



Reverse modeling per la stampa 3D di complessi monumentali

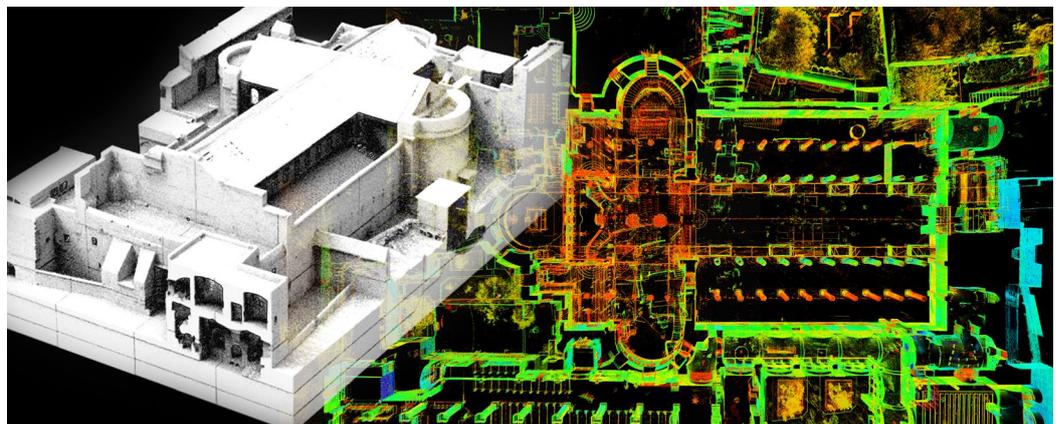
Hangjun Fu

Abstract

Il contributo tratta lo studio di tecniche di modellazione e prototipazione solida sviluppate a partire da database 3D descrittivi del patrimonio storico-architettonico. Tali processi sono finalizzati ad ottenere riproduzioni a differenti scale e livelli di dettaglio di uno specifico monumento o complesso monumentale. Le attività di documentazione digitale e produzione di banche dati 3D, ottenute dall'integrazione di nuvole di punti realizzate da strumentazioni *image based* e *range based*, consentono la produzione di elaborati tecnici metricamente affidabili per l'analisi dell'architettura. Attraverso metodologie di *reverse modeling*, tali banche dati possono essere convertite in modelli che, opportunamente ottimizzati, segmentati e scomposti, risultano poi stampabili in 3D. I modelli a stampa, frutto di un processo critico di analisi e sintesi delle informazioni acquisite, sono utili per una fruizione tattile oltre che visiva del patrimonio e favoriscono la comprensione delle componenti formali e delle articolazioni che governano lo spazio. Il contributo mostra alcuni esiti di una ricerca nata a partire dal progetto di documentazione della Basilica della Natività di Betlemme, sito UNESCO dal 2012. La sperimentazione è stata condotta dal Laboratorio DAAd-LAB del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia all'interno di un accordo di collaborazione con l'azienda Piacenti Spa, incaricata dei restauri dell'intero complesso.

Parole chiave

reverse modeling, 3D database, stampa 3D, Basilica della Natività Betlemme, UNESCO



La vista assonometrica del modello *mesh* e la sezione prospettica della nuvola di punti della natività di Betlemme. Elaborazione grafica dell'autore.

Introduzione

Se nell'Era della digitalizzazione siamo stati testimoni di una transizione del 'reale' in 'virtuale', grazie allo sviluppo di nuove metodologie di documentazione e comunicazione che hanno permesso di trasformare parti del mondo fisico in modelli virtuali tridimensionali, si assiste oggi ad un'ulteriore fase che consente di chiudere l'anello 'reale-virtuale-reale' del processo di documentazione [1]. Tale ritorno alla forma reale del mondo fisico si esplicita attraverso la trasformazione di banche dati in modelli tangibili, concrete riproduzioni dell'oggetto indagato, opportunamente scalate rispetto all'originale in base alla scala di rappresentazione [Brusaporci 2017]. Di conseguenza, tanto più l'oggetto sarà complesso quanto più la sua riproduzione sarà guidata da uno specifico disegno progettuale, legato alla scala di rappresentazione e al livello di dettaglio da ottenere. Ancor più complessa sarà la gestione di banche dati eterogenee destinate al processo di *reverse modeling*: l'utilizzo di più strumentazioni digitali (laser scanner e/o strumenti fotogrammetrici), la differente densità dei punti, la mancanza di dato e la necessaria interpretazione delle superfici mancanti, sono tutti aspetti che entrano in gioco in un processo di modellazione 3D per il *Cultural Heritage* (CH) finalizzato alla stampa a scala architettonica. A partire da un caso studio estremamente articolato come il complesso architettonico della Natività di Betlemme, l'obiettivo della presente ricerca è stato quindi quello di strutturare una metodologia di modellazione di tipo *reverse modeling*, replicabile su altri contesti simili, per ottenere modelli a stampa 3D altamente descrittivi, capaci di raccontare da un punto di vista inedito il patrimonio culturale indagato. Inoltre, a partire da prodotti che offrono una comunicazione agevole, diretta ed inclusiva, e di documentazione e racconto del patrimonio, si consente ai potenziali visitatori un tipo di interazione diversificata con il bene [Aleari 2016]. Non vedenti o ipovedenti possono beneficiare di un percorso di fruizione di tipo tattile grazie al tipo di materiale utilizzato per la stampa 3D e all'alto livello di definizione delle superfici materiche; dal punto di vista cognitivo, la stampa 3D permette di comprendere simultaneamente la relazione tra tutti gli spazi attraverso l'immersione fisica all'interno del modello; allo stesso tempo, la possibilità di sezionare in varie parti l'oggetto prototipato ne permette una fruizione ludico-didattica.

Il modello e il modello a stampa 3D

Il modello tridimensionale, quale riproduzione fisica in scala di un manufatto, nasce come strumento di studio per il progetto architettonico. Un tempo veniva utilizzato come strumento di comunicazione utile ed efficace, in grado di trasmettere le idee del progettista e facilitare la comprensione dei dettagli costruttivi, sia al committente che agli operai, in fase di esecuzione dell'opera. Ne è un caso esemplare il modello ligneo dalla Basilica di San Pietro di Antonio da Sangallo, eseguita dalle maestranze sotto la direzione dell'architetto Antonio Labacco [2]

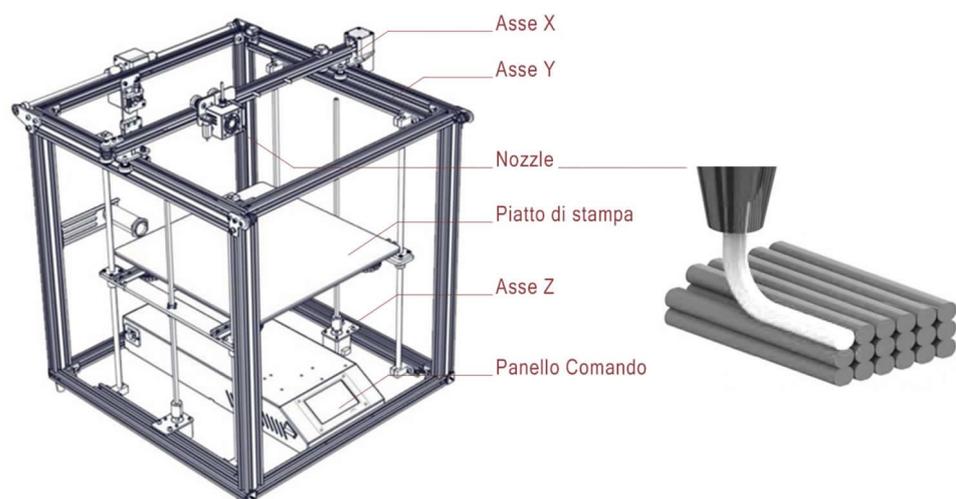
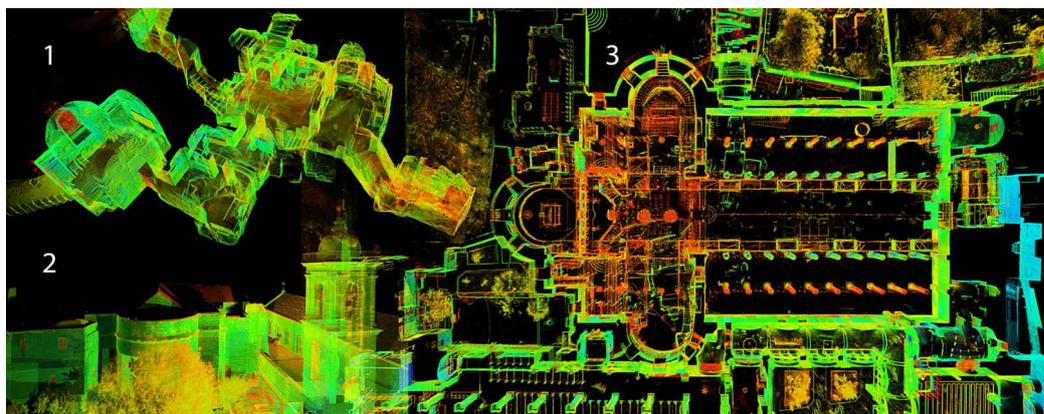


Fig. 1. Schema di funzionamento di una stampante FDM. A sinistra: modello Ender 5PLUS. A destra: sovrapposizione dei layer di stampa. Elaborazione grafica dell'autore.

Fig. 2. Viste della nuvola di punti TLS del complesso della Basilica della Natività. In ordine: 1) il sistema delle grotte ipogee; 2) Spazi esterni e accesso della Basilica; 3) Vista dall'alto delle navate. Elaborazione grafica dell'autore.



