POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Un approccio sostenibile e flessibile per la digitalizzazione di beni museali: dalle immagini ai modelli 3D

Original
Un approccio sostenibile e flessibile per la digitalizzazione di beni museali: dalle immagini ai modelli 3D / Patrucco, Giacomo; Chiabrando, Filiberto - In: SAMIC - Sound Archives & Musical Instruments Collections. Documentazione del progetto e guida al sistema di catalogazione. / Ilario Meandri, Cristina Ghirardini. - ELETTRONICO. - Lucca : Libreria Musicale Italiana, 2019. - ISBN 978-88-5543-017-3. - pp. 153-182

Availability:
This version is available at: 11583/2831686 since: 2020-06-05T17:59:51Z

Publisher:
Libreria Musicale Italiana

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

14 May 2024

LIM OpenAccess

SAMIC
Sound Archives & Musical Instruments Collections

Documentazione del progetto e guida al sistema di catalogazione

Libreria Musicale Italiana

Volume pubblicato con il contributo di:

StudiUm – Dipartimento di Studi Umanistici
Università degli Studi di Torino

Redazione, grafica e layout: Ugo Giani
In copertina: *Sübièt*, Collezione Domenico Torta. Fotografia di Ilario Meandri.

© 2019 Libreria Musicale Italiana srl, via di Arsina 296/f, 55100 Lucca
lim@lim.it www.lim.it
Questo scritto è rilasciato su licenza Creative Commons Attribution 4.0
(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ISBN 978-88-5543-017-3

SAMIC

Sound Archives
& Musical Instruments Collections

Documentazione del progetto
e guida al sistema di catalogazione

a cura di
Ilario Meandri e Cristina Ghirardini

Collaborazione all'edizione
Elisa Salvalaggio

Libreria Musicale Italiana

Versione della documentazione: 0.1 (11_2019).
Changelog: 1/11/2019 – la guida al sistema catalografico e la documentazione sono alla loro prima versione.
Versione dell'applicativo di back end: ver. 0.1 (11_2019).
Changelog: 1/11/2019 – l'applicativo è alla sua prima versione.
Versione dell'applicativo di front end – End point SPARQL ver. 0.1 (11_2019).
Changelog: 1/11/2019 – l'applicativo è alla sua prima versione.

Nel ricordo di Febo

Sommario

1.
Introduzione
Ilario Meandri, Cristina Ghirardini, Guido Raschieri,
Giorgio Bevilacqua, Filiberto Chiabrando, Giacomo Patrucco 3

2.
La catalogazione degli strumenti musicali: l'insegnamento di Febo Guizzi
Cristina Ghirardini 27

3.
Guida al sistema di catalogazione (v. 0.1)
Ilario Meandri e Cristina Ghirardini 53

4.
SAMIC information system: soluzioni interoperabili per la catalogazione degli strumenti musicali
Giorgio Bevilacqua 103

5.
Normativa e standard per la descrizione di documenti sonori in ambito etnomusicologico
Elisa Salvalaggio 127

6.
Un approccio sostenibile e flessibile per la digitalizzazione di beni museali: dalle immagini ai modelli 3D
Giacomo Patrucco e Filiberto Chiabrando 153

Appendice 1
Esposizione dei modelli 3D
Ilario Meandri 183

SAMIC
Sound Archives
& Musical Instruments Collections

6.
Un approccio sostenibile e flessibile per la digitalizzazione di beni museali: dalle immagini ai modelli 3D

Giacomo Patrucco e Filiberto Chiabrando

Politecnico di Torino, Lab. di Geomatica per i Beni Culturali, Dip.to di Architettura e Design – DAD

6.1 Introduzione

La documentazione metrica tridimensionale (3D) di reperti appartenenti al nostro patrimonio storico e culturale, spesso custoditi presso musei e collezioni, è una tematica che negli ultimi anni è risultata strettamente legata alla disciplina della Geomatica[1] (Lo Turco et al. 2018; Guidi et al. 2107; Gonizzi Barsanti e Guidi 2013). Questi preziosi oggetti, che appartengono a quello che viene generalmente definito come patrimonio mobile o beni mobili (*Movable cultural property*, come vengono chiamati negli atti della Conferenza Generale UNESCO del 1978 – Unesco 1979), necessitano infatti di una particolare attenzione da parte degli attori che lavorano nel campo della valorizzazione dei beni culturali. Nell'approcciarsi a questo tipo di operazioni è necessario considerare uno svariato numero di problematiche (tra le altre, la fragilità, spesso dovuta all'invecchiamento, degli oggetti rilevati) che sovente richiedono metodi di rilievo che non prevedano contatto diretto; il raggiungimento di un elevato livello di dettaglio in grado di descrivere in modo adeguato oggetti che il più delle volte sono molto piccoli e necessitano rappresentazioni in scala 1:1 o superiori; la gestione dei dati acquisiti ed elaborati, in modo che questi oggetti riprodotti digitalmente possano essere adeguatamente studiati e condivisi.

1. La Geomatica è una disciplina che si occupa di acquisire, elaborare, misurare, analizzare e rappresentare informazioni riguardanti lo spazio fisico, fornendo strumenti efficaci grazie allo sviluppo tecnologico e informatico che ha avuto luogo negli ultimi anni. Al suo interno comprende discipline e tecnologie come la Topografia, la Cartografia, la Geodesia, la Fotogrammetria, il Telerilevamento, i sistemi LiDAR, le tecniche di posizionamento satellitari, i Sistemi Informativi Territoriali e in generale tutto ciò che si occupa dello studio dello spazio (Gomarasca 2009).

I ricercatori che operano nell'ambito della documentazione e valorizzazione dei beni culturali studiano ed elaborano continuamente nuove strategie al fine di documentare queste preziose testimonianze del nostro passato. Le possibilità offerte dalle nuove tecnologie digitali che si sono imposte negli ultimi anni nel campo del rilievo metrico 3D sono molteplici e, oggigiorno, grazie ai contributi delle moderne tecniche di modellazione, è possibile ottenere risultati di elevata qualità, accuratezza metrica[2] (alcune tecnologie consentono di giungere ad un'accuratezza nominale inferiore al millimetro) e livello di dettaglio.

Le potenzialità di questi metodi innovativi sono molteplici e molti studiosi che lavorano nel campo della modellazione 3D stanno portando avanti progetti di digitalizzazione di beni museali in collaborazione con diversi musei al fine digitalizzare le opere esposte al loro interno (Povroznik 2017; Kersten et al. 2016).

Naturalmente, durante queste esperienze di ricerca durante le quali i reperti vengono acquisiti e riprodotti digitalmente con tecniche di modellazione 3D, gli aspetti legati alla documentazione metrica sono estremamente importanti, ma non sono necessariamente gli unici a venire considerati. Oltre a fornire modelli interrogabili e misurabili le moderne tecniche di digitalizzazione consentono infatti di ottenere dei modelli, estremamente versatili che si prestano a molteplici utilizzi e sviluppi.

Queste repliche virtuali rappresentano un importante strumento da utilizzare come base per ulteriori ricerche e analisi, non solo per chi si trova ad operare all'interno della Geomatica, ma anche per chi proviene dai più svariati settori disciplinari, fornendo una solida base per approfondire diverse tematiche riguardanti lo studio dei beni culturali stessi (Donadio et al. 2018; Bertolini Cestari et al. 2013).

Un altro aspetto fondamentale da considerare è la diffusione e la condivisione di questi modelli, ovvero occorre studiare (oltre i metodi più efficaci per riprodurli digitalmente) in che modo essi possano essere visualizzati e fruiti da diversi tipi di utenza. Oggigiorno tali esigenze possono essere assolte grazie alle moderne tecnologie digitali e alla diffusione, sempre crescente, di visualizzatori online (molti dei quali open-source) che consentono la fruizione e l'accessibilità di questi modelli ad un pubblico più ampio (Koller et al. 2009; Minto e Remondino 2014; Potenziani et al. 2015).

Un altro problema che occorre affrontare, di cui si è già accennato, è la fragilità di molti di questi oggetti, dovuta principalmente all'invecchiamento e dallo stato di conservazione dei reperti in questione, spesso molto antichi e deteriorati.

