


Artículo

La Tomba di Giulio II a Roma: dal rilievo fotogrammetrico alla stampa 3D per non vedenti

The Tomb of Giulio II in Rome: from the photogrammetric survey to the 3D printing for blind people

Sara Gonizzi Barsanti,¹ Adriana Rossi²

¹Phd, Senior Researcher

sara.gonizzibarsanti@unicampania.it, Department of Engineering, Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, <https://orcid.org/0000-0002-7650-1616> 

²Phd, Full Professor

adriana.rossi@unicampania.it, Department of Engineering, Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, <https://orcid.org/0000-0002-8177-8441> 

DOI: <https://doi.org/10.56205/mim.1-2.5>

Recibido
08/11/21
Aprobado
14/12/21
Publicado
31/12/21

Mimesis.jsad
ISSN 2805-6337



EDITORIAL
Environment & Technology
Foundation

Abstract

3D printing artefacts and monuments allows blind and visually impaired people to discover, understand and enjoy the beauty of Cultural Heritage. The reproduction of the artefacts usually starts with the 3D survey with reality-based techniques in order to obtain their metric, accurate digital copy. With a proper post-processing, the digital model is then set up ready for the printing. The result is a physical model that can be touched and inspected, making the art visible to everyone.

This paper presents the pipeline followed for the 3D reproduction of the famous Michelangelo's Tomb of Giulio II, visible in San Pietro in Vincoli church in Rome. The photogrammetric survey is described and evaluated, and all the process followed to postprocess the 3D model in order to make it countable for the 3D printing. A particular attention was given to the problems occurred during the survey (lack of space, lights) and then the postprocessing related to the creation of different printed physical models. The final models have been printed in accomplish with the requests of the customer, in order to make them suitable for blind people.



Abstract

La stampa 3D di manufatti e monumenti consente alle persone non vedenti e ipovedenti di scoprire, comprendere e godere della bellezza del patrimonio culturale. La riproduzione dei manufatti inizia solitamente con il rilievo 3D con tecniche basate sulla realtà al fine di ottenere la loro copia digitale metrica e accurata. Con una corretta post-elaborazione, il modello digitale viene quindi predisposto per la stampa. Il risultato è un modello fisico che può essere toccato e ispezionato, rendendo l'arte visibile a tutti.

Questo articolo presenta la pipeline seguita per la riproduzione 3D della famosa Tomba di Giulio II di Michelangelo, visibile nella chiesa di San Pietro in Vincoli a Roma. Il rilievo fotogrammetrico viene descritto e valutato, e tutto il processo seguito per post-elaborare il modello 3D al fine di renderlo computabile per la stampa 3D. Particolare attenzione è stata data ai problemi verificatisi durante il rilievo (mancanza di spazio, luci) e quindi la post-elaborazione relativa alla creazione di diversi modelli fisici stampati. I modelli finali sono stati stampati in accordo con le richieste del cliente, in modo da renderli adatti ai non vedenti.

Parole chiave: Fotogrammetria, modelli 3D, stampa 3D, Tattile, Accessibilità.

Introduzione

Esistono due categorie di acquisizione ottica 3D di oggetti e strutture tecniche basate su sensori passivi (metodi basati su immagini) come la fotogrammetria; tecniche basate su sensori attivi (metodi basati sulla distanza) come ad esempio la scansione laser. Le due tecniche possono essere utilizzate anche in combinazione per raggiungere la massima accuratezza e completezza del rilievo. La scelta della tecnica migliore e più appropriata dipende dall'oggetto o dall'area indagata, dall'esperienza dell'utente, dal budget, dal tempo a disposizione e dagli obiettivi prefissati. La tecnica fotogrammetrica, utilizzata da sola o in abbinamento al laser scanner, permette di aggiungere la ricchezza fornita dal contenuto radiometrico ad una accurata descrizione geometrica in tre dimensioni. Spesso i rilievi fotogrammetrici sono una soluzione ottimale per eseguire il rilievo in modo economico e in tempi brevi con l'utilizzo di fotocamere digitali non metriche, accuratamente calibrate con algoritmi e procedure appropriate e specifiche. Sensori attivi come la scansione laser vengono utilizzati per indagare un oggetto o un sito, fornendo nuvole di punti 3D che possono essere unite con passaggi ben fissati (Fassi et al., 2011; Gilardoni, 2007; Guidi et al., 2009; Remondino, Campana, 2014).

La fotogrammetria può essere definita come “ the process of deriving (usually) metric information about an object through measurement made on photographs of the object” (Mikhail et al., 2001 p. 1). Il punto di partenza per costruire le relazioni fondamentali della fotogrammetria è la proiezione prospettica: un punto A proiettato su un piano di proiezione crea una traccia A' e i due punti sono detti punti omologhi. Semplificando, grazie a misurazioni in uno spazio 2D (immagini), si conosce una misura in uno spazio 3D. In sostanza, è lo stesso procedimento che avviene automaticamente nel cervello: gli occhi possono essere assimilati alle due posizioni della macchina fotografica, con le due retine che svolgono il ruolo di area sensibile su cui sono messe a fuoco le due immagini. Il cervello elabora le informazioni e, attraverso le due immagini disassemblate prodotte dagli occhi, fornisce il senso di tridimensionalità e profondità della scena.

¹<https://news.artnet.com/art-world/two-busts-palmyra-3-d-printing-isis-return-syria-876767>

Le equazioni di collinearità consentono, utilizzando almeno un paio di immagini in cui è visibile lo stesso punto, di calcolare le coordinate dell'oggetto nello spazio. L'uso di due immagini è necessario perché solo avendo due viste dello stesso oggetto si possono calcolare le tre incognite spaziali dell'oggetto stesso (Guidi et al., 2009 p. 24 e seguenti).

Il processo calcola l'orientamento esterno della telecamera, ovvero 6 parametri relativi alla posizione spaziale e l'orientamento del sistema di coordinate della telecamera rispetto al sistema di coordinate globale dell'oggetto e i parametri interni definiti dalla lunghezza focale della telecamera, le coordinate dell'immagine, il punto principale e i parametri relativi alla diversa distorsione delle lenti. Il modello matematico alla base del processo di restituzione fotogrammetrica è definito come un modello di collinearità che viene risolto mediante il principio del "Bundle Adjustment" (detto anche "compensazione blocco proiettore") e utilizzando il processo del minimo quadrato (Gillardoni 2007, pp. 52 -58; Guidi et al., 2009 p. 63).