[Docci 2009]. Il modello, in scala 1:30 con un'altezza totale di 4,68 metri e una base di 6,02 x 7,36 metri, si poteva aprire in corrispondenza di una sezione longitudinale centrale, così da facilitare la comprensione degli spazi interni e della composizione strutturale. Dal modello è ancora oggi possibile comprendere le scelte progettuali intraprese dall'architetto e prendere visione degli apparati decorativi interni ed esterni della Basilica [Cadei 1999; Benedetti 2009]. L'efficienza comunicativa del modello ligneo fornì a Michelangelo, che succedette Sangallo a capo del cantiere, di criticare aspramente progetto, sia per la mancanza di luce fornita dai sistemi di illuminazione predisposti che per la cattiva gestione degli spazi interni [3]. Sia Michelangelo che Brunelleschi erano soliti realizzare modelli per rappresentare le loro scelte progettuali, così come per focalizzare l'attenzione solo su determinati aspetti ritenuti utili ai fini della comprensione dell'idea [4]. Brunelleschi per quasi tutti i suoi progetti ha realizzato un modello curato nei minimi dettagli, focalizzando l'attenzione solo sugli aspetti che riteneva utile comunicare: la struttura, le decorazioni o la scelta dei materiali [Corazzi 2021; Ricci 2010]. In questa accezione, il modello fisico non era considerato uno strumento accessibile a tutti dal momento che la sua realizzazione richiedeva tempo, maestria, personale e specifiche abilità tecniche, che implicavano anche costi elevati. Oggi, attraverso le tecnologie digitali, è possibile offrire un contributo essenziale alla ricerca, alla diagnosi, al restauro, alla conservazione, alla tutela, alla comunicazione e alla divulgazione e fruizione dei beni culturali. L'uso di queste tecnologie è aumentato esponenzialmente, creando nuovi scenari e possibilità nel campo del CH. L'evoluzione di strumenti, metodi, tecnologie e software si riflette nelle azioni di rilievo, di produzione e gestione di banche dati 3D, le quali hanno dato vita ai più recenti processi di stampa 3D. La prototipazione rapida data dalla stampa tridimensionale è una tecnica che consente la produzione diretta e in serie di copie materiche di oggetti caratterizzati da forme e geometrie anche complesse. Tutto questo è reso possibile a partire da un modello digitale ottenuto da processi di *reverse modelling*, la cui stampa avviene secondo tempistiche facilmente calcolabili e a costi relativamente contenuti, se pensati con stampanti commerciali. Negli ultimi anni [Zastrow 2020; Scopigno 2017] questa tecnica ha avuto un notevole impulso dovuto alla grande diffusione sul mercato delle stampanti 3D desktop, economiche e dalle dimensioni compatte. Queste utilizzano la tecnologia additiva del tipo *Fused Deposition Modelling* (FDM), che permette di generare volumi reali tridimensionali attraverso la sovrapposizione di strati di materiale. Il processo di realizzazione del modello a stampa tridimensionale *reality-based* e ad alta affidabilità presuppone, come dato di partenza, il rilievo digitale svolto secondo procedure consolidate [Parrinello et Al. 2021]. Al rilievo segue una fase di post-produzione del tipo *Scan-to-Mesh*, durante la quale sono svolte operazioni di ottimizzazione della copia digitale per ottenere un modello 'Manifold' [5] stampabile in 3D.

Caso studio

Al fine di ottimizzare i processi di stampa tridimensionale per proporre un protocollo metodologico da replicare sul patrimonio architettonico, lo studio è stato applicato alla Basilica della Natività di Betlemme: la complessità del costruito ha consentito di testare i processi

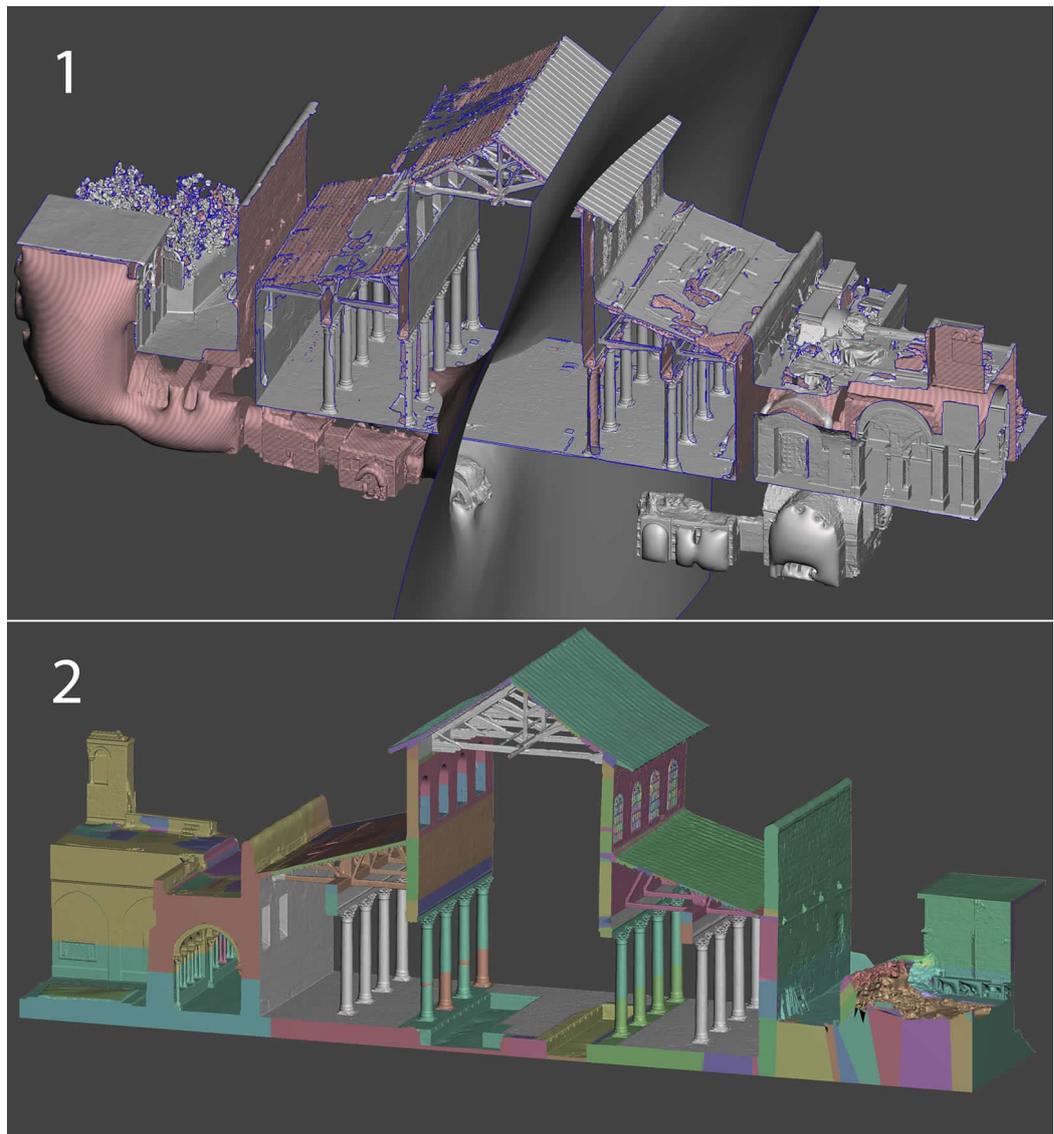


Fig. 3. Vista del modello mesh grezzo importato nel software MeshMixer. In basso (2): vista del modello mesh ottimizzato nella fase di post-produzione del dato. Elaborazione grafica dell'autore.

che conducono dal modello digitale a quello fisico. La Basilica è una delle principali mete di pellegrinaggio in Terra Santa e dal giugno 2012 è inserita nella lista Unesco del Patrimonio Mondiale. Tale nomina nel 2014 ha promosso l'inizio di interventi di restauro, eseguiti dall'azienda Piacenti S.p.A. [6]. Per supportare le azioni conservative con disegni che rappresentassero lo stato di fatto della Basilica, i ricercatori del Laboratorio DAAd-LAB [7] dell'Università di Pavia e del laboratorio congiunto LS3D (Università di Firenze) hanno affiancato l'azienda con una serie di azioni di documentazione propedeutiche ai lavori di restauro [8]. I rilievi hanno riguardato sia l'architettura della Natività che i dettagli musivi pavimentali e parietali [Parrinello 2015; La Placa 2019; Doria 2020]. Le attività di documentazione sono state organizzate in differenti campagne di rilievo che hanno visto l'impiego di Laser Scanner Terrestre (TLS – Faro Cam2); Laser Scanner Mobile LiDAR (MLS – BLK2GO) e sistemi per l'acquisizione fotogrammetrica (*Unmanned Aerial Systems* – UAS – DJI Phantom 4 Pro). Nel 2022, concluse le attività di documentazione a servizio del restauro, la Piacenti S.p.A ha affidato al laboratorio di ricerca DAAd-LAB, la produzione di un modello a stampa 3D in scala 1:50 dell'intero complesso della Natività, destinato all'esposizione museale in occasione della mostra itinerante *Bethlehem Reborn* [9]. Il progetto di ricerca ha previsto la gestione del preesistente database di rilievo per sviluppare il modello digitale per la stampa tridimensionale. Il processo sviluppato è quello di *reverse modelling*: partendo dal dato digitale discretizzato dello stato di fatto (rappresentato dalla nuvola di punti laser e/o fotogrammetrica), è

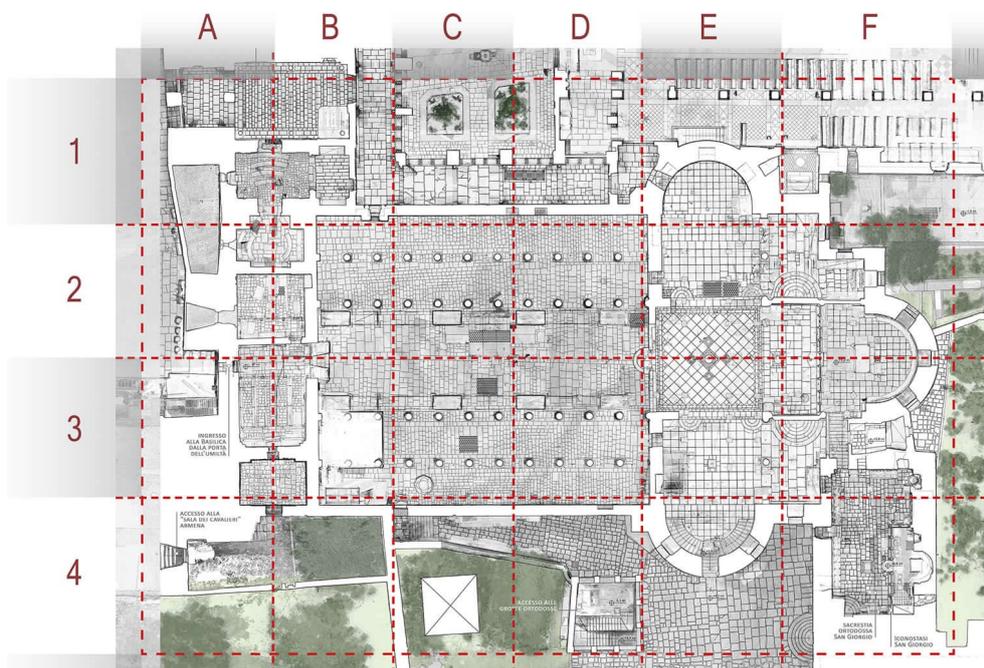


Fig. 4. Schema planimetrico con evidenziate in rosso la divisione dei blocchi per la successiva fase di stampa. Elaborazione grafica realizzata da Becherini P, Università di Firenze.