2. Per accuratezza, nell'ambito della teoria degli errori, si intende lo scostamento tra la dimensione misurata e la dimensione reale di un oggetto; naturalmente una misura sarà tanto più accurata quando il valore misurato si avvicinerà al dato di riferimento. A seconda della scala del rilievo e della tecnica impiegata si otterranno dei valori più o meno accurati.

Pertanto un approccio che non preveda, in fase di acquisizione, il contatto diretto con la superficie dell'oggetto acquisito è, quando possibile, preferibile. In relazione a questo, va sottolineato come il continuo monitoraggio dei beni (che per i motivi sopra esposti sono intrinsecamente fragili e dunque più esposti al pericolo di andare persi insieme alla testimonianza storica che rappresentano) sia dunque non desiderabile, ma necessario, e come un'adeguata documentazione permetta di aumentare la resilienza del nostro patrimonio storico e culturale.

Le moderne tecniche di modellazione rispondono in maniera esaustiva a queste tematiche affrontando efficacemente le criticità sopra esposte, consentendo dunque una efficiente documentazione tridimensionale degli oggetti in questione. In tal senso le tecniche e gli strumenti offerti dalla Geomatica sono molteplici e permettono approcci non invasivi con una vasta gamma di applicazioni. Uno dei metodi a cui si fa maggiormente ricorso in questi ambiti di digitalizzazione museale (Guidi et al. 2017) è la fotogrammetria digitale[3] che, grazie agli algoritmi Structure-from-Motion (SfM) sviluppati negli ultimi anni e legati alla computer vision, permettono la realizzazione di copie digitali ad alta risoluzione.

L'approccio fotogrammetrico, che è stato sperimentato durante la ricerca illustrata di seguito, offre una serie di vantaggi legati alla digitalizzazione di oggetti museali.

Un aspetto da considerare è l'abbondanza di sensori per l'acquisizione dei dati che negli ultimi anni sono stati resi disponibili sul mercato: attualmente in commercio è possibile trovare un elevatissimo numero di soluzioni a svariate fasce di prezzo, rendendo possibile quindi approcciarsi a questo tipo di operazioni di digitalizzazione anche in maniera low-cost con risultati accettabili (Kersten et al. 2016; Elkhrachy 2019). In ogni caso, anche utilizzando attrezzatura di livello professionale, solitamente il costo rimane inferiore rispetto ad altre tipologie di soluzioni decisamente più costose (per esempio, nel caso di laser scanner ad alta precisione attualmente in commercio, dal costo di decine o centinaia di migliaia di euro).

La fotogrammetria digitale rappresenta un approccio di tipo passivo e non richiede un contatto diretto con l'oggetto, pertanto questa tecnica è applicabile anche a quei reperti che, a causa della propria fragilità, non possono essere toccati direttamente.

Un altro dei vantaggi di un approccio di tipo fotogrammetrico per quello che riguarda la digitalizzazione di reperti museali è la possibilità di generare, a partire dagli stessi fotogrammi che, una volta processati, ricostruiscono la geometria

3. La fotogrammetria è una scienza le cui applicazioni permettono di ricavare informazioni di tipo metrico a partire da immagini fotografiche bidimensionali, anche chiamate fotogrammi; nel caso della fotogrammetria digitale queste informazioni sono ricavate da immagini acquisite con camere digitali attraverso l'uso di specifici software (Kraus 1994).

dell'oggetto, una texture fotografica, ovvero un'immagine che, proiettata sulla superficie del modello digitale, contribuisce a fornire delle informazioni sulla radiometria e quindi sul tipo di materiale di cui è composto l'oggetto.

Le attività di ricerca descritte in questo articolo si sono svolte nell'ambito del progetto **SAMIC** (*Sound Archives & Musical Instruments Collection*) coordinato da Ilario Meandri dell'Università di Torino. Lo scopo del progetto è realizzare:

> il primo CMS (Content Management System) nazionale e il primo sistema Linked Open Data dedicato alla catalogazione digitale di strumenti musicali. Il popolamento campione e il test generale del CMS viene condotto sugli strumenti della Collezione Torta del Museo del Paesaggio Sonoro rendendo disponibili a partire dal novembre 2018 dati catalografici, fotografie e modelli 3D ad alta risoluzione degli strumenti musicali. Una seconda parte del progetto è dedicata alla proposta di una policy disciplinare per la corretta digitalizzazione e catalogazione dei supporti audio utilizzati nella ricerca sul campo in etnomusicologia. Questa parte del lavoro prende in considerazione i principali standard catalografici nazionali e internazionali per l'identificazione dei supporti audiovisivi e per la descrizione dei contenuti di interesse etnomusicologico formulando proposte per una descrizione catalografica integrata.[4]

Anche il Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Politecnico di Torino è stato coinvolto in questo progetto per quanto riguarda l'aspetto legato alla realizzazione di modelli tridimensionali texturizzati e ad alta risoluzione: il suo contributo è consistito nell'acquisizione e nella successiva modellazione 3D di un campione composto da nove strumenti musicali appartenenti alla collezione del Museo del Paesaggio Sonoro di Riva presso Chieri, un museo che accoglie al proprio interno la Collezione Torta, che comprende una grande varietà di strumenti musicali appartenenti alla tradizione popolare (Ghirardini et al. 2017).

Questa ricerca si prefigge diversi obiettivi con molteplici possibili sviluppi futuri: dalla visualizzazione 3D dei modelli all'ottimizzazione degli stessi per quanto riguarda esperienze di realtà virtuale o realtà aumentata, grazie a tecnologie che permettono di navigare i modelli tridimensionali e accedere a informazioni associate alle geometrie digitali, e alla diffusione culturale, possibile grazie a visualizzatori online. Un altro aspetto importante della sperimentazione condotta è consistito nell'elaborazione di una strategia sostenibile e replicabile al fine di elaborare un workflow operativo standardizzato per la digitalizzazione di beni mobili analoghi a quelli analizzati durante la ricerca presentata. Nelle parti successive verranno illustrate le operazioni condotte dall'acquisizione dei dati alla loro elaborazione,

4. <http://museopaesaggiosonoro.org/sound-archives-musical-instruments-collection-samic/>.

valutando anche la funzionalità del workflow seguito, tenendo in considerazione gli obiettivi prefissati e le possibili prospettive future.

6.2 Gli strumenti musicali: dall'oggetto fisico al modello digitale

Per gli scopi di questa ricerca, come si è detto precedentemente, sono stati selezionati nove strumenti musicali attualmente esposti presso il Museo del Paesaggio Sonoro di Riva presso Chieri (Fig. 6.1).

- Un *torototela*, uno strumento ad arco monocorde composto da una pala (che originariamente serviva a raccogliere il grano) e una vescica di maiale essiccata e gonfiata, che funge da cassa di risonanza grazie alle vibrazioni trasmesse dalla corda;
- Un flauto globulare realizzato in terracotta;
- Un *frullo* di legno;
- Una *tabella*, utilizzata durante le celebrazioni della Settimana Santa;
- Un *rombo*;
- Una coppia di *quaglieri*, ovvero dei richiami utilizzati durante la caccia alle quaglie, uno con il fischietto d'osso e l'altro con il fischietto di metallo;
- Una coppia di mirliton idiofonici chiamati *ravi* o *cuse*, realizzati ciascuno dalle metà essiccate di due zucche vinarie.

Gli strumenti selezionati divergono tra loro sia per morfologia/geometria, sia per quanto riguarda la consistenza materica, in quanto sono realizzati nei materiali più svariati tra cui cuoio, osso, metallo, legno, terracotta, ecc.

Alcuni di questi strumenti musicali sono composti da più elementi, come nel caso del *torototela* che è composto da due parti separate, la pala e la vescica di maiale; oppure il frullo, che oltre all'elemento ligneo centrale è dotato di due manici; o ancora le due zucche, ciascuna composta da una calotta superiore e inferiore. In questi casi ciascun elemento è stato considerato separatamente, sia per quanto riguarda la fase di acquisizione, che per quella di elaborazione dei dati. In totale sono stati quindi realizzati quattordici modelli separati. Al termine delle procedure di digitalizzazione gli strumenti formati da più elementi sono stati riuniti virtualmente e inseriti in un medesimo contesto.