I sistemi attivi, specie quelli basati sulla luce laser, operano invece indipendentemente dalla luce e dalla consistenza dell'oggetto da rilevare in quanto modificano l'aspetto esteriore con una luce opportunamente codificata, cioè "una luce caratterizzata da un contenuto informativo riconoscibile da un sensore elettronico, a differenza della luce ambientale diffusa, che non presenta particolari elementi di riconoscibilità" (Guidi et al., 2009 p. 78). La modellazione è ottenuta attraverso una serie di coordinate tridimensionali, solitamente inglobate in un sistema di riferimento che ha origine nel centro dello strumento. Tutti i sistemi di scansione operano attraverso un processo quasi completamente automatico attraverso il quale possono acquisire un numero elevato di punti al secondo, anche dell'ordine di un milione.

La stampa 3D è un potente strumento per la riproduzione di Beni Culturali. Gli oggetti riprodotti tramite stampa tridimensionale possono essere molto utili per aiutare i non vedenti a visualizzare sculture o manufatti artistici attraverso il tatto, senza però avere un contatto diretto con l'originale. Le opportunità che derivano dalle repliche 3D non si limitano alla fruizione solo da parte dei non vedenti (Karbowski, 2020; Pistofidis et al., 2021; Rossetti, 2018; Rossi, Barcarolo, 2019), ma possono essere risorse preziose per i bambini e per tutti i visitatori del museo, dato che il tocco è uno degli approcci alla base della sperimentazione e della comprensione del mondo esterno. In questo senso, le copie tridimensionali vanno oltre la classica percezione basata sulla vista per offrire all'utente un'esperienza multisensoriale del manufatto più ricca e godibile.

Una copia tangibile stampata in 3D, rilevata tramite tecnologie cosiddette reality-based, può prendere il posto di qualsiasi manufatto che, per vari motivi, debba essere rimosso dal suo ambiente originario (Ballarin et al., 2018). La sostituzione può essere limitata nel tempo, come il prestito di un'opera per una mostra temporanea o permanente (rimozione di una statua dalla sua posizione per proteggerla dal degrado ambientale). In questo modo il visitatore può apprezzare l'opera nel luogo per cui è stata progettata e realizzata e, allo stesso tempo, l'originale viene preservato e protetto (Berjozkina, Karami, 2021).

Le tecnologie di fabbricazione digitale possono trovare ampio sbocco nella realizzazione di imballaggi personalizzati o strutture di supporto per lo stoccaggio, il trasporto o l'esposizione di manufatti fragili. I rischi nel maneggiare oggetti di grande valore culturale sono notevolmente ridotti, dato che le difficoltà e gli errori durante il processo manuale (come le misurazioni

dell'opera, la realizzazione dell'imballo, le prove sulla sua accuratezza) sono sostituiti da un processo computerizzato che parte dal modello digitale 3D per produrre automaticamente una struttura di supporto personalizzata. Anche le tecnologie di stampa tridimensionale possono contribuire al restauro delle opere d'arte. Molte sculture e monumenti sono conservati con parti essenziali mancanti, che possono essere sostituite da copie artificiali per dare al pubblico una spiegazione completa di come fosse la struttura originale. Pertanto, le stampanti 3D possono riprodurre con precisione e rapidità le lacune di molte installazioni artistiche, come è successo con il recupero di due busti funerari in calcare danneggiati, recuperati a Palmyra poco dopo la prima occupazione dell'ISIS. I restauratori hanno utilizzato una stampante 3D per fabbricare pezzi per i busti, originariamente realizzati nel II o III secolo, e poi hanno fissato le parti stampate in 3D sugli originali usando dei magneti. Per questo progetto si è deciso di utilizzare la fotogrammetria essenzialmente per l'ubicazione del monumento e per il fatto che è costantemente visitato. La tomba di Giulio II (Figura 1) è un progetto architettonico e scultoreo di Michelangelo Buonarroti che, nella sua versione definitiva ma ridotta, si trova nella basilica di San Pietro in Vincoli a Roma.



Figura 1. La Tomba di papa Giulio II
Figure 1. The Tomb of Pope Giulio II

Michelangelo Buonarroti (6 marzo 1475 – 18 febbraio 1564) è stato uno scultore, pittore e architetto italiano. Già in vita era considerato dai suoi contemporanei uno dei più grandi artisti di tutti i tempi.

Fu autore di alcune delle opere d'arte più belle e conosciute di tutti i tempi, come il David a Firenze, la Pietà e la Cappella Sistina in Vaticano, la Cupola di San Pietro, e il Mosè a Roma. Michelangelo fu il primo scultore che non tentò mai di colorare o dorare alcune parti delle statue; al colore, infatti, preferiva l'esaltazione del "morbido splendore" della pietra, spesso con effetti chiaroscurali evidenti nelle statue rimaste prive dell'ultima finitura, con i colpi di scalpello che esaltano la particolarità del materiale marmoreo.

Si dichiarò artista "del prendere", piuttosto che "mettere", cioè per lui la figura finale nasceva da un processo di sottrazione della materia fino al nucleo del soggetto scultoreo, già "imprigionato" nel blocco di marmo.

Lo scultore fu incaricato dallo stesso Papa di costruire il proprio monumento sepolcrale nel 1505, ma l'artista iniziò molto tardi, nel 1544, a causa di diverse difficoltà e problemi di finanziamento.

Egli stesso non esitò a riferirsi a questo progetto come alla "tragedia della sepoltura", un'autentica prova che fino agli ultimi giorni della sua vita fu fonte di accuse inesauribili, tormenti e rimorsi.

Il suo biografo ufficiale, Ascanio Condivi, scrisse che l'impresa gli causò "infiniti impedimenti, dolori e affanni e, quel che è peggio, per la malizia di certi uomini, infamie, dalle quali fu epurato solo dopo molti anni".