stato possibile generare un primo modello digitale continuo (Mesh) tramite l'applicazione di processi semiautomatici. Successivamente, il modello è stato ottimizzato attraverso elaborazioni manuali. A seconda della tipologia del dato di partenza [10], la fase di post-produzione del modello mesh può richiedere tempistiche differenti; il processo a partire da base fotogrammetrica include la generazione di una mesh ottimizzata ma meno precisa morfologicamente; il rilievo ottenuto dall'applicazione di Laser scanner terrestri risulta più affidabile e rappresenta la base ottimale per un migliore risultato dal punto di vista della geometria [11]. La nuvola di punti prodotta al termine delle campagne di rilievo si configurava come un database con un peso complessivo di 465GB; per questo motivo è stata suddivisa in diverse porzioni, dapprima in aree omogenee: le grotte sotterranee, il tetto e il corpo centrale. Il corpo centrale è stato a sua volta suddiviso in 6 strisce ciascuna composta da 4 blocchi. La nuvola di punti è stata porzionata avendo cura di preservare una fascia di sovrapposizione tra i blocchi adiacenti, accorgimento indispensabile per le successive fasi di allineamento. Al primo taglio sono seguiti i processi di post-produzione del tipo *Scan-to-Mesh*: ogni singolo blocco viene trasformato in una mesh poligonale attraverso un processo che prevede l'impiego di differenti software (3DReshaper, MeshLab e MeshMixer), le cui le fasi principali vengono elencate a seguire:

- Decimazione della nuvola di punti;

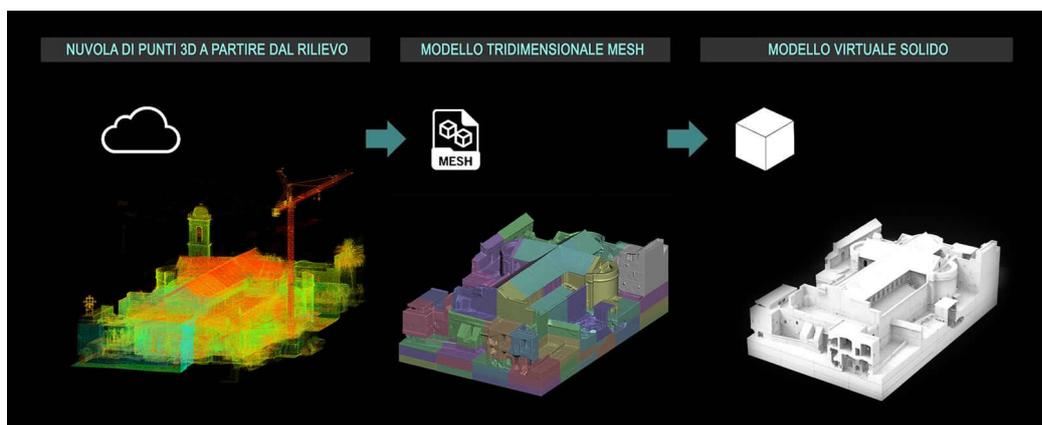


Fig. 5. Fasi evolutive del modello finalizzate alla stampa 3D. Da sinistra: nuvola di punti TLS; modello tridimensionale mesh suddiviso in blocchi e ottimizzato; modello virtuale solido. Elaborazione grafica dell'autore.

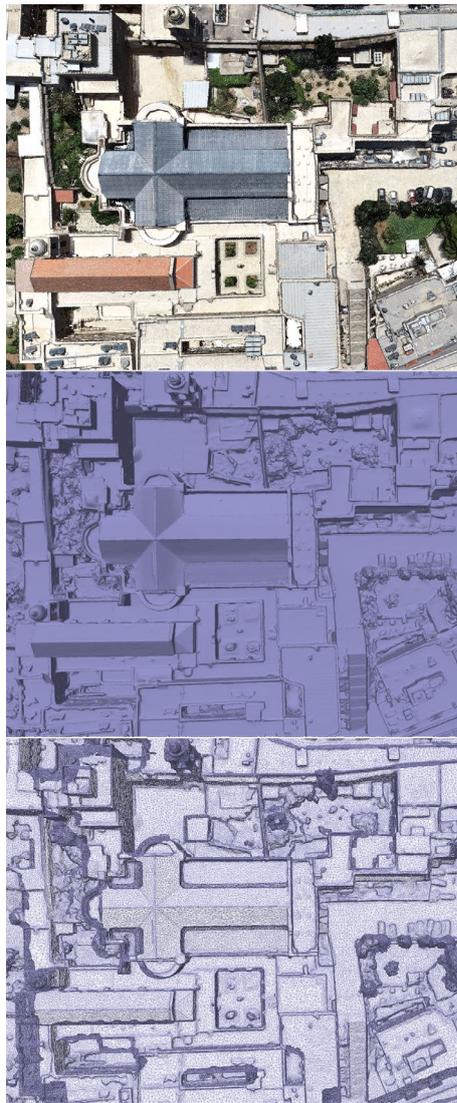
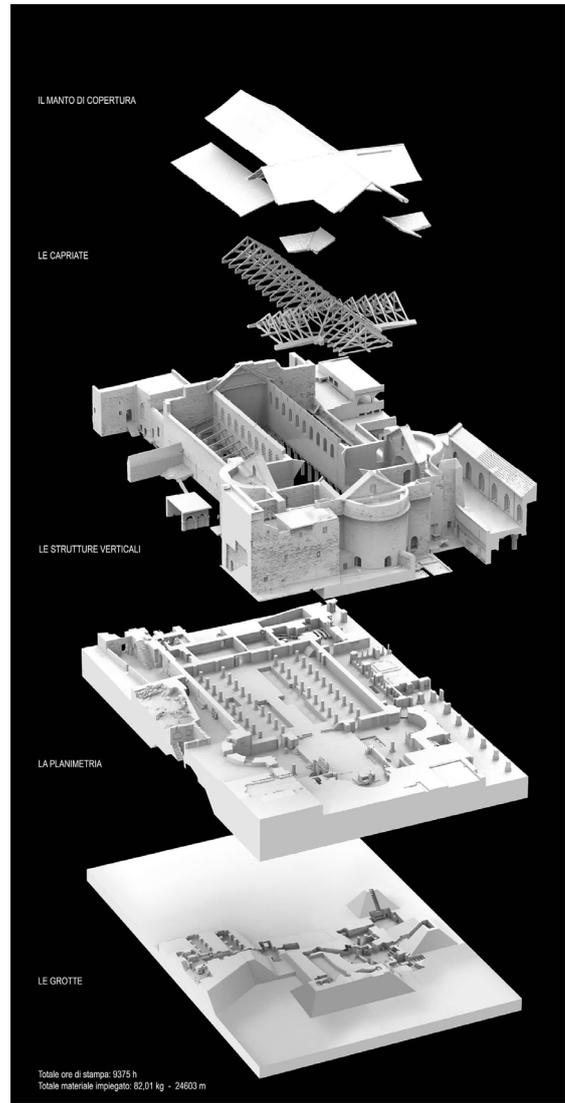


Fig. 6. Processo di elaborazione del dato fotogrammetrico. Dall'alto verso il basso: *Textured Mesh*; *Mesh model*; *Wireframe view*. Elaborazione grafica dell'autore.

Fig. 7. Render del modello tridimensionale suddiviso secondo i piani di taglio progettati. Elaborazione grafica dell'autore.



- Pulizia delle nuvole di punti;
- Generazione di modelli mesh grezzi;
- Integrazione di parti mancanti;
- Ottimizzazione del modello mesh e rimozione dei difetti [12]

La fase di 'pulizia della nuvola di punti' ha richiesto tempistiche particolarmente dilatate (circa 2 mesi) a causa della presenza delle impalcature di cantiere all'interno della chiesa durante il rilievo.

Gli output generati consistono in una serie di modelli di Mesh solidi, con un buon grado di sovrapposizione (circa 20% del volume complessivo) tra pezzi adiacenti, successivamente rifilati con un taglio netto per creare una giunzione di fino, con errore sub-millimetrico (+/- 0,1 mm). Per i luoghi non accessibili con TLS o MLS come il tetto, la superficie esterna della facciata posteriore e altre aree irraggiungibili, sono stati pianificati rilievi di tipo fotogrammetrico tramite drone (UAV). L'elaborazione di questo tipo di dato è più veloce rispetto a quella di una nuvola di punti laser, in quanto la pipeline fotogrammetrica (in ambiente Agisoft Metashape) già prevede, al termine del processo, la generazione di un modello mesh. Il modello digitale complessivo dell'intera Basilica è stato discretizzato nelle sub-parti precedentemente elencate, così suddivise con l'obiettivo di facilitare la lettura e fruizione del modello fisico finale. I diversi tagli sono stati pianificati creando in primis una sezione verticale longitudinale attraverso un taglio lungo la navata centrale che, separando la basilica

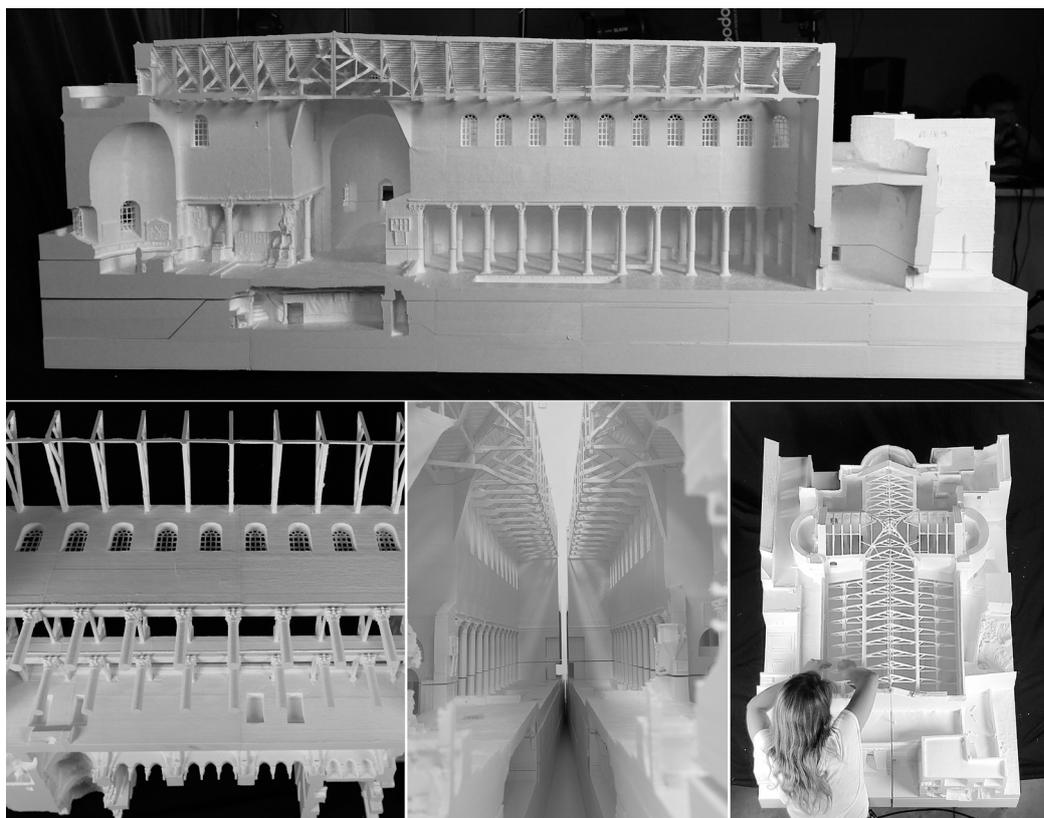


Fig. 8. Fotografie generali e di dettaglio del modello durante la fase di rifinitura successiva alla stampa. Fotografie dell'autore.