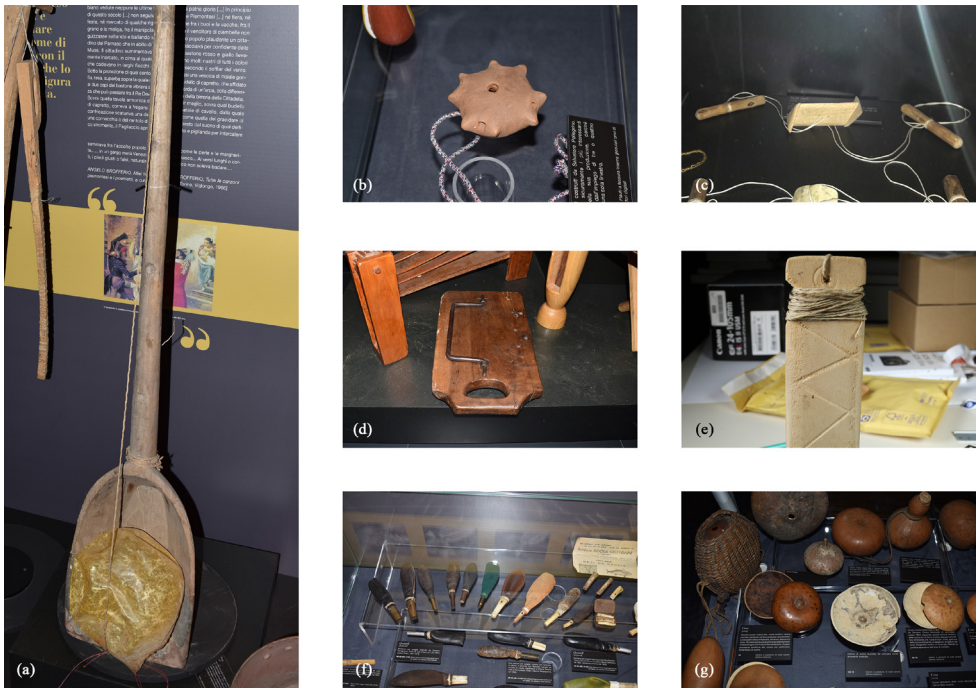

Fig. 6.1 (a) *Torototela*, (b) Flauto globulare, (c) *frullo*, (d) *tabella* per le celebrazioni della Settimana Santa, (e) *rombo*, (f) *quaglieri*, (g) *cuse*.

6.3 Fotogrammetria: un approccio flessibile al rilievo metrico 3D

L'approccio utilizzato durante questa ricerca per la ricostruzione dei modelli 3D, come accennato nei paragrafi precedenti, è di tipo fotogrammetrico. Già prima della cosiddetta rivoluzione digitale la fotogrammetria analogica, basata sull'utilizzo di foto-restitutori e di singole coppie di fotogrammi stereoscopici, ha rappresentato una soluzione efficace ai fini dell'estrazione di misure da immagini fotografiche; grazie all'avvento di nuovi algoritmi e l'incremento di moderne tecnologie digitali (che negli ultimi anni hanno avuto un incremento esponenziale, permettendo di ottenere in brevissimo tempo una potenza di calcolo inimmaginabile fino a qualche decennio fa) si è raggiunto un elevato livello di automazione dei procedimenti grazie ai quali, a partire dai fotogrammi acquisiti, è possibile ricostruire le geometrie anche complesse di un oggetto in maniera automatica o semi-automatica e di generare modelli 3D estremamente dettagliati. Alla luce della flessibilità intrinseca di questa disciplina, da sempre strettamente legata alla topografia tradizionale, che con i suoi molteplici strumenti consente di effettuare un controllo metrico sui prodotti fotogrammetrici, al fine di valutarne l'accuratezza,

il suo utilizzo è applicabile in tutti quegli ambiti dove sia possibile acquisire delle immagini fotografiche e dove non sia previsto il contatto diretto con l'oggetto del rilievo. I suoi impieghi nell'ambito del rilievo metrico 3D spaziano all'interno di una vastissima gamma di applicazioni: dalla cartografia, grazie al ricorso alla sempre più utilizzata fotogrammetria aerea tradizionale da aereo o da drone; al rilievo architettonico di singoli edifici o fronti urbani; al monitoraggio in diversi ambiti, tra cui quello ambientale, industriale o architettonico; per la ricostruzione delle geometrie di oggetti anche estremamente piccoli, come nel caso della ricerca illustrata in questo articolo, sia per quanto riguarda metrologia industriale che per la documentazione del patrimonio culturale. Proprio in virtù di questa sua flessibilità e grazie all'abbondanza di potenziali applicazioni, il ricorso alla fotogrammetria e alle tecniche digitali di tipo image-based sono ormai diventate prassi comune nell'ambito della documentazione dei beni culturali per i ricercatori che lavorano nel campo della Geomatica e non solo (Aicardi et al. 2018), come è successo nel caso di questa esperienza di ricerca. Nei paragrafi successivi verranno illustrate le varie fasi operative, dall'acquisizione delle immagini digitali, alla loro elaborazione e al successivo processo di modellazione 3D.

6.4 Preparazione dello stage e strategie di acquisizione delle immagini

Come già affermato nei paragrafi precedenti, l'approccio adottato durante questa esperienza di ricerca è di tipo image-based, ovvero la ricostruzione tridimensionale dei modelli è avvenuta mediante algoritmi `Structure-from-Motion` a partire da immagini bidimensionali, acquisite con una camera digitale full-frame ad alta risoluzione modello Canon EOS 5DSR equipaggiata con un obiettivo macro Zeiss ZE/ZF.2 Makro-Planar T* 50 mm f/2 (Fig. 6.2). Nella Tabella 6.1 è possibile osservare le specifiche della camera utilizzata durante questa ricerca.

Fig. 6.2 (a) Canon EOS 5DSR e (b) Zeiss ZE/ZF.2 Makro-Planar T* 50 mm f/2.

Modello	**Canon EOS 5DSR**
Sensore	**CMOS 50.3 [Mp]**
Dimensione del sensore	**36 x 24 [mm]**
Dimensione dell'immagine	**8688 x 5792 [pixels]**
Lente	**Zeiss ZE/ZF.2 Makro-Planar T* 50 mm f/2**
Lunghezza focale	**50 [mm]**

Tabella 6.1 Specifiche principali della camera e della lente utilizzate.

Gli oggetti sono stati acquisiti all'interno delle strutture del Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali del Politecnico di Torino; tuttavia le operazioni sono state eseguite al fine di poterle replicare in un qualsiasi ambiente (in relazione ad uno degli obiettivi principali di questa ricerca, ovvero lo sviluppo di un workflow replicabile ed adattabile a diversi tipi di contesti). L'unico requisito richiesto per quanto riguarda l'ambiente dove avviene questa prima fase di raccolta dati è uno spazio di dimensione sufficiente a contenere un operatore, un treppiede fotografico con una camera, un sistema di illuminazione (nel caso della ricerca presentata una coppia di fari led) e una superficie su cui appoggiare un piatto girevole della superficie adeguata rispetto agli oggetti che si desidera acquisire. Nel caso illustrato, gli strumenti analizzati sono di dimensioni piuttosto ridotte: da una lunghezza di sette-otto centimetri circa (come nel caso nel flauto globulare, uno degli oggetti più piccoli tra quelli modellati) fino a poco più di quaranta centimetri (la *tabella*). L'unica eccezione è la pala che compone il *torototela*, lunga circa un metro e trenta centimetri; in ogni caso tutti gli oggetti sono stati misurati utilizzando un piatto girevole di legno dal diametro di circa trentacinque centimetri (tale piattaforma è stata utilizzata anche per scattare le fotografie della pala, messa in verticale sopra di essa e immobilizzata con un adeguato supporto posto alla base). Chiaramente, le dimensioni dello spazio dove viene allestito lo stage di acquisizione variano a seconda delle dimensioni degli oggetti che devono essere rilevati; per oggetti di dimensioni più considerevoli occorreranno spazi più grandi (bisogna considerare anche la distanza di acquisizione che nel caso di questa ricerca è stato di pochi centimetri ma che, presumibilmente, sarà maggiore di fronte ad oggetti più grandi di quelli considerati). La distanza di acquisizione influisce sul **GSD** (Ground Sample Distance), ovvero la distanza tra due pixel adiacenti misurata sull'oggetto ripreso. Ad una minore distanza di acquisizione corrisponde un **GSD** minore e, conseguentemente, una risoluzione e un livello di dettaglio maggiori. In questo caso la distanza ravvicinata tra la camera e gli oggetti ripresi ha consentito di ottenere dei **GSD** compresi tra 0,01 e 0,05 mm/px e, quindi, un elevatissimo livello di dettaglio.