Da un monumentale mausoleo rettangolare con più di quaranta statue (primo progetto, 1505) finì per progettare un monumento addossato al muro di una basilica secondaria romana (1545), con appena sette statue, di cui solo tre di Michelangelo (Mosè, Rachele e Lia, simboli rispettivamente della vita contemplativa e della vita attiva) e uno solo (Mosè) degno della sua fama: l'artista, ormai esausto, farà poi scrivere al suo biografo che "questa statua da sola basta ad onorare la sepoltura di papa Giulio II".

A Michelangelo fu affidato il compito di realizzare una tomba monumentale per il papa, da collocare nella galleria (in fase di ultimazione) della Basilica di San Pietro. Il primo progetto prevedeva una colossale struttura architettonica isolata nello spazio, a base rettangolare (circa 10,8x7,2 m alla base e 8 in altezza) composta da tre ordini in una sorta di piramide architettonico-scultorea.

Intorno al sepolcro papale, in posizione sopraelevata, si trovavano una quarantina di statue, di dimensioni maggiori del naturale, alcune libere nello spazio, altre addossate a nicchie o pilastri. Michelangelo, mentre tornava a Roma carico di marmi, fece l'amara scoperta che il suo progetto non era più al centro degli interessi del papa, accantonato a favore della basilica di San Pietro e di nuovi piani di guerra contro Perugia e Bologna.

Il papa morì nel 1513 e nel suo testamento riprese il vecchio progetto, che però, d'accordo con gli eredi, fu modificato, firmando un nuovo contratto nel maggio di quell'anno. La modifica più sostanziale fu l'appoggio della tomba ad un muro e l'eliminazione della camera mortuaria, caratteristiche che furono mantenute fino al progetto definitivo. Nel luglio 1516 fu stipulato un nuovo contratto per un terzo progetto, che ridusse il numero delle statue. I lati furono accorciati allo spessore di un'unica nicchia, contenente una Vittoria e due Prigioni addossate ai pilastri sottostanti i busti (come sul lato anteriore). Il monumento assumeva così l'aspetto di una facciata monumentale, mossa da decorazioni scultoree. Nel 1523 si decise di spostare l'ubicazione della tomba a San Pietro in Vincoli.

Metodologia

La fotogrammetria è stata scelta come tecnica di rilievo per superare le difficoltà logistiche. L'architettura è situata in una navata della Basilica, protetta da una bassa recinzione: muoversi con uno scanner era molto difficile, anche perché era possibile utilizzare un'impalcatura per raggiungere parzialmente il piano superiore e la sommità era visibile salendo per uno stretto scala che portava alla sommità della struttura. D'altro canto, si è anche deciso di fornire ai clienti un modello strutturato 3D finale come dato di archiviazione digitale.

Si è utilizzato una Canon 60D con un obiettivo da 20 mm, ISO 800 F 6.3. Il problema principale riscontrato riguardava l'illuminazione utilizzata. Il nuovo impianto di illuminazione, grazie all'opera del maestro artigiano Mario Nanni, riesce a ricreare le stesse condizioni di luce su cui si basò Michelangelo nel Cinquecento per la realizzazione della Tomba. Del resto, l'artista utilizzava la luce solare come elemento strutturale delle statue, per dare vita ed emozione al marmo: laddove la luce diretta colpiva la statua (proveniente da una finestra chiusa), Michelangelo utilizzò la tecnica del lustro (che rende riflettenti le superfici), per le parti in ombra usò la pomice o il gradino per lasciarle opache. Oggi l'illuminazione è tornata a quella di un tempo, attraverso l'utilizzo di sofisticate tecniche informatiche e lampade LED Viabizzuno che realizzano un quadro illuminante e una simulazione dell'andamento della luce durante le ore del giorno. A ciò si è aggiunta l'opera del restauratore Antonio Forcellino, che ha recuperato i colori del marmo di Carrara scelto da Michelangelo, pur lasciando la patina del tempo. Questo sistema, sebbene bello per i visitatori, ha creato un enorme problema durante il rilievo.



Figura 2. Rilievo fotogrammetrico della statua del Mosè sulla sua base.

Figure 2. Photogrammetric survey of the statue of the Moses on top of its basis.

Il cambio di illuminazione, quindi luci e ombre sulla struttura, avrebbe influito sul risultato finale, dando un modello 3D meno accurato.

Fu quindi chiesto ed ottenuto di tenere aperte tutte le lampade, in modo da avere un'illuminazione più diffusa e stabile.

Il secondo problema riguardava l'acquisizione della parte superiore del monumento e della parte posteriore delle statue. Per l'ultimo problema la Soprintendenza ha permesso di stare in piedi sulla base della statua, senza le scarpe, in modo da raggiungere almeno una piccola parte della schiena del Mosè, solo nelle ore di chiusura della chiesa, dalle 13 alle 15 (Figura 2).

Rilievo fotogrammetrico della statua del Mosè sulla sua base

Un'impalcatura (Figura 3a-c) è stata utilizzata per acquisire le immagini delle statue superiori e la sommità è stata ricavata scattando le immagini dal solaio. Il problema con l'impalcatura è stato che il sistema aveva le ruote per essere spostato e solo una panca di legno su cui camminare, quindi non era molto stabile.

È stato necessario spostarlo, attendere che le vibrazioni e l'ondeggiamento si fermassero, acquisire un'immagine e spostarla di nuovo, il che ha richiesto molto tempo considerando che sono stati effettuati due passaggi diversi a distanze diverse. Anche per questo, come già detto, l'utilizzo di un laser scanner era impossibile date le condizioni di lavoro.