in due, pone in evidenza gli spazi interni delle navate. Un secondo taglio orizzontale è stato realizzato ad un'altezza di $\frac{3}{8}$ del fusto della colonna partendo dalla base, permettendo così di sollevare la parte superiore della basilica e mostrarne in dettaglio la planimetria e il soffitto, visibile dal basso verso l'alto. Infine, si è previsto un taglio diagonale (a forma di diamante) per la visualizzazione della planimetria delle grotte, che si sviluppano su diversi livelli. A questo scopo è stata progettata una composizione di piani di taglio inclinati e orizzontali, tale da sezionare sia le grotte che le scale di collegamento al piano terra. Il risultato finale è un modello con base 148x101 cm e alto 52 cm, diviso in sei macro-blocchi scomponibili tra loro per agevolare la lettura degli spazi interni. Per la riproduzione fisica del modello sono state utilizzate le stampanti presenti nei laboratori DAdA-LAB e PLAY dell'Università di Pavia; si tratta di 10 stampanti 3D (modello Creality ender-5 Plus) dotate di un piatto di stampa da 35 x 35 cm. La dimensione del piatto di stampa fissa il limite della massima dimensione di ogni porzione, rendendo necessaria la suddivisione di qualunque modello in blocchi con

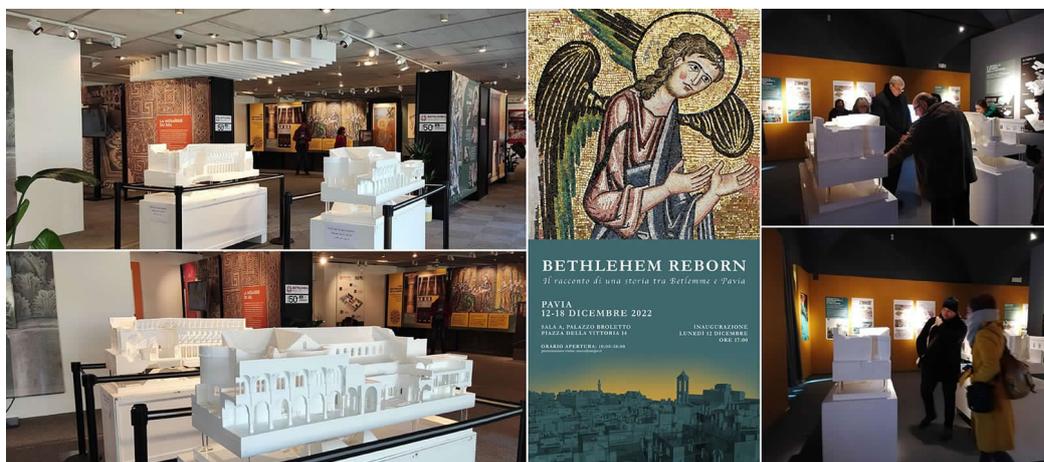


Fig. 9. Esposizione della mostra *Bethlehem Reborn*, dalla sede di Parigi (sinistra) a quella di Pavia (destra) con locandina (centro). Fotografie dell'autore.

la base inferiore a 35 cm per lato. Ciascun macro-blocco, oltre ai tagli generali progettati per rendere il modello 'accessibile', è stato quindi ulteriormente suddiviso in corrispondenza di elementi a sbalzo o aree complesse da stampare. Il modello generale è stato suddiviso in 132 pezzi esportati in formato OBJ e convertiti in formato di stampa G-code tramite il software Cura Slicer di Ultimaker. La possibilità di disporre di dieci stampanti ha permesso di ridurre il tempo effettivo di stampa, grazie al loro utilizzo in parallelo. L'intero processo è durato 7 mesi, partendo dalla modellazione mesh fino alla prototipazione 3D per la quale sono stati impiegati circa 82 kg di filamento in PLA [13], per un totale di 9375 ore di stampa e 2 mesi dedicati alle fasi di assemblaggio e finitura del modello.

Risultati

In occasione della mostra itinerante *Bethlehem Reborn*, che dal 2022 è stata esposta sia presso la sede centrale UNESCO di Parigi che in alcune città italiane, è stato previsto un allestimento nella sede delle sale dell'edificio del Broletto di Pavia, con una serie di pannelli illustrativi descrittivi del progetto di digitalizzazione del monumento e con il modello della Natività in stampa 3D 1:50. La presentazione del modello è stata pensata seguendo la logica espositiva di quello del Sangallo: aperto lungo la sezione longitudinale centrale per consentire al visitatore di comprendere simultaneamente la complessità degli ambienti interni ed esterni e capirne le relazioni reciproche. Analogamente sono stati separati i livelli altimetrici, sollevando il piano di calpestio della Basilica rispetto a quello delle grotte, così da rendere visibile il sistema ipogeo. Il processo di prototipazione raggiunge, anche grazie a questa mostra, uno degli obiettivi attesi dal progetto di documentazione: diventare un racconto fisico e tangibile di un patrimonio storico e culturale così importante per l'umanità.

Conclusioni

I risultati della ricerca hanno in parte confermato la possibilità di produrre un modello fisico, a partire da un database 3D, in tempi relativamente brevi e con costi sufficientemente contenuti. Infatti, nonostante il processo di *reverse modelling* combinato alla tecnologia di prototipazione rapida rappresenti una nuova possibilità di conoscenza e fruizione del patrimonio, sono da tenere in considerazione limiti e margini di miglioramento dei processi. Da un lato, questi riguardano la modellazione: la complessità e la ricchezza dei dettagli decorativi e di elementi e componenti architettoniche di dimensioni ridotte comporta un'attenta analisi delle fasi di modellazione nonché della scelta della scala di stampa. Dall'altro, le tecniche di stampa 3D e gli strumenti ad esse dedicati sono ancora relativamente recenti e in via di sviluppo: ad esempio, la dimensione limitata del piatto di stampa delle stampanti commerciali comporta una divisione forzata di un modello di grandi e medie dimensioni in più blocchi. Questa procedura implica l'esistenza di una giuntura tra le parti assemblate che resta visibile, il che rende il modello percettivamente 'imperfetto'. Tale aspetto può essere superato utilizzando stampanti industriali di grandi dimensioni, che aumentano conseguentemente i costi di produzione. Tuttavia, merita forse riflettere sul significato di quell'imperfezione [Parrinello 2012], quell'aspetto legato alla precisa azione del tecnico-artigiano che ritroviamo e tanto apprezziamo nei modelli lignei del '500, e che ci permette di riappropriarci del valore della manualità del disegnatore, un valore che non vorremmo mai perdere.

Note

[1] Per anello 'reale-virtuale-reale' nel processo di documentazione s'intende il percorso dall'acquisizione dati dell'oggetto tangibile, alla creazione di una copia digitale, fino alla riproduzione tangibile dell'oggetto digitale. Per approfondimenti Huggett 2020.

[2] Antonio Labacco fu un collaboratore del Sangallo e assunse un ruolo fondamentale durante la fase di costruzione della Basilica. Si veda Benedetti 2009.

[3] Per ulteriori informazioni Benedetti 2009, pp. 11-2.

[4] Brunelleschi si aggiudicò la commessa per la costruzione della Cupola del Duomo di Firenze presentando un modello in mattoni e legno "sanza alcuna armadura". Si veda, Il ruolo dei modelli nella storia dell'arte, <<https://buildyourlab.wordpress.com/2012/06/23/ruolo-dei-modelli-nella-storia-dellarte/>>.

[5] Nella stampa 3D, un *manifold* è un volume solido tridimensionale chiuso e limitato che è stato trasformato matematicamente in una forma diversa.

[6] La Piacenti S.p.A. svolge attività di progettazione ed esecuzione nel campo del restauro e della conservazione di edifici tutelati, complessi monumentali e beni di interesse storico – artistico.

[7] Dada-LAB - Drawing Architecture Document Action Laboratory è un laboratorio di ricerca del DICAr, UNIPV. Responsabile Prof. Parrinello (2016-2023), Prof. Picchio (2023-in corso).

[8] Per informazioni sulla Basilica, si veda <<https://whc.unesco.org/en/list/1433>>.

[9] Per i dettagli della mostra, si veda <<https://bethlehemreborn.com/it/>>.

[10] Nuvola di punti da laser o da UAV/camera.

[11] Per elementi di dettaglio si intendono le caratterizzazioni materiche della muratura, i decori interni e gli arredi.

[12] Fori, superfici discontinue, superfici con le normali invertite o elementi distaccati dal modello generale, generati dal rumore della nuvola.

[13] Filamento in acido polilattico, ottenuto da fonti rinnovabili come l'amido di mais.

Riferimenti bibliografici

Balletti C., Ballarin M., Guerra F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. In *Journal of Culture Heritage*, n. 26, pp. 172-182.

Benedetti S. (2009). *Antonio da Sangallo il Giovane. Il grande modello per il San Pietro in Vaticano*, Roma: Gangemi.

Brusaporci S. (2017). The Importance of Being Honest: Issues of Transparency in Digital Visualization of Architectural Heritage. In I. Management Association (a cura di). *3D Printing: Breakthroughs in Research and Practice*, pp. 333-360.

Cadei A., Righetti Tosti-Croce M., Segagni Malacart A., Tomei A. (1999), *Arte d'occidente: temi e metodi*, pp. 1103-1111, Roma: Bd. 3.

Corazzi R., Bertacchi S. (2021). Osservazioni sulla cupola del Brunelleschi attraverso modelli in scala. In R. Corazzi (a cura di). *Cupole-Domes. An International Journal for Architecture, Engineering, Conservation, Culture and Anthropology*, pp. 37-55.