Le acquisizioni sono state eseguite utilizzando un treppiede fotografico e pianificate seguendo l'approccio fotogrammetrico, ovvero prevedendo un'adeguata

sovrapposizione reciproca tra immagini adiacenti, al fine di facilitarne l'allineamento relativo e l'estrazione automatica dei punti omologhi[5] durante la successiva fase di elaborazione (Samaan et al. 2013; Chiabrando et al. 2015). Una corretta messa a fuoco e un'illuminazione omogenea dello stage di acquisizione sono fondamentali al fine di ottenere un'adeguata ricostruzione della geometria ed evitare effetti indesiderati per quanto riguarda la texture finale (sfocatura, ombre o, per quanto riguarda le superfici lucide, riflessione della luce). Pertanto, durante questa fase, si è fatto ricorso a due pannelli LED Lupo equipaggiati con diffusori (<www.lupo.it>) opportunamente posizionati di volta in volta in modo da illuminare il più omogeneamente possibile gli oggetti da acquisire (Fig. 6.3a).

Al fine di ottimizzare i tempi durante la fase di acquisizione si è optato per l'utilizzo di un piatto girevole sopra il quale appoggiare gli strumenti da rilevare. Facendo ruotare il piatto a intervalli regolari è possibile acquisire le immagini digitali degli strumenti da diverse angolazioni e con una adeguata sovrapposizione di circa il 90%, in modo da ricoprire l'intera superficie dell'oggetto e facilitare successivamente, durante la fase di elaborazione dei dati, l'estrazione dei punti omologhi. In questo modo i tempi legati alle procedure di messa a fuoco e allo spostamento della camera sono ridotti drasticamente: alcuni di questi strumenti hanno richiesto appena quindici minuti per quanto riguarda l'acquisizione, principalmente quelli più piccoli e caratterizzati da una geometria semplice. Lo strumento per il quale è stato necessario il tempo maggiore, la *tabella*, ha richiesto invece circa un'ora e quarantacinque minuti, a causa della presenza di elementi mobili, i manici. Per questo motivo è stata necessaria una particolare attenzione, come si vedrà nel dettaglio nei paragrafi successivi.

La geometria di presa è stata attentamente pianificata per ciascuno strumento musicale a seconda della morfologia dell'oggetto stesso. Nel caso di strumenti connotati da una geometria complessa o con parti mobili sono state applicate diverse strategie per poter acquisire immagini da diversi punti di vista, con l'ausilio di appositi supporti (Fig. 6.3b).

5. I punti omologhi (o punti di legame) sono i punti corrispondenti tra le diverse immagini. Nella fase di matching questi punti vengono identificati grazie all'algoritmo SIFT (Scale-invariant feature transform) che consente di riconoscerli all'interno delle diverse immagini sulla base di caratteristiche comuni che vengono rilevate in maniera automatica. Grazie all'estrazione di questi punti è possibile ricostruire la geometria dell'oggetto rilevato.

Fig. 6.3 (a) Fase di acquisizione. Lo stage è stato allestito in modo che l'illuminazione fosse adeguata e distribuita omogeneamente (grazie ai due fari LED posizionati a lato della camera). (b) Esempio di utilizzo di supporti per l'acquisizione di un'immagine digitale. In questo caso, a sostegno dell'oggetto, è stata utilizzata una coppia di supporti posizionati alla base dello strumento (uno dei due *quaglieri*).

Dal momento che questa tecnica di rilievo è basata su immagini bidimensionali da cui non è possibile dedurre le effettive dimensioni degli oggetti ripresi, durante questa fase preliminare l'operatore necessita di acquisire delle misure con le quali, successivamente, durante l'elaborazione, sarà in grado di fornire una scala e una dimensione metrica al modello digitale. Infatti, seguendo questa strategia, è possibile ricostruire la corretta geometria dell'oggetto, ma a meno di eseguire queste misure preliminari non è possibile stimarne le dimensioni reali.

Esistono principalmente due metodi per acquisire tali misure e quindi scalare il modello. Il primo metodo consiste nell'acquisizione di una serie di punti di controllo di coordinate xyz note, per esempio attraverso misurazioni topografiche classiche. Questa strategia fornisce risultati complessivamente più precisi e un controllo sull'errore maggiore, dal momento che i punti misurati vengono utilizzati in parte per dimensionare il modello e in parte per verificare l'accuratezza del rilievo eseguito, ma, di contro, ha bisogno di tempistiche maggiori e di avere a disposizione lo strumento necessario per eseguire le misure (per esempio la stazione totale).

Il secondo metodo, più speditivo, consiste nel posizionare delle righe graduate sullo stage di acquisizione, a fianco degli oggetti da misurare. Le righe graduate vengono riprese nei fotogrammi assieme agli oggetti e, durante l'elaborazione, vengono collimati dei punti aventi una distanza reciproca nota. Tali distanze vengono quindi utilizzate per effettuare la scalatura.

Durante l'esperienza descritta, visto che uno degli obiettivi era l'elaborazione di un workflow operativo facilmente replicabile e il più speditivo possibile, è stata seguita questa seconda strategia (Fig. 6.4).

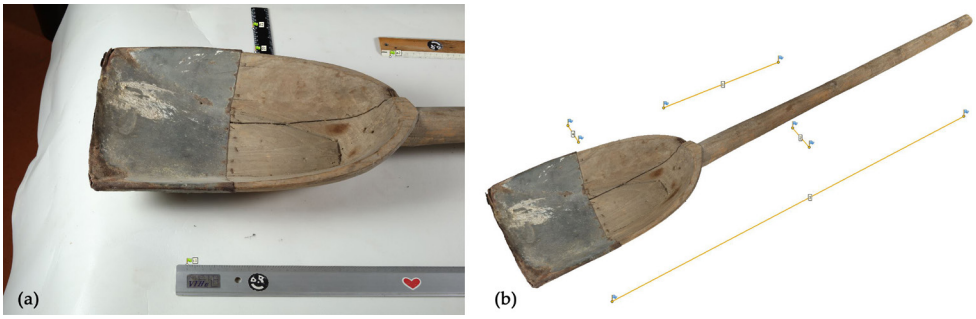

Fig.6.4 (a) Foto della pala del *torototela*; sullo stage sono state posizionate delle righe graduate per poter successivamente scalare il modello 3D. (b) Modello 3D della pala scalato grazie a quattro misure collimate direttamente sui fotogrammi in corrispondenza delle righe graduate disposte sul set.

6.5 Elaborazione dei dati: ricostruzione geometrica con tecniche Structure-from-Motion

La strategia seguita per ottenere dei modelli 3D ad alta risoluzione degli strumenti selezionati è il ricorso ad un approccio di tipo image-based legato alla fotogrammetria digitale, con l'utilizzo di algoritmi di tipo `Structure-from-Motion`. Questa metodologia permette di ricostruire la geometria tridimensionale di un oggetto a partire da una serie di immagini digitali bidimensionali (fotogrammi acquisiti da diversi punti di vista con un'adeguata sovrapposizione). Grazie al continuo sviluppo degli algoritmi connessi alla computer vision, il ricorso a questo tipo di modellazione 3D rappresenta oggigiorno una soluzione non invasiva, sostenibile e relativamente low-cost (Guerra et al. 2018; Kersten e Lindstaedt 2012) per la documentazione dei beni culturali in diversi settori disciplinari, tra cui il campo architettonico (Sammartano e Spanò 2017; Remondino 2011), archeologico (Howland et al. 2018) o, come in questo caso, la digitalizzazione del patrimonio mobile (Samaan et al. 2013; Gajski et al. 2016).