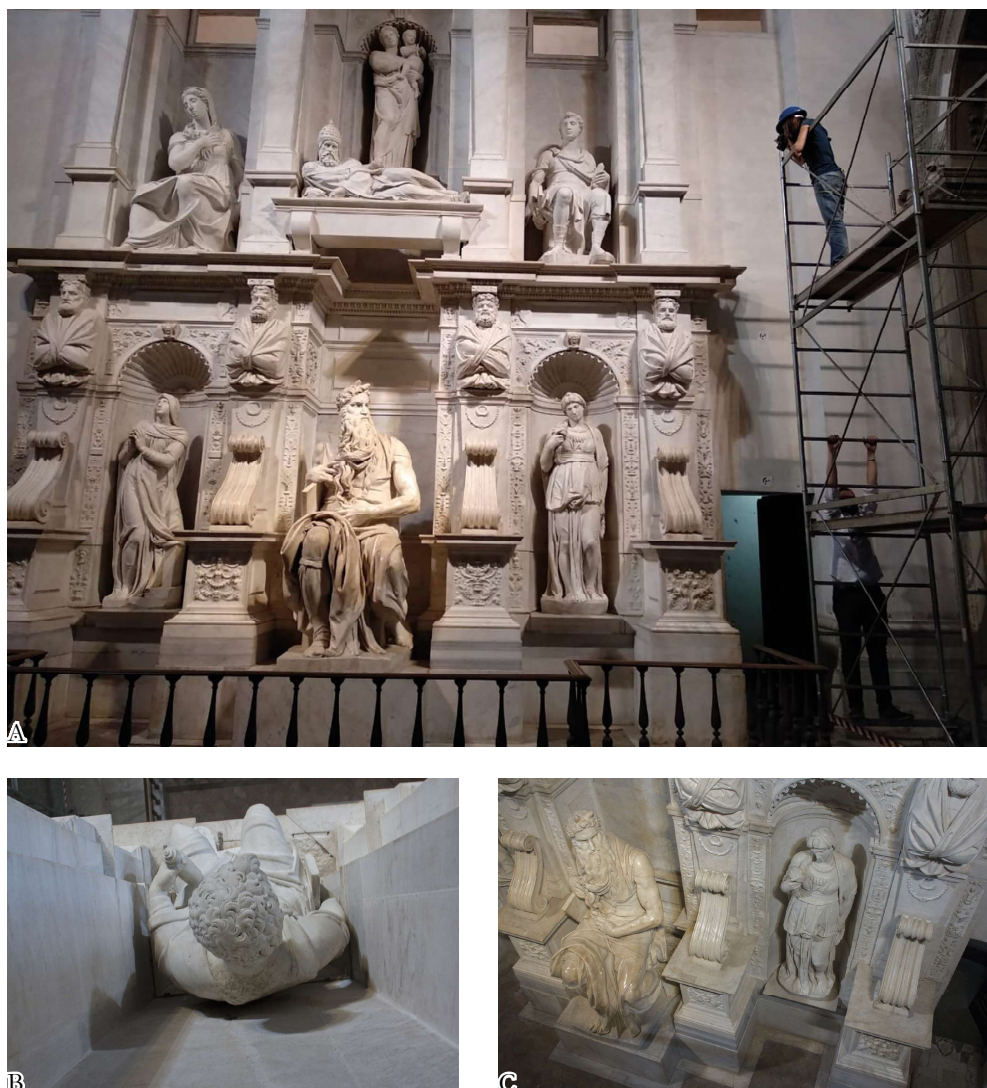


Figura 3. Il trabattello usato per acquisire le immagini della parte alta della tomba (a); immagini acquisite dall'attico del monumento (b-c).

Figure 3. The scaffolding used to acquire images of the upper floor of the Tomb (a); images taken from the upper level of the tomb (b-c).

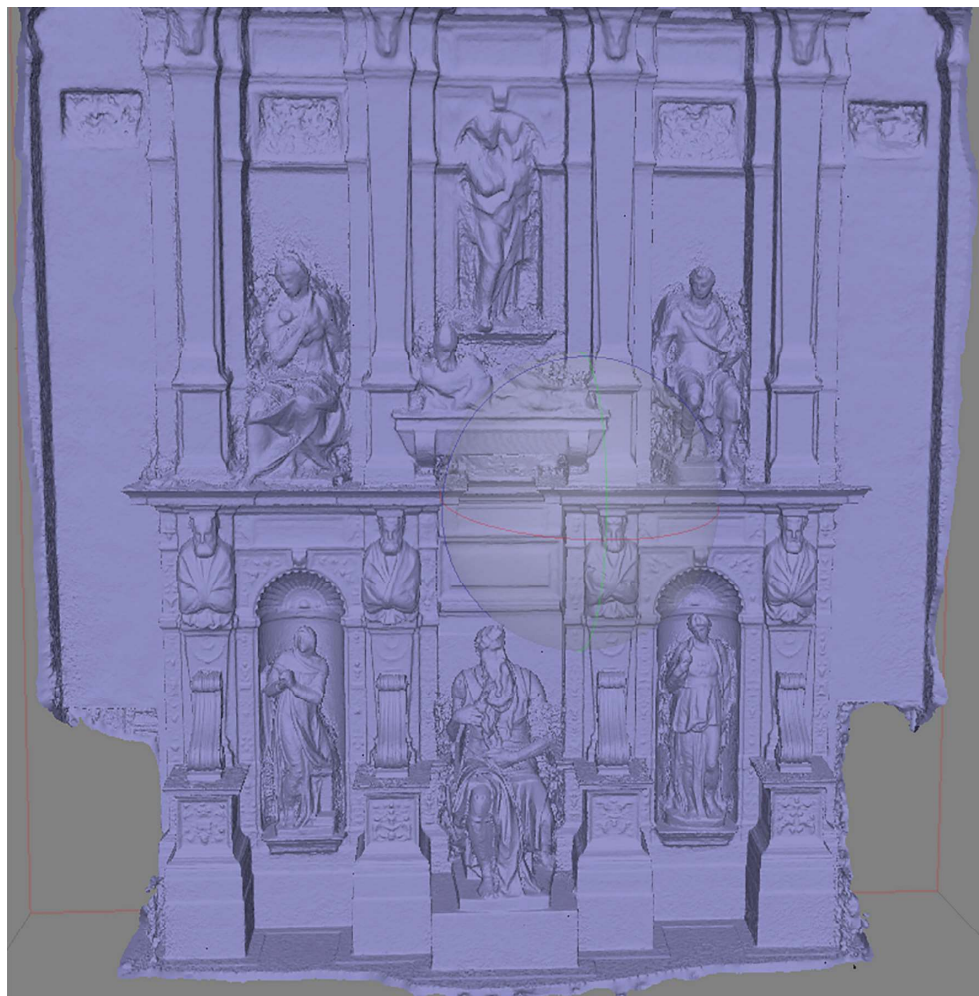


Figura 4. Il modello 3D senza texture ottenuto con il rilievo fotogrammetrico. I fori e le parti mancanti sono visibili dove il modello è sfocato.