Docci M. (2009). La cupola di San Pietro: analisi e rilevamento. In L. Bussi, M. Carusi (a cura di). *Nuove ricerche sulla Gran Cupola del Tempio Vaticano*, pp. 232-246. Roma: edizioni PREprogetti.

Doria E., Picchio F. (2020). Techniques for mosaics documentation through photogrammetry data acquisition. the byzantine mosaics of the Nativity Church. In *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-2-2020, pp. 965-972.

Frommel C. L. (1999). Riflessioni sulla genesi del modello ligneo e gli ultimi progetti di Sangallo per San Pietro. In A. Cadei, M. Righetti Tosti-Croce, A. Segagni Malacart, A. Tomei (a cura di). *Arte d'occidente: temi e metodi. Studi in onore di Angiola Maria Romanini*, pp. 1103-1111. Roma: Bd. 3.

Huggett J. (2020). Virtually Real or Really Virtual: Towards a Heritage Metaverse. In *Studies in Digital Heritage*, vol. 4, n.1, pp. 1-15.

Il ruolo dei modelli nella storia dell'arte (23 giugno 2012) <<https://buildyourlab.wordpress.com/2012/06/23/ruolo-dei-modelli-nella-storia-dellarte/>> (consultato il 08 gennaio 2023).

La Placa S., Parrinello S. (2019). Vectorialization practices of the image drawing of the floor mosaics of the Basilica of Nativity in Bethlehem. In *SCIRES-ITS Scientific REsearch and Information Technology*, vol. 9, n.2, pp. 95-104.

Parrinello S. (2012). Il disegno dell'imperfetto: Esigenze descrittive per l'analisi architettonica. In *Investigación gráfica, expresión arquitectónica*. Universitat Politècnica de València, pp. 375-381.

Parrinello S. (2015). The survey of the complex of the Nativity church in Bethlehem. In *ReUSO 2015 - III Congreso Internacional sobre Documentación, Conservación y Reutilización del Patrimonio Arquitectónico*, pp. 683-690. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Parrinello S., Dell'Amico A. (2021). From Survey to Parametric Models: HBIM Systems for Enrichment of Cultural Heritage Management. In C. Bolognesi, D. Villa (a cura di). *From Building Information Modelling to Mixed Reality*. Springer Tracts in Civil Engineering, pp. 89-107. Cham: Springer.

Parrinello S., Miceli A., Galasso F. (2021). From digital survey to serious game. A process of knowledge for the Ark of Mastino II. In *Disegnarecon*, vol. 14, n. 27, pp. 17-1.

Parrinello S., Picchio F. (2019). Integration and comparison of close-range SfM methodologies for the analysis and the development of the historical city center of bethlehem. In *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. 42, pp. 589-595.

Parrinello S., Picchio F., Barazzoni P., Doria E., De Marco R. (2019). 3D Bethlehem, un progetto di cooperazione internazionale per la conoscenza della città stratificata. In *UID per il disegno*, pp. 899-908. Roma: Gangemi

Ricci M., Jones B., Sereni A. (2010). Building Brunelleschi's Dome: A Practical Methodology Verified by Experiment. In *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 69, n. 1, pp. 39-61.

Scopigno R., Cignoni P., Pietroni N., Callieri M., Dellepiane M. (2017). Digital fabrication techniques for Cultural Heritage: a survey. In *Computer Graphics Forum*, vol. 36, n. 1, pp. 6-21.

Stampa 3D Forum (10 Marzo 2022)

<<https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/migliori-stampanti-3d-economiche/>> (consultato il 09 gennaio 2023).

Zastrow M. (2020). 3D printing gets bigger, faster and stronger. In *Nature*, vol. 578, n. 7793, pp. 20-24.

Autore

Hangjun Fu, Università degli Studi di Pavia, hangjun.fu@unipv.it

Per citare questo capitolo: Fu Hangjun (2023). Reverse modeling per la stampa 3D di complessi monumentali/Reverse Modeling for 3D Printing of Monumental Complexes. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (a cura di). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 1310-1329.



Reverse Modeling for 3D Printing of Monumental Complexes

Hangjun Fu

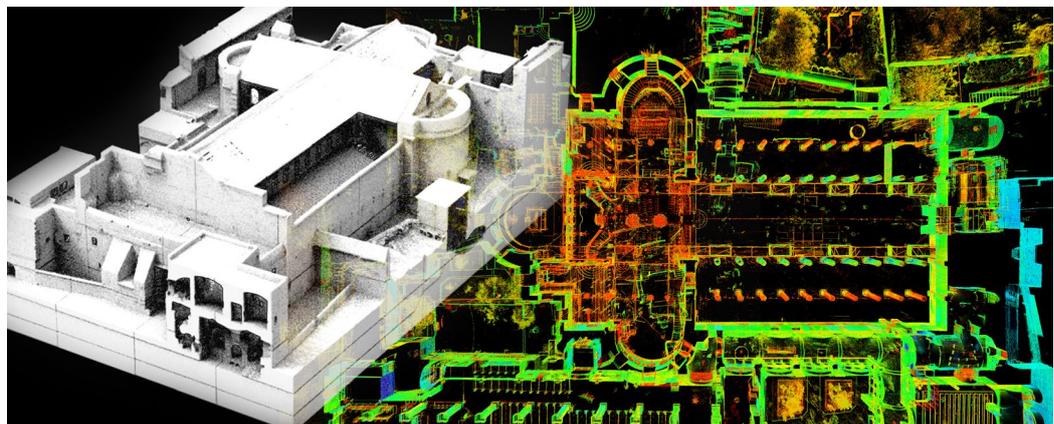
Abstract

Digital documentation activities and production of 3D databases, obtained from the integration of point clouds made by image-based and range-based instrumentation, enable the production of metrically reliable technical drawings for architectural analysis. Through reverse modeling methodologies, such databases can be converted into models that, properly optimized, segmented and decomposed, are then 3D printable. The printed models, the result of a critical process of analysis and synthesis of the acquired information, are useful for a tactile as well as visual enjoyment of the heritage and promote understanding of the formal components and articulations that govern the space.

The paper shows some outcomes of a research that arose from the documentation project of the Basilica of the Nativity in Bethlehem, a UNESCO site since 2012. The experimentation was conducted by the DAda-LAB Laboratory of the Department of Civil Engineering and Architecture of the University of Pavia as part of a collaboration agreement with the Piacenti Spa company, which is in charge of the restoration of the entire complex.

Keywords

Reverse modeling, 3D Database, 3D Printing, Nativity Church in Bethlehem, UNESCO



Axonometric view of the mesh model and the perspective section of the Bethlehem nativity point cloud. Graphic elaboration by the author.

Introduction

In the digitisation age, the development of new documentation and communication methodologies has led to a transition of the 'real' into the 'virtual'. Indeed, new technologies have made it possible to transform parts of the physical world into three-dimensional virtual models. Today, a further stage of advancement makes it possible to close the 'real-virtual-real' loop in the documentation process [1]. The return to the real form of the physical world is expressed through the transformation of databases into tangible models, solid reproductions of the object under investigation, appropriately scaled with respect to the original [Brusaporci 2017]. Consequently, the more complex the object, the more its reproduction will be guided by a specific design drawing, linked to the scale of representation and the level of detail to be obtained. The management of heterogeneous databases for the reverse modelling process will be even more complex. The use of multiple digital instruments (laser scanners and/or photogrammetric instruments), different point densities, missing data and the necessary interpretation of missing surfaces, all contribute to the 3D modelling process for Cultural Heritage (CH) aimed at printing at an architectural scale. The research, which deals with the articulated case study of the architectural complex of the Nativity in Bethlehem, aims to structure a reverse modelling methodology, replicable on other similar contexts, to obtain highly descriptive 3D printed models. These models must be capable of narrating the cultural heritage under investigation from a new perspective. These printed products offer an easy, direct and inclusive communication of the documentation and narrative of the heritage and allow potential visitors a diverse type of interaction with the asset [Aleardi 2016]. The blind or visually impaired can benefit from a tactile experience thanks to the type of material used for 3D printing and the high level of definition of the material surfaces. From a cognitive point of view, 3D printing allows simultaneous understanding of the relationship between all spaces through physical immersion within the model. At the same time, the possibility of dividing the prototyped object into various parts allows for a playful-educational use.

The model and the 3D printed model

The three-dimensional model, as a physical reproduction in scale of an artifact, is configured as a study tool for architectural design. It was once used as a useful and effective communication tool, capable of conveying the designer's ideas and facilitating the understanding of construction details, both to the client and the workers, during the execution of the work. One example is the wooden model from St. Peter's Basilica, designed by Antonio da Sangallo and executed by workers under the direction of architect Antonio Labacco [2] [Docci 2009]. The model, on a scale of 1:30 with a total height of 4.68 meters and a base of 6.02 x

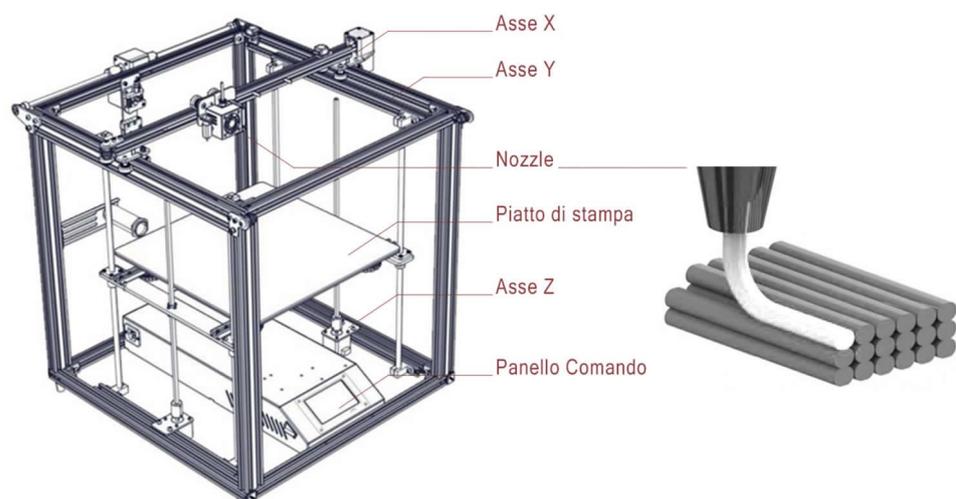
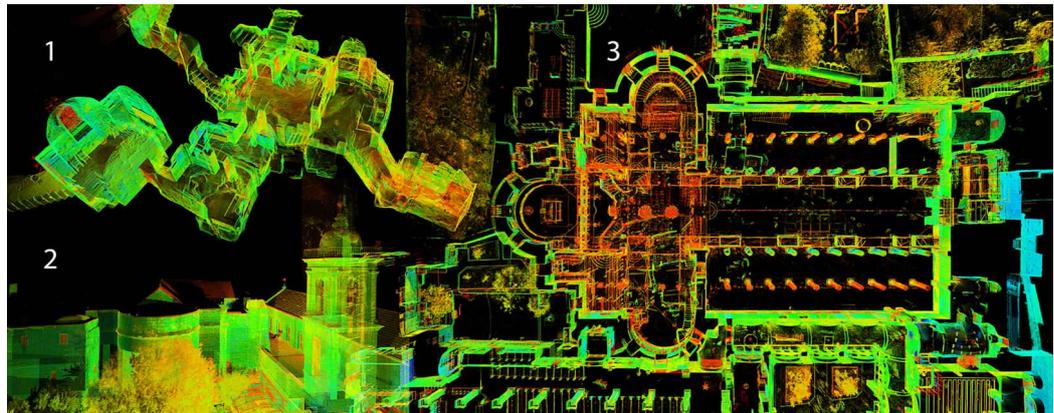


Fig. 1. Schematic diagram of the operation of an FDM printer. Left: Ender 5PLUS model. Right: printing layer overlay. Graphic elaboration by the author.