Nel caso della ricerca presentata, le immagini sono state elaborate con il software commerciale **Agisoft Photoscan** (ora conosciuto, in seguito agli ultimi aggiornamenti, **Agisoft Metashape**), una piattaforma ampiamente utilizzata per quanto riguarda le ricostruzioni digitali image-based e che utilizza algoritmi di tipo **Structure-from-Motion**.

Facendo ricorso alla strategia di acquisizione precedentemente riportata, nelle immagini digitali ottenute cambia la posizione relativa tra l'oggetto e lo sfondo (che rimane immobile a differenza del piatto girevole, che ruota continuamente). Per fare in modo che il software estragga i punti omologhi solo nella parte di fotogramma contenente lo strumento musicale, a ciascuna immagine viene applicata una maschera di esclusione (in maniera manuale o con procedure di tipo semi-automatico) al fine di isolare l'oggetto che si intende ricostruire digitalmente (lo strumento musicale) dal background o dagli eventuali supporti utilizzati per tenerlo in posizione verticale (Fig. 6.5).

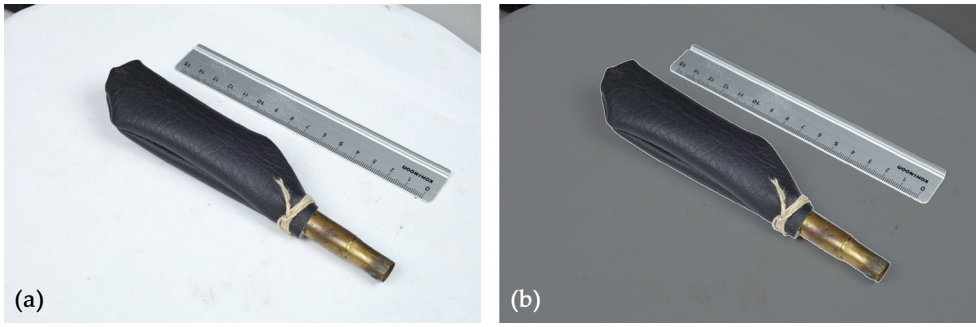

Fig. 6.5 (a) Fotogramma originale e (b) Fotogramma dopo aver applicato la maschera di esclusione.

Questa procedura comporta tempi di elaborazione più lunghi, in quanto sono necessarie operazioni manuali o semi-automatiche da parte dell'operatore ma, come sottolineato nel paragrafo precedente, contribuisce anche a ridurre significativamente quelli di acquisizione. Al fine di determinare un workflow efficiente, ripetibile e adattabile rispetto a diverse situazioni, è stato giudicato preferibile procedere in questo modo, in quanto non sempre è possibile ottenere piena accessibilità a questa tipologia di oggetti (che spesso sono custoditi in musei aperti al pubblico o conservati in magazzini dove non sempre è possibile accedere). Al contrario, le successive elaborazioni solitamente avvengono in un laboratorio, o comunque in un ambiente controllato dove non vi è alcuna restrizione per quanto riguarda l'accessibilità.

Per quando riguarda l'elaborazione dei fotogrammi acquisiti, il workflow seguito per la generazione della nuvola di punti densa (e utilizzata come punto di partenza per la successiva fase di modellazione) è il seguente:

- Estrazione dei punti omologhi dalle immagini (Westoby et al. 2012);
- Allineamento delle immagini. Durante questa fase la geometria 3D dell'oggetto viene ricostruita e viene generata una nuvola sparsa di tie points (Barazzetti et al. 2010);
- Scalatura della nuvola sparsa (Fig. 6.4) grazie alle righe graduate disposte sullo stage di acquisizione;
- Generazione della nuvola di punti densa mediante algoritmi image-matching (Luhman et al. 2013);
- Realizzazione di una mesh tridimensionale e successiva generazione della texture (ovvero un mosaico di immagini generato a partire dai fotogrammi allineati e proiettato sulla superficie della mesh).

Considerata la morfologia complessa di alcuni degli oggetti ripresi, molto diversi tra loro sia per quanto riguarda la geometria che per la consistenza materica, è stato necessario pianificare le acquisizioni fotogrammetriche caso per caso. Come si può vedere dalla Fig. 6.6, dove è possibile osservare tre diversi assetti, l'obiettivo è ricoprire l'intera superficie dell'oggetto in modo da facilitare l'estrazione dei punti omologhi e, conseguentemente, la ricostruzione geometrica, limitando quindi il più possibile le procedure di editing e ricostruzione della mesh successive a questa fase.

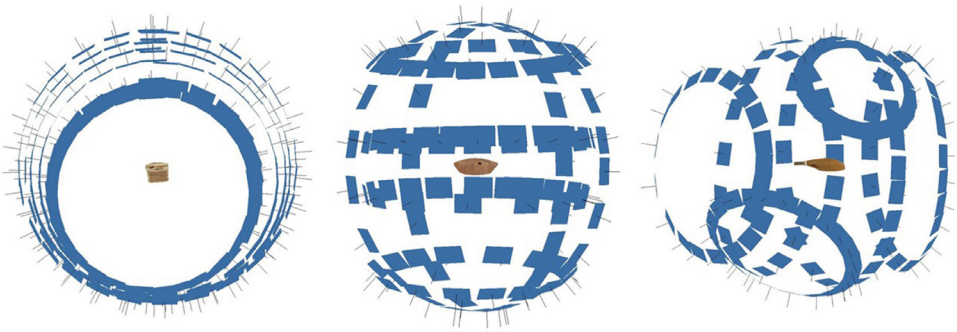

Fig. 6.6 Esempio di tre diversi assetti di acquisizione (da sinistra a destra, *frullo*, flauto globulare e uno dei due *quaglieri*); la geometria di acquisizione varia a seconda della geometria dell'oggetto ed è pianificata per ottenere il maggior ricoprimento possibile ottimizzando il numero di prese fotogrammetriche.

In seguito all'allineamento delle immagini avviene il processo di densificazione grazie ad algoritmi di tipo image-matching (Remondino et al. 2014). Al termine di questa operazione si ottiene una nuvola di punti densa e colorata (per ogni punto si conoscono le coordinate xyz e il colore); la nuvola è il punto di partenza per quanto riguarda la creazione di un modello poligonale ad altissima risoluzione con texture fotografica. Questi modelli forniscono quindi due tipi diversi di

informazione, quella di tipo geometrico legata alla morfologia dell'oggetto (fornita dal modello stesso che, come già detto, è caratterizzato da un elevato livello di dettaglio e ben si presta a descriverne le caratteristiche puramente geometriche) e quella radiometrica (in grado di fornire preziose informazioni sulla consistenza materica dell'oggetto).

Nella Fig. 6.7 sono riassunti i vari passaggi sopra descritti che consentono di giungere alla generazione del modello poligonale.