Figure 4. The texture less 3D reality-based model obtained with the photogrammetric survey. The holes and missing parts are visible where the model is blurred.

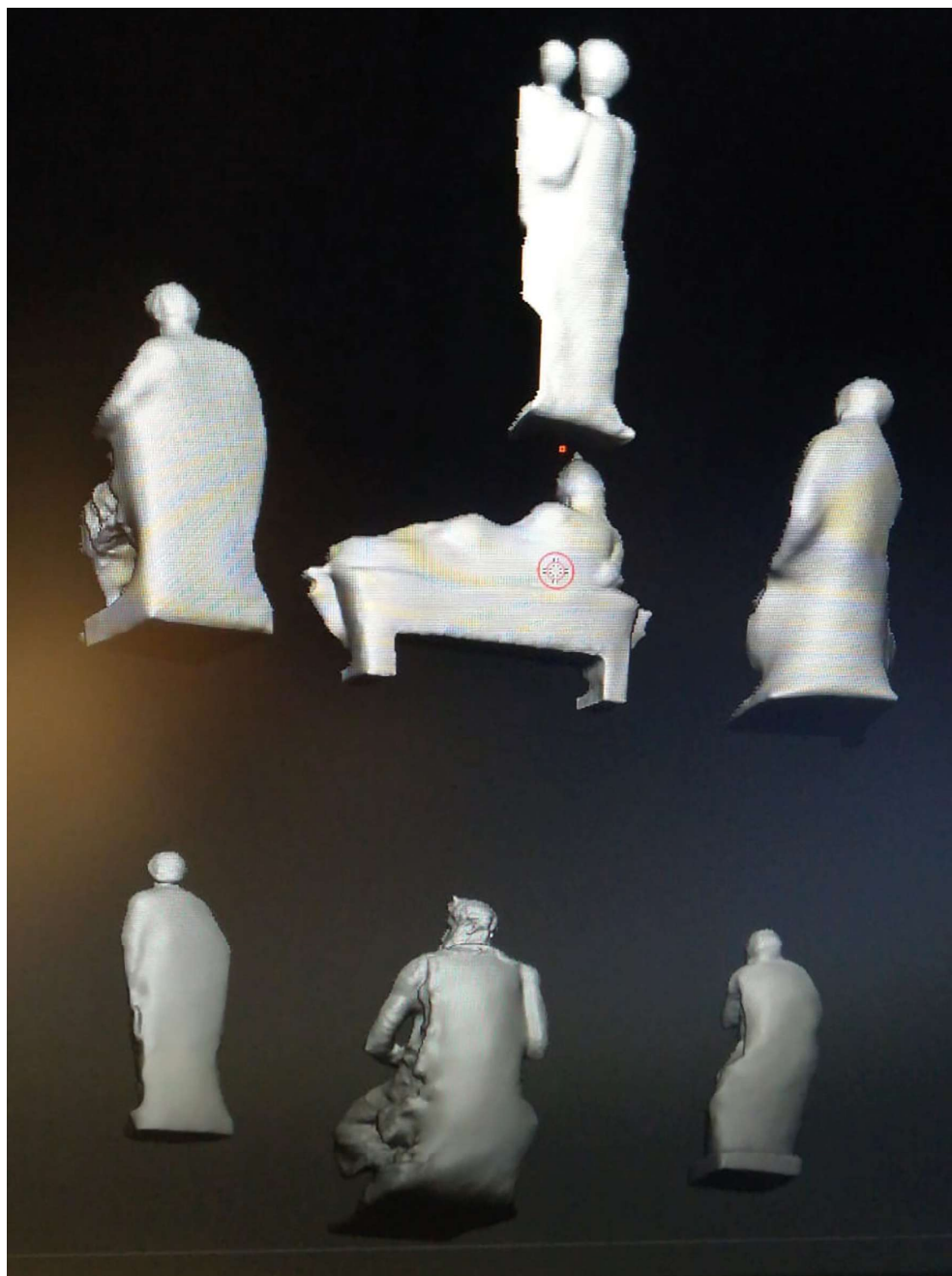
Il ponteggio utilizzato per acquisire le immagini del piano superiore della Tomba.

Queste soluzioni non hanno consentito ovviamente di avere una copertura completa della struttura, ma almeno hanno limitato le parti mancanti nel modello finale (Figura 4). Il software utilizzato per ottenere il modello è stato Agisoft Metashape. L'algoritmo utilizzato dal software per creare la mesh, ha cercato di chiudere i fori delle parti mancanti, finendo per formare una superficie sfocata. Il modello 3D senza texture ottenuto con il rilievo fotogrammetrico. I fori e le parti mancanti sono visibili dove il modello è sfocato.

Il secondo passo per la creazione dei modelli stampati in 3D è stata la post-elaborazione del risultato fotogrammetrico. Una volta che il modello è stato ruotato con l'asse z in alto e scalato, è stato esportato per essere elaborato in 3D Studio Max dove è stato segmentato in diverse parti e poi scalato secondo le richieste dei clienti con tre diversi modelli in scala: uno dell'intera architettura (1:100), una delle statue di Mosè (1:50) e una della sua testa (1:1). Il modello 3D basato è stato poi importato in Zbrush dopo essere stato segmentato nelle sue parti principali, per procedere alla chiusura dei fori sulla parte posteriore delle statue (Figura 5). Questo passaggio è stato fondamentale per ottenere i modelli chiusi necessari per la stampante 3D. I fori sono stati chiusi e quindi è stata utilizzata lo strumento per lisciare e livellare la superficie e rendere più piatto il modello. Si è deciso di utilizzare questo processo perché la parte non era visibile e quindi era accettabile avere una precisione inferiore, considerando anche l'obiettivo finale del progetto (Figura 5). La post-elaborazione dei modelli delle singole statue in ZBrush. La parte finale ha riguardato la stampa 3D dei tre

Figura 5. La post-elaborazione dei modelli delle singole statue in ZBrush.

