Palatina
di Aachen
*The conical vaults in the Palatine Chapel
in Aachen*

Martina Attenni, Roberto Barni, Marika Griffò

Sperimentazioni di *Machine Learning*
per la mappatura della Cattedrale di Aachen
*Machine Learning experiments for mapping
Aachen Cathedral*



WORLDWIDE DISTRIBUTION

AND DIGITAL VERSION

EBOOK

AMAZON, APPLE, ANDROID

WWW.GANGEMEDITORE.IT

ISSN 1123-9247



9 771123 924009

4 0068



ISBN 978-884925280-4



9 788849 125280