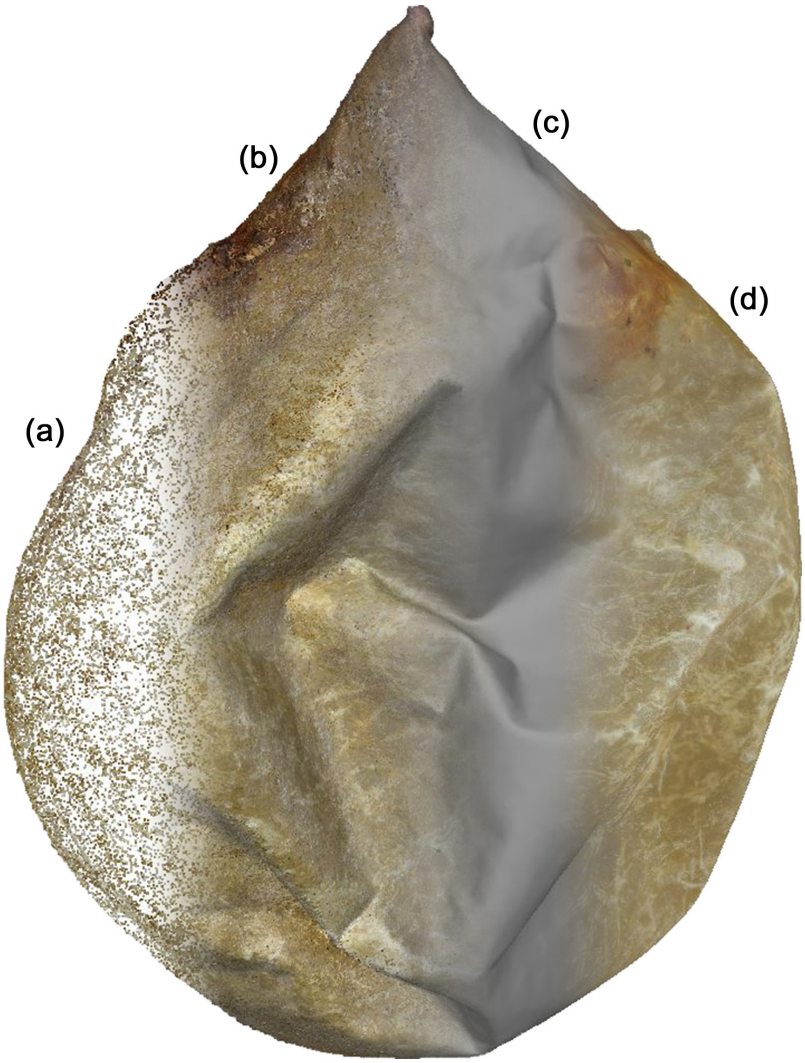

Fig. 6.7 Modello della vescica di maiale componente del *torototela*. Da sinistra verso destra è possibile osservare i quattro passaggi attraverso le quali è possibile generare un modello poligonale texturizzato: (a) tie points, (b) nuvola densa, (c) modello poligonale, (d) modello poligonale texturizzato.

Le tempistiche necessarie ad eseguire le operazioni descritte nei paragrafi precedenti (dalla fase di acquisizione a quella di elaborazione dei dati) dipendono da una serie di fattori quali, per esempio:

- il numero di immagini acquisite. Il numero di immagini acquisite per ciascuno strumento dipende dalla dimensione e dalla morfologia: naturalmente strumenti di dimensioni maggiori, oppure connotati da una complessità geometrica maggiore, necessiteranno di un maggior numero di fotogrammi per poterne ricostruire la forma e di conseguenza un tempo maggiore sia per quanto riguarda la fase di acquisizione che per quella di elaborazione;
- la presenza di parti mobili. Un altro aspetto che influenza le tempistiche è la presenza di parti mobili (come nel caso dei già citati manici della tabella) o di elementi non rigidi che, nei vari spostamenti necessari ad eseguire le acquisizioni, potrebbero cambiare di assetto (è il caso delle parti inferiori dei *quaglieri*, composte da cuoio). In questi casi è necessario prendere determinati accorgimenti durante la fase di acquisizione (per esempio, nel caso della *tabella* i manici sono stati immobilizzati grazie ad un filo di nylon);
- difficoltà nell'estrazione dei punti omologhi dovuta al tipo di materiale di cui è composto l'oggetto. Un'altra problematica da tenere in considerazione è la difficoltà nell'estrazione dei punti omologhi in quelle aree dove il materiale dello strumento è omogeneo (e dunque dove i punti omologhi non sono particolarmente distinguibili, con una conseguente difficoltà nella loro individuazione automatica), o dove sono presenti elementi riflettenti.

Nella Tabella 6.2 è possibile osservare alcuni dati relativi ai tempi delle fasi di acquisizione ed elaborazione.

Strumento	Immagini	Tempi di acquisizione	Tempi di elaborazione	N° punti nuvola
Torototela (vescica)	111	≈ 40 minuti	≈ 2 ore e 30 minuti	10.040.470
Torototela (pala)	289	≈ 1 ora e 30 minuti	14 ore	45.417.850
Flauto globulare	125	≈ 25 minuti	9 ore	61.056.595
Rombo	192	≈ 45 minuti	16 ore e 30 minuti	85.096.088
Frullo (parte centrale)	163	≈ 30 minuti	3 ore	3.691.453
Frullo (manico #1)	79	≈ 15 minuti	3 ore	9.806.852
Frullo (manico #2)	65	≈ 15 minuti	2 ore e 30 minuti	9.652.885
Cusa #1 (parte superiore)	108	≈ 20 minuti	2 ore	10.883.486
Cusa #1 (parte inferiore)	104	≈ 20 minuti	2 ore	12.081.531

Cusa #2 (parte superiore)	79	≈ 15 minuti	1 ora e 30 minuti	10.230.628
Cusa #2 (parte inferiore)	78	≈ 15 minuti	1 ore e 30 minuti	11.240.092
Quagliere #1	131	≈ 25 minuti	2 ore e 30 minuti	7.024.791
Quagliere #2	214	≈ 45 minuti	8 ore e 30 minuti	10.160.704
Tabella	333	≈ 1 ora e 45 minuti	9 ore	16.176.857

Tabella 6.2 Alcuni dettagli relativi al numero di fotogrammi acquisiti per ciascuno strumento, tempi di acquisizione e tempi di elaborazione. Per quanto riguarda l'acquisizione sono stati considerati (oltre alla presa vera e propria) anche i tempi necessari ai vari spostamenti e variazioni di assetto (sia per quel che riguarda gli strumenti, sia per il sistema di illuminazione artificiale). Per i tempi di elaborazione sono state considerate le seguenti operazioni: applicazione delle maschere; allineamento delle immagini e generazione dei tie points; impostazione della scala tramite le righe graduate; generazione della nuvola densa; generazione della mesh 3D; generazione della texture. La workstation che è stata utilizzata nel corso della sperimentazione per eseguire le operazioni appena illustrate ha le seguenti specifiche: CPU Intel(R) Core (TM) i7-6800K, 3.40 GHz, RAM 128 GB, NVIDIA Quadro M2000.

6.6 Modellazione 3D

Lo step successivo del workflow seguito durante questa esperienza di ricerca è stato la generazione di un primo modello digitale (con procedura semiautomatica) attraverso la realizzazione di una mesh tridimensionale, ovvero una superficie continua formata da poligoni bidimensionali (nel caso illustrato, triangoli) che approssima una superficie 3D reale (Campomanes-Álvarez et al. 2012). La base da cui partire per creare questi modelli è quindi la nuvola densa generata al termine del processo fotogrammetrico.

In alcuni casi, prima di procedere con la generazione automatica del modello 3D, è stato necessario filtrare la nuvola di partenza al fine di eliminare il cosiddetto 'rumore' e gli outliers (Ning et al. 2018), ovvero quell'insieme di punti generati in maniera anomala (per diverse ragioni, tra cui occlusioni, aree sulla superficie dell'oggetto da rilevare dove l'illuminazione è scarsa, dove vi è presenza di elementi riflettenti o dove il riconoscimento dei punti omologhi è ostacolato dall'omogeneità del materiale da cui è composto) che non contribuiscono alla descrizione geometrica e che potrebbero causare una serie di errori topologici durante la successiva fase di modellazione 3D dell'oggetto ripreso.

Al termine di questa operazione si procede con la realizzazione del modello; le mesh così ottenute possono essere dunque esportate ed editate al fine di eliminare

alcuni errori topologici (spesso dovuti all'automatismo della procedura). Tra le problematiche più frequenti si possono riportare:

- triangoli sovrapposti e/o intersecantesi (Fig. 6.8a);
- eccessiva rugosità della superficie (Fig. 6.8b e 6.8c);
- lacune (ovvero aree del modello che non è stato possibile ricostruire a causa di mancanza di dati o rumorosità elevata in corrispondenza di quello specifico punto) (Fig. 6.8d e 6.8e).

All'interno della ricerca, durante la fase di editing, è stato utilizzato il software commerciale `3DReshaper` (Hexagon), specifico per la gestione di modelli 3D reality-based.