Figure 5. The post-processing of the models of the single statues in ZBrush.



modelli. In accordo con i clienti, si è deciso di utilizzare la resina perché i risultati sarebbero stati più levigati e quindi le geometrie e i dettagli dell'architettura sarebbero stati più leggibili quando il pubblico avrebbe toccato la superficie. La parte più importante ha riguardato la finitura dei modelli, perché era obbligatorio avere una superficie piana e liscia. Considerando che la stampante 3D utilizzata per questo progetto aveva un volume di stampa inferiore rispetto ai modelli da stampare, questi dovevano essere tagliati a pezzi e poi incollati tra loro. Le linee che collegavano le diverse parti sono state poi cancellate con l'uso di carta vetrata e lucidante per uniformare la superficie (Figura 6a-b). Questo processo ha richiesto molto tempo e sono stati stampati diversi modelli per arrivare a quelli definitivi, perché era importante produrre un manufatto che fosse una copia fedele dell'originale, garantendo la superficie adatta ai non vedenti per capire con il tatto i dettagli. Considerando questo, è ovvio che, ad esempio, rugosità o linee di collegamento avrebbero potuto dare un'impressione sbagliata e quindi una comprensione sbagliata della geometria.



Figura 6. Stampa 3D del modello dell'intera tomba (a) e della statua del Mosè (b) prima dell'applicazione della finitura per uniformare la superficie.

Figure 6. The 3D printed model of the entire tomb (a) and the 3D printed model of the Moses (b) before the application of the polish to uniform the surface.



Figura 7. La stampa 3D finale della testa della statua del Mosè (sinistra), della statua del Mosè (centrale) e dell'intera tomba (destra) posizionati di fronte al monumento per essere utilizzati dai visitatori.

Figure 7. The final 3D printed models of the head of the Moses (left), the statue of the Moses (centre) and the entire tomb (right) placed in front of the monument, to be used by the visitors.

References

- Ballarin, M., Balletti, C., and Vernier, P. (2018). Replicas in Cultural Heritage: 3D Printing and the Museum Experience, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 55–62.
- Balletti, C., Ballarin, M. (2019). An Application of Integrated 3D Technologies for Replicas in Cultural Heritage, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8, 6, 285.
- Berjozkina, G. and Karami, R. (2021), 3D printing in tourism: an answer to sustainability challenges?, *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, Vol. 13 No. 6, pp. 773-788.
- Fassi, F., Achille, C., Fregonese, L. (2011). Surveying and modelling the Main Spire of Milan Cathedral using multiple data sources. *The Photogrammetric Record*, Vol.26, pp. 462–487.
- Gilardoni, O., (2007). *Confronto di applicazioni Image-based e Range-based per applicazioni terrestri*, tesi di laurea, Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, Polo regionale di Como, anno accademico 2006/2007, PDF.
- Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A., Ercoli, S. (2009). A Multi-Resolution methodology for the 3D modelling of large and complex archaeological areas. *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 7(1), pp. 39-55.
- Karbowski, C. (2020). See3D: 3D Printing for People Who Are Blind. *Journal of Science Education for Students with Disabilities*. 23.
- Mikhail, E. M., Bethel, J.S., McGlone, J. C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiley & Sons, inc.
- Pistofidis, P., Ioannakis, G., Arnaoutoglou, F., Michailidou, N., Karta, M., Kiourt, Pavlidis, G.C., Mouroutsos, S.G., Tsiafaki, D., Koutsoudis, A., (2021) Composing smart museum exhibit specifications for the visually impaired, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 52, 1-10
- F. Remondino, S. Camapana, eds, (2014) 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. *Theory and best practices*, BAR International Series 2598.
- Rossetti, V., Furfari, F., Leporini, B., Pelagatti, S., Quarta, A. (2018) Enabling Access to Cultural Heritage for the visually impaired: an Interactive 3D model of a Cultural Site, *Procedia Computer Science*, Volume 130, 383-391.
- Rossi E., Barcarolo P. (2019). Use of Digital Modeling and 3D Printing for the Inclusive Valorization of Cultural Heritage. In: Karwowski W., Trzcielinski S., Mrugalska B., Di Nicolantonio M., Rossi E. (eds) *Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control*. AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 793. Springer, Cham.
- Stoimenov, N., Panev, P., Paneva, M., Karastoyanov, D. (2020) Approaches for 3D Digitalization of Cultural and Historical Sites. *Industry 4.0*, Vol.5 Issue 5, 243-246

Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare la dott.ssa Tiziana Ceccarini del Servizio Educativo della Soprintendenza Speciale di Roma, Digilab Sapienza Università di Roma e Museo Statale Tattile Omero di Ancona per la possibilità di realizzare questo progetto.

From survey to representation. An experiential approach to the knowledge and portrayal of the built heritage.

Introduction

There are two categories of optical 3D acquisition of objects and structures: (1) techniques based on passive sensors (image-based methods) such as photogrammetry, (2) techniques based on active sensors (range-based methods) as for example laser scanning. The two techniques can be used also in combination to reach the maximum accuracy and completeness of the survey. The choice of the best and most appropriate technique depends on the object or area investigated, the user's experience, the budget, the time available and the objectives set. The photogrammetric technique, used alone or in connection with the laser scanner, allows to add the richness provided by the radiometric content to an accurate geometric description in three dimensions. Often, photogrammetric surveys are an optimal solution to perform the survey in an economical way and in a short time with the use of digital non-metric cameras, carefully calibrated with appropriate and specific algorithms and procedures. Active sensors such as laser scanning are used to investigate an object or site, providing 3D point clouds that can be merged (Fassi et al., 2011; Gilardoni, 2007; Guidi et al., 2009; Remondino, Campana, 2014).

Photogrammetry can be defined as “the process of deriving (usually) metric information about an object through measurement made on photographs of the object.” (Mikhail et al., 2001 p. 1). The starting point for building the fundamental relationships of photogrammetry is the prospective projection: a point A projected on a projection plane creates a trace A' and the two points are called homologous points. Simplifying, thanks to a couple of measurements in a 2D space (images), a measure in 3D space is known. In essence, it is the same procedure that happens automatically in the brain: the eyes can be assimilated to the two positions of the camera with the two retinas that play the role of the sensitive area on which the two images are focused. The brain processes the information and, by the two disassembled images produced by the eyes, provides the sense of three-dimensionality and depth of the scene.