Fig. 2. TLS point cloud views of the Basilica of the Nativity complex. In order: 1) the underground cave system; 2) Exterior spaces and access of the Basilica; 3) Top view of the aisles. Graphic elaboration by the author.



7.36 meters, could be opened at a central longitudinal section, so as to facilitate the understanding of the interior spaces and structural composition. From the model, it is still possible today to understand the design choices undertaken by the architect and to gain insight into the Basilica's interior and exterior decorative apparatus [Cadei 1999; Benedetti 2009].

The communicative efficiency of the wooden model provided Michelangelo, who succeeded Sangallo at the head of the site, to harshly criticize project, both for the lack of light provided by the prepared lighting systems and for the poor management of the interior spaces [3]. Both Michelangelo and Brunelleschi used to make models to represent their design choices, as well as focus attention only on certain aspects, useful for understanding the design idea [4]. Brunelleschi realized models with careful detail, for almost all of his projects, focusing attention only on the aspects he deemed useful to communicate: the structure, decorations, or choice of materials [Corazzi 2021; Ricci 2010].

In this sense, the physical model was not considered a tool accessible to everyone since its realisation required time, craftsmanship, personnel and specific technical skills, which also implied high costs. Today, through digital technologies, it is possible to make an essential contribution to research, diagnosis, restoration, conservation, protection, communication and the dissemination and enjoyment of Cultural Heritage. The use of these technologies has increased exponentially, creating new scenarios and possibilities in the field of CH. The evolution of tools, methods, technologies and software is reflected in the actions of surveying, production and management of 3D databases, which have given rise to the latest 3D printing processes.

Rapid prototyping given by three-dimensional printing is a technique that allows direct, mass production of material copies of objects characterized by even complex shapes and geometries. All this is made possible from a digital model obtained by reverse modelling processes. The printing of the digital model takes place within an easily calculable timeframe and at a relatively low cost, if commercial printers are used. In recent years [Zastrow 2020; Scopigno 2017], this technique has received a considerable impulse due to the large market diffusion of desktop 3D printers, which are low-cost and compact in size. These use additive technology of the Fused Deposition Modelling (FDM) type, which enables the generation of real three-dimensional volumes through the superposition of material layers.

The process of realising the 3D reality-based and high-reliability print model assumes, as a starting point, the digital survey carried out according to established procedures [Parrinello et Al. 2021]. The survey is followed by a post-production phase of the Scan-to-Mesh type, during which optimisation operations are carried out on the digital copy to obtain a 3D printable 'Manifold' [5] model.

Case study

In order to optimize three-dimensional printing processes to propose a methodological protocol to be replicated on architectural heritage, the study was applied to the Basilica of the Nativity in Bethlehem: the complexity of the building allowed for testing the processes

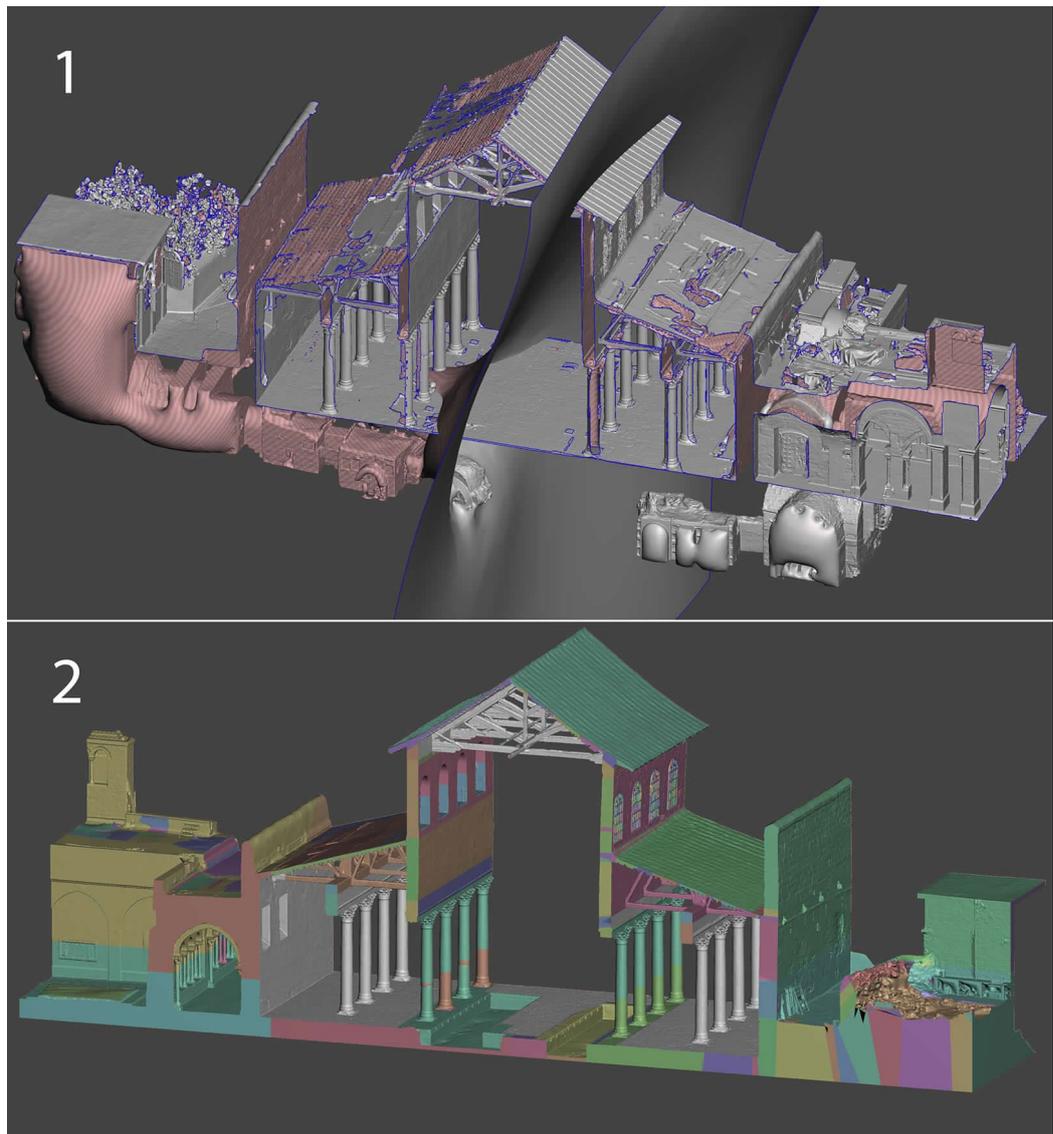


Fig. 3. Top (1): view of the raw mesh model imported into MeshMixer software. Bottom (2): view of the mesh model optimized in the data post-production stage. Graphic elaboration by the author.

leading from digital model to physical model. The Basilica is a major pilgrimage destination in the Holy Land and has been on the UNESCO World Heritage List since June 2012. This nomination in 2014 promoted the beginning of restoration work, carried out by Piacenti S.p.A. [6]. To support the conservation actions with drawings that represented the actual state of the Basilica, researchers from the DAa-LAB [7] Laboratory of the University of Pavia and from the joint LS3D Laboratory (University of Florence) supported the company with a series of documentation actions preparatory to the restoration works [8]. The surveys covered both the architecture of the Nativity and the mosaic floor and wall details [Parrinello 2015; La Placa 2019; Doria 2020].

The documentation activities were organised in different survey campaigns and with the use of Terrestrial Laser Scanner (TLS - Faro Cam2); Mobile Laser Scanner LiDAR (MLS - BLK2GO) and systems for photogrammetric acquisition (Unmanned Aerial Systems - UAS - DJI Phantom 4 Pro). In 2022, once the documentation activities for the restoration were completed, Piacenti S.p.A entrusted the research laboratory DAa-LAB with the production of a 1:50 scale 3D printed model of the entire Nativity complex. The production of the model is intended for museum displays on the occasion of the travelling exhibition *Bethlehem Reborn* [9].

The research project involved managing the pre-existing survey database to develop the digital model for three-dimensional printing. The process developed is that by reverse mod-

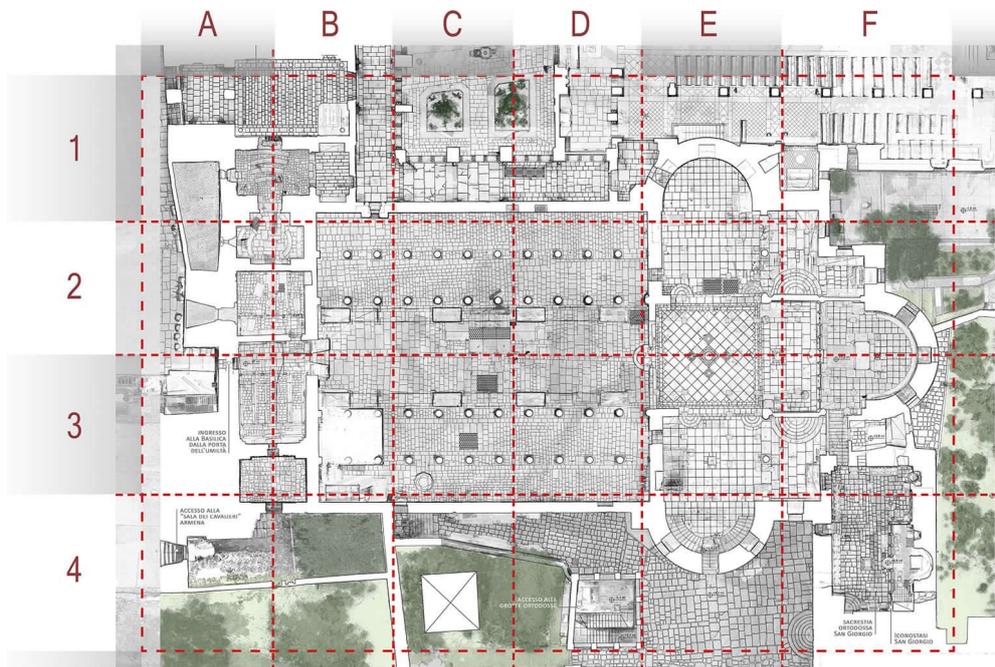


Fig. 4. Floor plan diagram with the division of blocks highlighted in red for later printing. Graphic elaboration by Becherini P, University of Florence.

eling: starting from the discretized digital data of the state of affairs (represented by the laser and/or photogrammetric point cloud), it was possible to generate an initial continuous digital model (Mesh) through the application of semiautomatic processes. Subsequently, the model was optimized through manual processing. Depending on the type of the source data [10], the post-production phase of the mesh model may require different timelines; the process from a photogrammetric base includes the generation of an optimized but less morphologically accurate mesh; the survey obtained from the application of terrestrial laser scanners turns out to be more reliable and is the optimal basis for a better result from the geometry point of view [11].