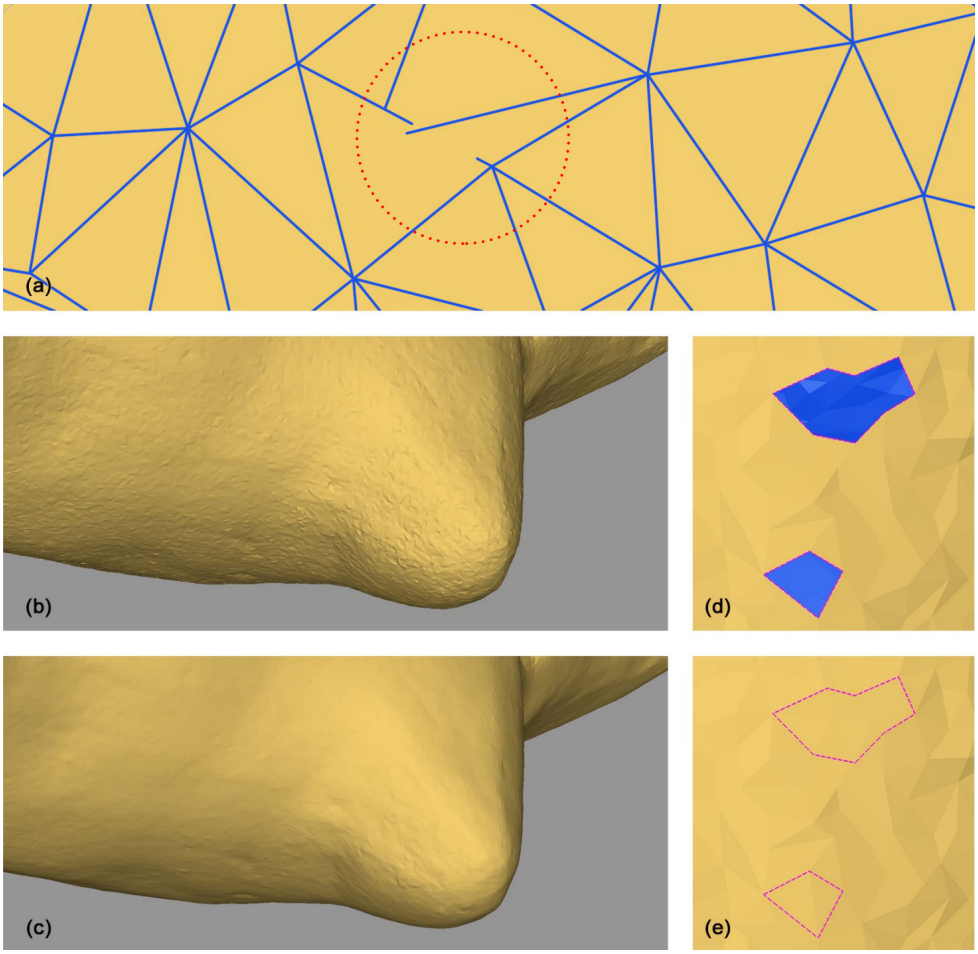

Fig. 6.8 (a) Esempio di triangoli intersecantesi. (b) Mesh con elevata rugosità e (c) Mesh al termine del processo di lisciatura. (d) Esempio di lacuna sulla superficie della mesh ed (e) Esempio di lacune colmate.

Naturalmente l'obiettivo finale è l'ottenimento di un modello 3D il più completo possibile e privo di lacune. Pertanto, in alcuni casi, durante la modellazione delle mesh, a causa della morfologia di alcuni strumenti digitalizzati, il modello finale è stato generato a partire dall'unione di più nuvole di punti dello stesso oggetto, processate in seguito ad acquisizioni avvenute separatamente e da diversi punti di vista. È il caso della realizzazione del modello 3D della *tabella* utilizzata per i riti della Settimana Santa che, a causa dei manici metallici mobili, ha richiesto particolari accorgimenti, descritti di seguito. In questo specifico caso, al fine di ottenere una mesh poligonale più completa (includendo quindi entrambi i lati dei manici metallici), la strategia è stata la seguente:

- sono state eseguite due distinte acquisizioni durante le quali i manici sono stati posizionati in entrambi gli assetti possibili, ovvero ruotati prima in un verso, poi in quello opposto, in modo da acquisire immagini di tutti e due i lati degli elementi metallici. Per fare ciò è stato necessario immobilizzare le parti mobili con un filo di nylon molto sottile al fine di evitare movimenti indesiderati che avrebbero causato diverse problematiche durante l'elaborazione dei dati. Infatti, per fare in modo che l'estrazione automatica dei punti omologhi vada a buon fine, occorre che l'oggetto di cui si stanno acquisendo dei fotogrammi rimanga immobile senza variazioni della geometria durante la presa;
- i due dataset sono stati elaborati in maniere indipendente al fine di generare una nuvola di punti per entrambi i lati di ciascun manico: in questo modo la geometria di questi elementi è stata ricostruita completamente, seppur separatamente, con meno lacune possibili;
- successivamente le nuvole dense sono state segmentate, ovvero suddivise in parti, al fine di isolare la porzione di punti relativa a tutti e due i manici (Fig. 6.9a);
- le due nuvole sono state unite tra loro in un'unica nuvola complessiva attraverso una procedura semiautomatica che, a partire dalle caratteristiche morfologiche in comune (riconosciute automaticamente), permette di identificare la posizione relativa dei due segmenti. In questo modo le aree di sovrapposizione corrispondono reciprocamente nel miglior modo possibile, minimizzando le discrepanze tra una nuvola e l'altra (Holz et al. 2015); pertanto, in questo caso, siccome le parti laterali dei manici presentavano un'adeguata sovrapposizione, è stato possibile eseguire questo tipo di procedura, ricreandone la geometria completa (Fig. 6.9b).

Come si può osservare nella Fig. 6.9c, il risultato finale è il modello completo da entrambi i lati di ciascun manico. In termini generici, come si può evincere da questo esempio, a fronte di un workflow operativo comune, è possibile che a seconda

delle caratteristiche intrinseche di ciascun oggetto vadano progettate azioni integrative specifiche.

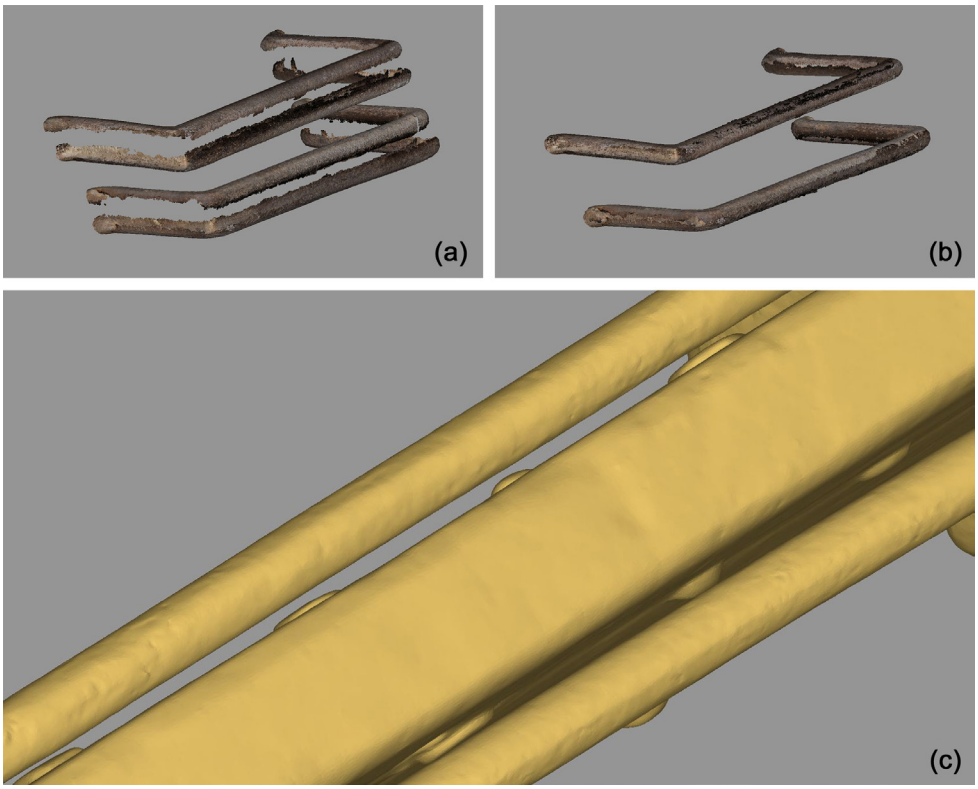

Fig. 6.9 In alto a sinistra (a): nuvola densa segmentata (elementi metallici della tabella). In alto a destra (b): parte superiore e parte inferiore delle nuvole dei manici registrate tra loro. In basso (c): zoom della mesh complessiva della tabella. Grazie a questo procedimento è stato possibile modellare anche la parte inferiore dei manici metallici a contatto con la parte lignea dello strumento.