The collinearity equations allow, using at least a couple of images where the same point is visible, to calculate the coordinates of the object in space. The use of two images is necessary because only having two views of the same object can be calculated the three spatial unknowns of the object itself (Guidi et al., 2009 p. 24 and following).

The process calculates the external orientation of the camera, meaning 6 parameters related to the spatial position and the orientation of the camera coordinate system in respect to the global coordinate system of the object and the internal parameters defined by the focal length of the camera, the coordinate in the image of the principal point and the parameters related to the different distortion of the lenses. The mathematical model at the base of the photogrammetric

restitution process is defined as a collinearity model that is solved by the principle of “Bundle Adjustment” (also called “projector block compensation”) and using the minimum square process (Gilardoni 2007, pp. 52-58; Guidi et al., 2009 p. 63).

Active systems, especially those based on laser light, on the contrary operate regardless of the light and texture of the object to be detected as they modify the exterior appearance with suitably coded light, that is, “a light characterized by information content recognizable by an electronic sensor, unlike the diffused ambient light, which has no particular elements of recognisability” (Guidi et al., 2009 p. 78). The modelling is obtained through a series of three-dimensional coordinates, usually embedded in a reference system that has its origin in the centre of the instrument. All scanning systems operate through an almost completely automatic process through which they can acquire a large number of points per second, even in the order of one million.

3D printing is a powerful tool for reproduction of Cultural Heritage. Objects reproduced through three-dimensional printing can be very useful for helping blind people to visualize sculptures or artistic artifacts through touch, without, however, having direct contact with the original. The opportunities that derive from 3D replicas are not limited to fruition only by blind people (Karbowski, 2020; Pistofidis et al., 2021; Rossetti, 2018; Rossi, Barcarolo, 2019), but can be valuable resources for children and all museum visitors, given that touch is one of the approaches underlying the experimentation and understanding of outside world. In this sense, three-dimensional copies go beyond the classic perception based on sight to give the user a richer and more enjoyable multisensory experience of the artefact.

A tangible copy printed with digitization technologies can take the place of any artifact that, for various reasons, must be removed from its original environment (Ballarin et al., 2018). The replacement can be limited in time, such as the loan of a work for a temporary or permanent exhibition (removal of a statue from its position to protect it from environmental degradation). In this way, the visitor can appreciate the work in the location for which it was designed and created and, at the same time, the original is preserved and protected (Berjokzina, Karami, 2021).

Digital manufacturing technologies can find a wide outlet in the creation of customized packaging or support structures for the storage, transport or display of fragile artifacts. The risks in handling objects of great cultural value are considerably reduced, given that the difficulties and errors during the manual process (such as the measurements of the work, production of the packaging, tests on the accuracy of the packaging) they are replaced by a computerized process that takes its cue from the 3D digital model to automatically produce a customized support structure.

Three-dimensional printing technologies can also contribute to the restoration of works of art. Many sculptures and

monuments are preserved with essential missing parts, which can be replaced by artificial copies to give a complete explanation to the public of what the original structure looked like. Therefore, 3D printers can accurately and quickly reproduce the gaps of many art installations, as happened with the recovery of two damaged limestone burial busts recovered in Palmyra shortly after the first ISIS occupation. The restorers used a 3D printer to fabricate pieces for the busts, originally made in the 2nd or 3rd century, and then fixed the 3D printed parts onto the originals using magnets.

For this project it was decided to use photogrammetry essentially because of the location of the monument and the fact that it is constantly visited. The tomb of Giulio II (Figure 1) is an architectural and sculptural project by Michelangelo Buonarroti which, in its final but reduced version, is located in the basilica of San Pietro in Vincoli in Rome.

Michelangelo Buonarroti (6 March 1475 – 18 February 1564) was an Italian sculptor, painter and architect. Already in life, he was considered by his contemporaries, one of the greatest artists of all the time. He was the author of some of the most unique and well-known artworks of all the time, such as the David in Florence, the Pietà and the Sistine Chapel in the Vatican, the Dome of San Pietro, and the Moses in Rome. Michelangelo was the first sculptor who, in stone, never tried to colour or gild some parts of the statues; in fact, he preferred the exaltation of the “soft splendour” of the stone to colour, often with chiaroscuro effects evident in the statues that were left without the last finish, with the strokes of the chisel that enhance the peculiarity of the marble material. He declared himself an artist “of taking up”, rather than “putting”, that is, for him the final figure was born from a process of subtraction of the material up to the core of the sculptural subject, which was already “imprisoned” in the block of marble.

The sculptor was commissioned by the Pope himself to build his own sepulchral monument in 1505, but the artist started far late, in 1544 due to several difficulties and funding issue. He himself did not hesitate to refer to this project as the “tragedy of the burial”, an authentic ordeal which until the last days of his life was a source of inexhaustible accusations, torments and remorse. His official biographer Ascanio Condivi wrote that the enterprise caused him “infinite hindrances, sorrows and troubles and, what is worse, for the malice of certain men, infamy, of which he was purged just after many years”. From a monumental rectangular mausoleum with more than forty statues (first project, 1505) we ended up with a monument leaning against the wall of a Roman secondary basilica (1545), with just seven statues, of which only three by Michelangelo (Moses, Rachele and Lia, respectively symbolizing the contemplative life and the active life) and one alone (Moses) worthy of his fame: the artist, now exhausted, would later have his biographer write that “this statue alone is enough to honour the burial of Pope Julius II”.