The point cloud produced at the end of the survey campaigns was configured as a database with a total weight of 465GB. Therefore, it was divided into several portions, first into homogeneous areas: the underground caves, the roof and the central body. The central body was in turn divided into 6 strips each consisting of 4 blocks. The point cloud was portioned taking care to preserve an overlapping strip between adjacent blocks, an essential expedient for the subsequent alignment steps. The first cut was followed by post-production processes of the Scan-to-Mesh type: each individual block is transformed into a polygonal mesh through a process involving the use of different software (3DReshaper, MeshLab and MeshMixer), the main steps of which are listed below:

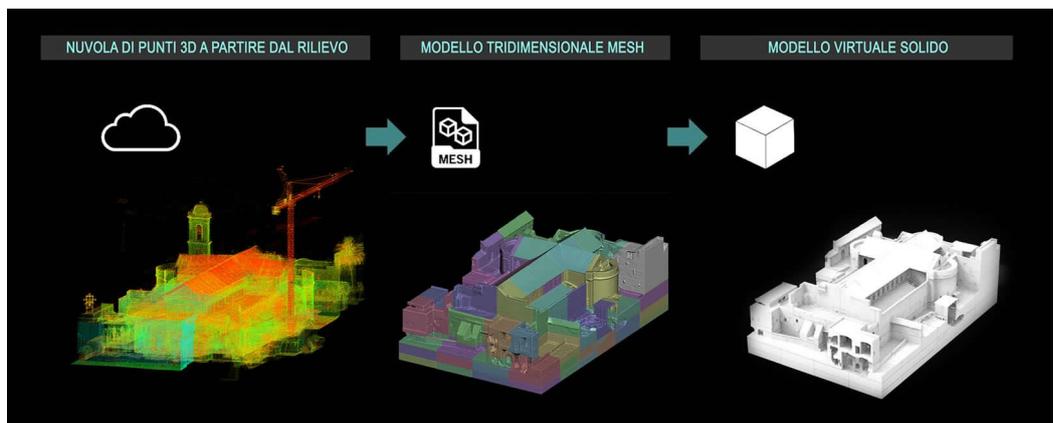
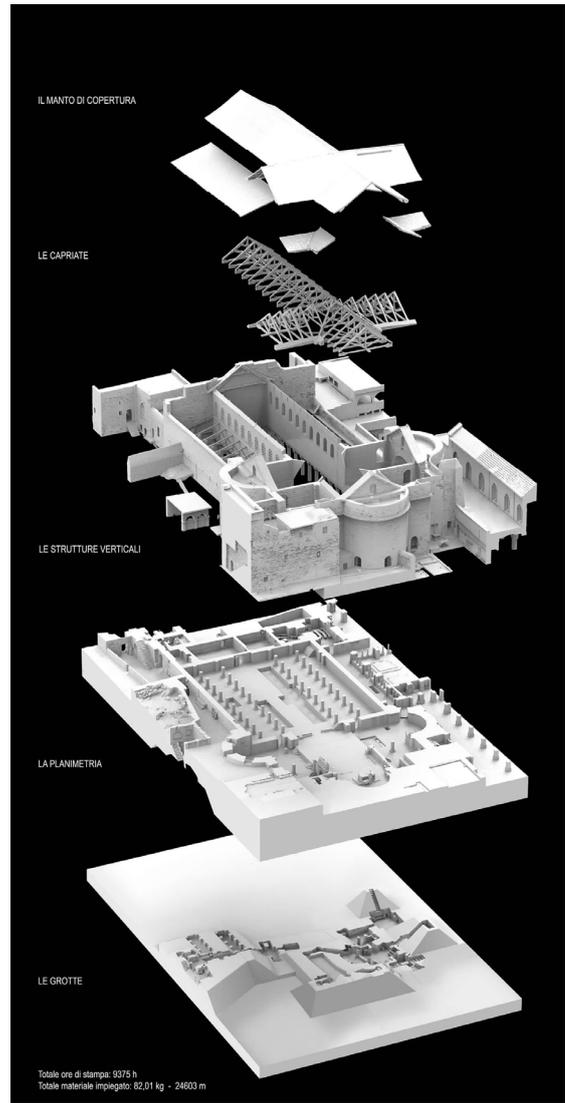


Fig. 5. Elaboration process of photogrammetric data. From top to bottom: Textured Mesh; Mesh model; Wireframe view. Graphic elaboration by the author.



Fig. 6. Elaboration process of photogrammetric data. From top to bottom: Textured Mesh; Mesh model; Wireframe view. Graphic elaboration by the author.

Fig. 7. Render of the three-dimensional model divided according to the designed cutting planes. Graphic elaboration by the author.



- Decimation of the point cloud
- Point cloud cleaning
- Generation of raw mesh models
- Integration of missing parts
- Mesh model optimization and defect [12] removal.

The 'point cloud cleaning' phase required particularly extended timelines (about 2 months) due to the presence of construction scaffolding inside the church during the survey.

The generated outputs consist of a series of solid Mesh patterns, with a good degree of overlap (about 20% of the total volume) between adjacent pieces, then trimmed with a clean cut to create a fine joint, with sub-millimeter error (+/- 0.1 mm).

For locations that are not accessible with TLS or MLS such as the roof, the exterior surface of the rear façade, and other unreachable areas, photogrammetric drone (UAV) surveys were planned. The processing of this type of data is faster than that of a laser point cloud, as the photogrammetric pipeline (in the Agisoft Metashape environment) already provides for the generation of a mesh model at the end of the process.

The overall digital model of the entire Basilica was discretized into the sub-parts previously listed, thus subdivided with the aim of facilitating the reading and fruition of the final physical model. The different cuts were planned by first creating a vertical longitudinal section through a cut along the nave that, separating the Basilica in two, highlights the interior spaces

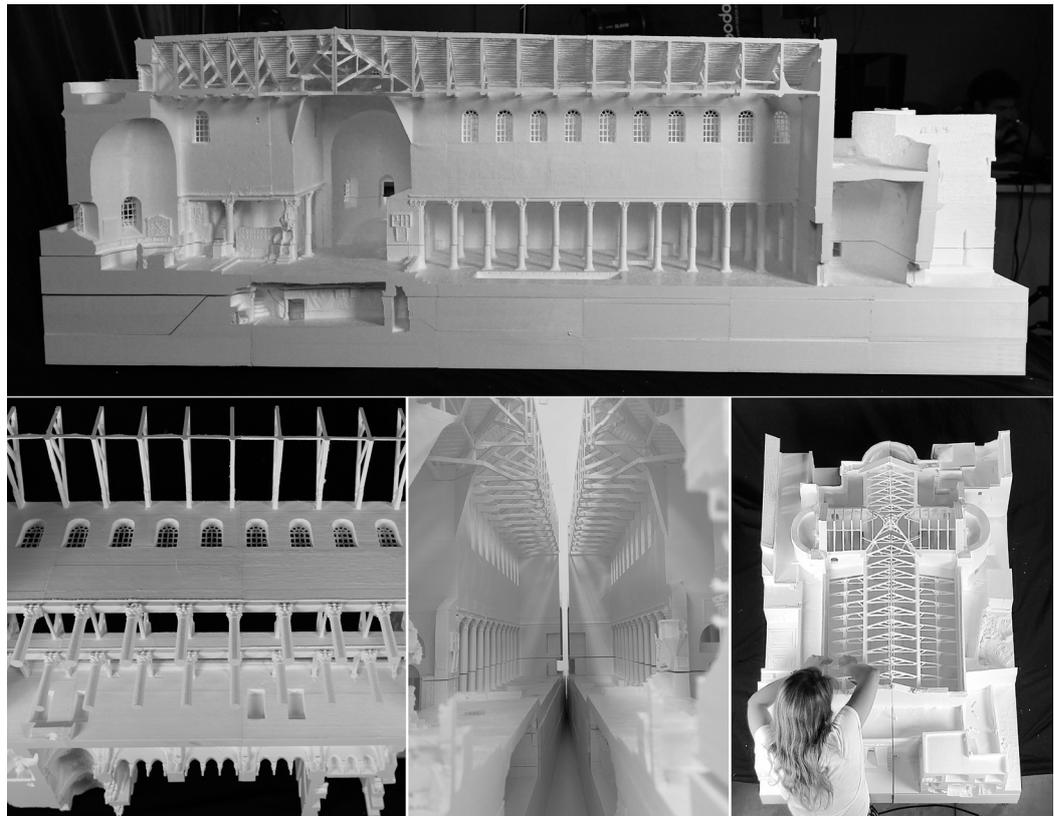


Fig. 8. General and detailed photographs of the model during the finishing phase after printing. Photograph by the author.

of the naves. A second horizontal cut was made at a height of $3/8$ of the column shaft starting from the base, thus allowing the upper part of the Basilica to be raised and show its floor plan and ceiling in detail, visible from the bottom up. Finally, a diagonal (diamond-shaped) cut was provided for the visualization of the floor plan of the caves, developed on different levels. For this purpose, a composition of inclined and horizontal cutting planes was designed, such that both the caves and the connecting stairs to the ground floor were sectioned. The final result is a model with a base of 148×101 cm and 52 cm high, divided into six macro-blocks that can be divided into each other to facilitate the reading of the interior spaces. For the physical reproduction of the model, the printers present in the DADA-LAB and PLAY laboratories of the University of Pavia were used; these are 10 3D printers (Crealty ender-5 Plus model) equipped with a 35×35 cm printing plate. The size of the print platter sets the limit for the maximum size of each portion, making it necessary to divide any model into blocks with the base less than 35 cm per side. Each macro-block, in addition to general