Michelangelo was entrusted with the task of creating a monumental tomb for the pope, to be placed in the gallery

(nearing completion) of St. Peter’s Basilica. The first project provided for a colossal architectural structure isolated in space, with a rectangular base (about 10.8x7.2 m at the base and 8 m in height) composed of three orders which, from the base, were gradually narrowing, in a sort of architectural-sculptural pyramid. Around the pope’s bier, in an elevated position, there were about forty statues, sized on a larger than natural scale, some free in space, others leaning against niches or pillars, on all four facades of the architecture. Michelangelo, while returning to Rome laden with marbles, made the bitter discovery that his mammoth project was no longer at the centre of the pope’s interests, set aside in favour of the basilica and new war plans against Perugia and Bologna. The pope died in 1513 and in his will, he took up the old project, which, however, in agreement with the heirs, was modified, signing a new contract in May of that year. The most substantial modification was the leaning of the tomb against a wall and the elimination of the mortuary, characteristics that were maintained until the final project. In July 1516 a new contract was reached for a third project, which reduced the number of statues. The sides were shortened to the thickness of a single niche, still containing a Victory and two Prisons leaning against the pillars below busts (as on the front side). The monument was thus taking on the appearance of a monumental facade, moved by sculptural decorations. In 1523 it was decided to move the location of the tomb to San Pietro in Vincoli.

Methodology

Photogrammetry was chosen as a survey technique to overcome logistic difficulties. The architecture is situated in an aisle of the Basilica, protected by a low fencing: moving around with a scanner was very difficult, also because it was possible to use a scaffolding to partially reach the upper floor and the top was visible climbing up a narrow staircase that led to the top of the structure. On the other hand, it was also decided to provide the customers with a final 3D textured model as a digital archival data.

The camera used was a Canon 60D coupled with a 20 mm lens, ISO 800 F 6.3. The first main problem occurred was related to the lighting used. The new lighting system, thanks to the work of the master-craftsman Mario Nanni, is able to recreate the same light conditions on which Michelangelo in the sixteenth century was based for the creation of the Tomb. After all, the artist used sunlight as a structural element of the statues, to give life and emotion to the marble: where the direct light (coming from a closed window) struck, he used the lustre technique (which makes the surfaces reflective), for the shaded parts he used pumice or the step to leave them opaque. Today the lighting is back to that of the past, through the use of sophisticated computer techniques and Viabizzuno LED lamps that make a framework lighting and a simulation of the light trend during the hours of the day. This was joined by the work of the restorer Antonio Forcellino, who recovered the colours of the Carrara marble

chosen by Michelangelo, while leaving the patina of time.

This system, although beautiful for the visitors, created a huge problem during the survey. The changing of illumination, hence lights and shadows on the structure, would have been affected the final result, giving a less accurate 3D model. It was hence asked and obtained to keep all the lamps open, in order to have a more diffuse and steady illumination.

The second problem regarded the acquisition of the upper part of the monument and the rear part of the statues. For the last issue the Superintendence permitted to stand on the base of the statue, without the shoes, in order to reach at least a small part of the back of the Moses only during the hours the church was closed, from 1 to 3 pm (Figure 2).

A scaffolding (Figure 3a-c) was used to acquire pictures of the upper statues and the top was obtained shooting from the attic. The problem with the scaffolding was that the system had wheels to be moved and only a wooden bench to walk upon, hence was not very stable. It was necessary to move it, wait until the vibrations and waving stopped, acquire a picture and then move it again, that was very time consuming considering that two different passages have been done at different distances. That is also why, as already said, the use of a laser scanner was impossible given the working conditions.

These solutions didn't of course permit to have a complete coverage of the structure, but at least limited the missing parts in the final model (Figure 4). The software used for obtaining the model was Agisoft Metashape. The algorithm used by the software to create the mesh, tried to close the holes of the missing parts, ending up forming blurred surface. The second step for the creation of the 3D printed models was the post processing of the photogrammetric result. Once the model was rotated with the z axis up and scaled, it was exported to be processed in 3D Studio Max where it was segmented in different parts and then scaled accordingly to the requests of the customers with three different scaled models: one of the entire architectures (1:100), one of the statues of Moses (1:50) and one of his head (1:1). The 3D reality-based model was imported in Zbrush after being segmented in its main parts, to proceed with the closing of the holes on the rear part of the statues (Figure 5). This passage was fundamental to obtain closed models needed for the 3D printer. The holes were closed and then the smoothing brush was used to level the surface and made the model flatter. It was decided to use this process because the part was not visible and so it was acceptable to have a lower accuracy, considering also the final goal of the project. The final part regarded the 3D printing of the three models. In accordance with the costumers, it was decided to use resin because the results would have been smoother and so the geometries and the details of the architecture was more readable by touching the surface. The most important part concerned the finish of the models, because it was mandatory to have a flat, smooth surface. Considering that the 3D printer used for this project had a smaller printing volume than the models to be printed, these had to be cut in pieces and then

glued together. The lines interconnecting the different parts were then cancelled with the use of sandpaper and a polish to uniform the surface (Figure 6a-b). This process requested a lot of time and different models have been printed to arrive to the final ones, because it was important to produce an artefact that was an accurate copy of the original Heritage, granting the suitable surface for blind people to understand with the touch the details. Considering this, it is obvious that for example, roughness or connecting lines could give a wrong impression and so the wrong understanding of the geometry.

Results

The 3D printed models were placed in front of the monument (Fig.7) accessible to everyone interested in touching it and experiencing the sensation. The final 3D printed models reached a real good accuracy in details, close to the one of the monument, especially in the 3D printed head of the Moses. In this case, due also to the scale (1:1) it was possible to finalise the model maintaining all the specific and outstanding characteristics of the statue. On the other hand, the printed model of the entire monument had a less accuracy especially regarding small details. This was however accepted by the costumers, aware that with a small scale as 1:100 was not possible to display perfectly the small decoration of the semi pillars or the eyes and face of the statues.

Conclusions.

The integration of 3D reality-based techniques and 3D printing is a powerful tool applied to Cultural Heritage conservation, visualization and fruition. The most important point to take in mind is of course the final destination of the 3D printed model: for restoration a high accuracy is needed with the use of specific printing material as chalk or marble powder; for blind people is fundamental to have a smooth surface and it is an appropriate process to consider different printing scale in order to be able to make available all the different characteristics and details of the statue or monument.

The process followed was suitable to obtain three different models with three different level of details: one gave an overview of the tomb, giving up of the details, the other two, especially the head, permitted the visitors to touch and feel all the different contrasts specific of the art of Michelangelo.

Acknowledgment

The authors want to thank Dr Tiziana Ceccarini of the Servizio Educativo della Soprintendenza Speciale di Roma, Digilab Sapienza Università di Roma and Museo Statale Tattile Omero di Ancona for the possibility of doing this project.