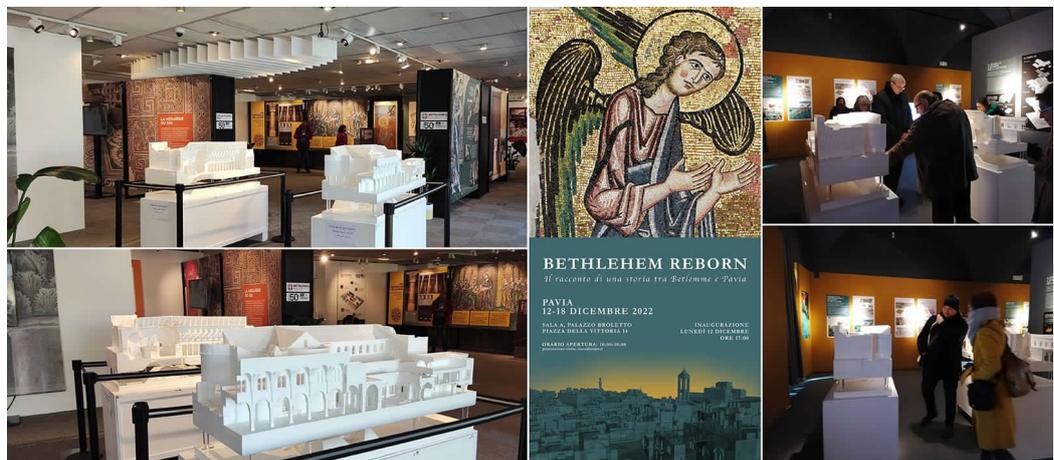


Fig. 9. Bethlehem Reborn exhibition display, from Paris location (left) to Pavia location (right) with poster (center). Photograph by the author.

cuts designed to make the model 'accessible', has therefore been further subdivided at overhanging elements or complex areas to be printed. The overall model was divided into 132 pieces exported in OBJ format and converted to G-code printing format using Ultimaker's Cura Slicer software. The ability to have ten printers made it possible to reduce the actual printing time by running them in parallel. The entire process lasted 7 months, starting from mesh modeling to 3D prototyping for which about 82 kg of PLA filament were used, [13] for a total of 9375 hours of printing and 2 months dedicated to the assembly and finishing stages of the model.

Results

On the occasion of the itinerant exhibition *Bethlehem Reborn*, which has been exhibited both at the UNESCO headquarters in Paris and in a number of Italian cities since 2022, a installation has been planned in the halls of the Broletto building in Pavia, with a series of illustrative panels describing the digitization project of the monument and with the 1:50 3D printed model of the Nativity. The presentation of the model was designed following the exhibition logic of the Sangallo model: open along the central longitudinal section to allow visitors to simultaneously understand the complexity of the interior and exterior environments and understand their mutual relationships. Similarly, the elevation levels were separated, raising the floor level of the Basilica relative to that of the caves, so as to make the underground system visible. The prototyping process achieves, also thanks to this exhibition, one of the expected goals of the documentation project: to become a physical and tangible narrative of such an important historical and Cultural Heritage for humanity.

Conclusions

The research results partly confirmed the possibility of producing a physical model from a 3D database in a relatively short time and with sufficiently low costs. In fact, although the process of reverse modelling combined with rapid prototyping technology represents a new possibility for heritage knowledge and fruition, limitations and margins for process improvement must be considered. On the one hand, these concern the modelling process: the complexity and richness of decorative details and small architectural elements and components requires a careful analysis of the modelling steps as well as the choice of the scale of the print. On the other hand, 3D printing techniques and the tools dedicated to them are still relatively new and under development: for example, the limited size of the printing plate of commercial printers implies a forced division of a large and medium-sized model into several blocks. This procedure implies that there is a joint between the assembled parts that remains visible, which makes the model perceptually 'imperfect'. This can be overcome by using large industrial printers, which consequently increases production costs. However, it is perhaps appropriate to meditate on the meaning of that imperfection [Parrinello 2012], that aspect linked to the specific action of the technician-craftsman that we find and appreciate so much in the wooden models of the 16th century, and that allows us to re-appropriate the value of the draftsman's manual skill, a value we would never want to lose.

Notes

[1] A 'real-virtual-real' loop in the documentation process means the path from data acquisition of the tangible object, to the creation of a digital copy, to the tangible reproduction of the digital object. For further discussion, Huggett 2020.

[2] Antonio Labacco was a collaborator of Sangallo and assumed a key role during the construction phase of the Basilica. See Benedetti 2009.

[3] For further information, see Benedetti 2009, pp. 11-21.

[4] Brunelleschi won the commission for the construction of the Dome of Florence Cathedral by presenting a model in brick and wood "sanza alcuna armadura." See The role of models in the history of art, <<https://buildyourlab.wordpress.com/2012/06/23/ruolo-dei-modelli-nella-storia-dellarte/>>.

[5] In 3D printing, a manifold is a closed, constrained three-dimensional solid volume that has been mathematically transformed into a different shape.

[6] Piacenti S.p.A. carries out design and execution activities in the field of restoration and conservation of protected buildings, monumental complexes and property of historical - artistic interest.

[7] Dada-LAB - Drawing Architecture Document Action Laboratory is a research laboratory of DICA; UNIPV. Head Prof. Parrinello (2016-2023), Prof. Picchio (2023-ongoing).

[8] For information on the Basilica, see <<https://whc.unesco.org/en/list/1433>>.

[9] For details of the exhibition, see <<https://bethlehemreborn.com/it/>>.

[10] Point cloud from laser or UAV/camera.

[11] Detail elements are defined as textural characterizations of masonry, interior decorations and furnishings.

[12] Holes, discontinuous surfaces, surfaces with inverted normals, or detached elements from the overall model, generated by cloud noise.

[13] Polylactic acid filament, obtained from renewable sources such as corn starch.

References

Balletti C., Ballarin M., Guerra F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. In *Journal of Culture Heritage*, No. 26, pp. 172-182.

Benedetti S. (2009). *Antonio da Sangallo il Giovane. Il grande modello per il San Pietro in Vaticano*, Rome: Gangemi.

Brusaporci S. (2017). The Importance of Being Honest: Issues of Transparency in Digital Visualization of Architectural Heritage. In I. Management Association (Ed.). *3D Printing: Breakthroughs in Research and Practice*, pp. 333-360.

Corazzi R., Bertacchi S. (2021). Observations on Brunelleschi's Dome through scale models. In R. Corazzi (Ed.). *Cupole-Domes. An International Journal for Architecture, Engineering, Conservation, Culture and Anthropology*, pp. 37-55.

Docci M. (2009). La cupola di San Pietro: analisi e rilevamento. In L. Bussi, M. Carusi (Eds.). *Nuove ricerche sulla Gran Cupola del Tempio Vaticano*, pp. 232-246. Rome: edition PREprogetti.

Doria E., Picchio F. (2020) Techniques for mosaics documentation through photogrammetry data acquisition. the byzantine mosaics of the Nativity Church. In *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-2-2020, pp. 965-972..

Frommel C. L. (1999). Riflessioni sulla genesi del modello ligneo e gli ultimi progetti di Sangallo per San Pietro. In A. Cadei, M. Righetti-Tosti-Croce, A. Segagni Malacart, A. Tomei (Eds.). *Arte d'occidente: temi e metodi. Studi in onore di Angiola Maria Romanini*, pp. 1103 - 1111. Rome: Bd. 3.

Huggett J. (2020). Virtually Real or Really Virtual: Towards a Heritage Metaverse. In *Studies in Digital Heritage*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-15.

Il ruolo dei modelli nella storia dell'arte (June 23, 2012) <<https://buildyourlab.wordpress.com/2012/06/23/ruolo-dei-modelli-nella-storia-dellarte/>> (accessed 8 January 2023).

La Placa S., Parrinello S. (2019). Vectorialization practices of the image drawing of the floor mosaics of the Basilica of Nativity in Bethlehem. In *SCIRES-IT-SCientific REsearch and Information Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 95-104.

Parrinello S. (2012). Il disegno dell'imperfetto: Esigenze descrittive per l'analisi architettonica. In *Investigación gráfica, expresión arquitectónica*. Universitat Politècnica de València, pp. 375-381.

Parrinello S. (2015). The survey of the complex of the Nativity church in Bethlehem. In *ReUSO 2015 - III Congreso Internacional sobre Documentación, Conservación y Reutilización del Patrimonio Arquitectónico*, pp. 683-690. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Parrinello S., Dell'Amico A. (2021). From Survey to Parametric Models: HBIM Systems for Enrichment of Cultural Heritage Management. In C. Bolognesi, D. Villa (Eds.). *From Building Information Modelling to Mixed Reality. Springer Tracts in Civil Engineering*, pp. 89-107. Cham: Springer.

Parrinello S., Miceli A., Galasso F. (2021). From digital survey to serious game. A process of knowledge for the Ark of Mastino II. In *Disegnarecon*, Vol. 14, No. 27, pp. 17-1.

Parrinello S., Picchio F. (2019). Integration and comparison of close-range SfM methodologies for the analysis and the development of the historical city center of bethlehem. In *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, No. 42, pp. 589-595.

Parrinello S., Picchio F., Barazzoni P., Doria E., De Marco R. (2019). 3D Bethlehem, an international cooperation project for the knowledge of the stratified city. In *UID per il disegno*, pp. 899-908. Rome: Gangemi.

Ricci M., Jones B., Sereni A. (2010). Building Brunelleschi's Dome: A Practical Methodology Verified by Experiment. In *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 69, No. 1, pp. 39-61.

Scopigno R., Cignoni P., Pietroni N., Callieri M., Dellepiane M. (2017). Digital fabrication techniques for Cultural Heritage: a survey. In *Computer Graphics Forum*, Vol. 36, No. 1, pp. 6-21.

Stampa 3D Forum (March 10, 2022) <<https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/migliori-stampanti-3d-economiche/>> (accessed 9 January 2023).

Zastrow M. (2020). 3D printing gets bigger, faster and stronger. In *Nature*, Vol. 578, No. 7793, pp. 20-24.

Author

Hangjun Fu, Università degli Studi di Pavia, hangjun.fu@unipv.it

To cite this chapter: Fu Hangjun (2023). Reverse modeling per la stampa 3D di complessi monumentali/Reverse Modeling for 3D Printing of Monumental Complexes. In Cannella M., Garozzo A., Morena S. (Eds.). *Transizioni. Atti del 44° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Transitions. Proceedings of the 44th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 1310-1329.