L'ultimo aspetto delineato per quanto riguarda la modellazione consiste nella texturizzazione del modello, in modo tale da fornire informazioni anche dal punto di vista radiometrico (Dostal e Yamafune 2018). A partire dai fotogrammi utilizzati durante il processo fotogrammetrico è stato quindi generato un mosaico di immagini ad alta risoluzione (Fig. 6.10). Questo mosaico viene proiettato sulla superficie delle mesh, al termine delle procedure di editing precedentemente illustrate. Nella Fig. 6.11 è possibile vedere i modelli finali dei nove strumenti oggetto di questa ricerca in entrambe le versioni (visualizzati con e senza l'applicazione della texture fotografica).

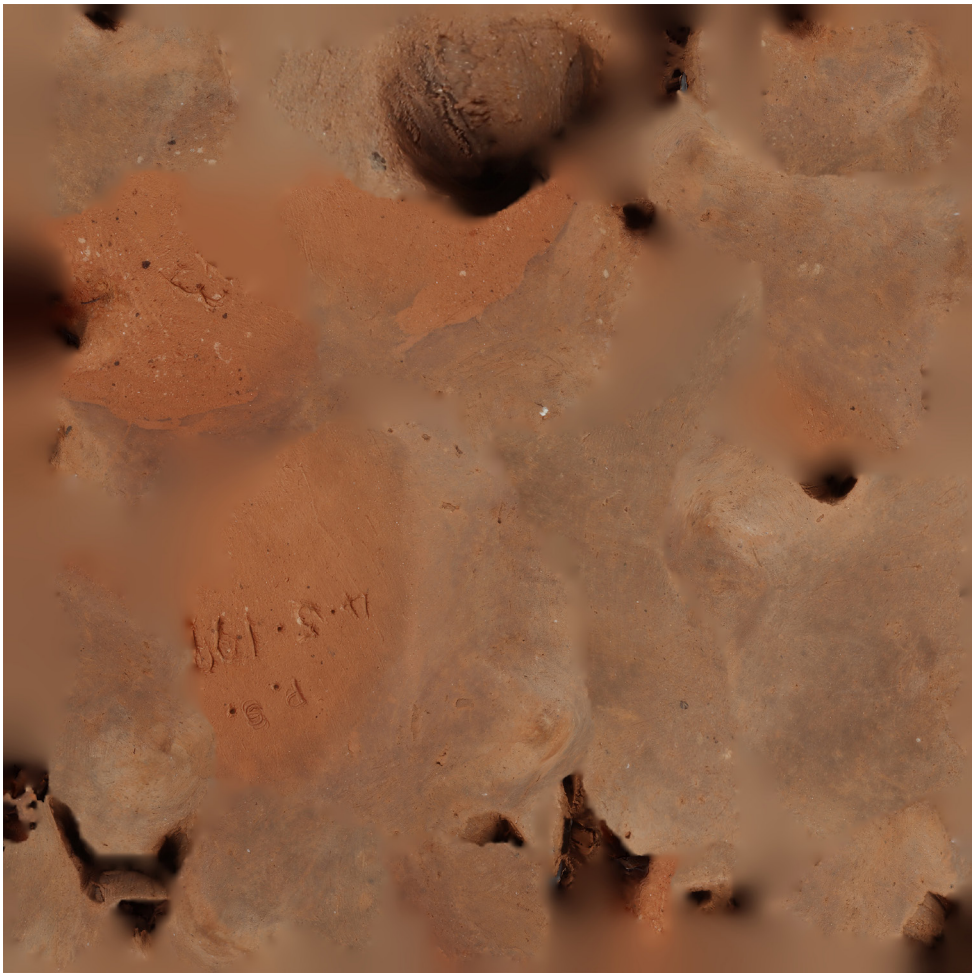

Fig. 6.10 Texture del flauto globulare.

Fig. 6.11 Mesh finali al termine dei processi di editing e di texturizzazione.

Nel corso di questa esperienza di ricerca, gli strumenti selezionati sono stati acquisiti anche dal Laboratorio Arvedi di Diagnostica non Invasiva di Cremona (Università di Pavia) che ha previsto l'utilizzo di un laser scanner triangolatore con un'accuratezza nominale dichiarata di 30 μm che esegue acquisizioni in scala 1:1 (Patrucco et al. 2018). Al fine di verificare l'accuratezza metrica del prodotto ottenuto seguendo le procedure descritte nei paragrafi precedenti, è stato eseguito un confronto tra le due mesh per quantificare le discrepanze osservabili tra le superfici dei due differenti modelli. Ovviamente questa analisi è stata possibile solo per quanto concerne quegli strumenti della collezione dotati di struttura rigida e privi di parti mobili, in quanto durante le due diverse acquisizioni esiste un'elevata probabilità che l'assetto degli strumenti fosse diverso.

A titolo esemplificativo, ci si è concentrati sul corpo centrale del frullo, dal momento che, considerando la sua struttura rigida, le mesh generate utilizzando le due diverse tecniche risultano confrontabili tra di loro.

Come si può osservare nella Fig. 6.12, dove è rappresentato il confronto dei due modelli digitali del frullo, le discrepanze rilevate sono comprese tra ± 1 mm.

Per gli scopi prefissati all'inizio di questa ricerca è possibile considerare accettabili tali valori residui.

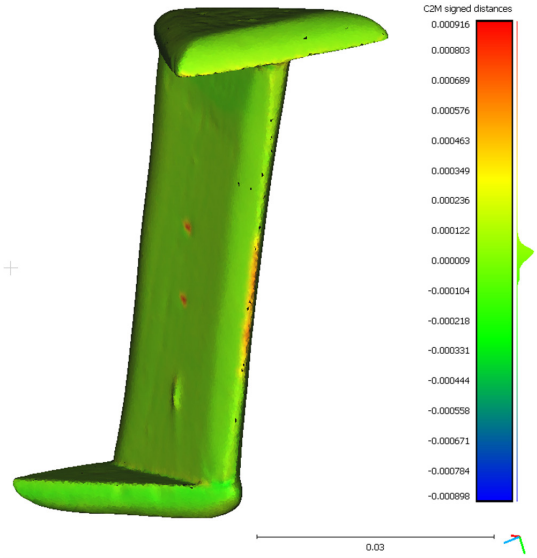

Fig. 6.12 Discrepanze riscontrate tra il modello fotogrammetrico e quello acquisito con laser scanner. I valori osservabili rientrano in un range che corrisponde approssimativamente a ± 1 millimetro.

6.7 Conclusioni e prospettive future

Al termine delle attività di ricerca legate alla modellazione tridimensionale è stato possibile arrivare ad alcune considerazioni riguardanti i prodotti finali ottenuti, ovvero modelli 3D con un elevato livello di dettaglio, dotate di una texture ad alta risoluzione. Come è stato possibile osservare nei paragrafi precedenti, i tempi di acquisizione e di elaborazione dei dati sono relativamente rapidi; inoltre il workflow che è stato seguito è facilmente replicabile e flessibile per quanto concerne la metodologia, la strumentazione necessaria e gli spazi. Un altro aspetto interessante su cui soffermarsi riguarda la sostenibilità di questo tipo di approccio, che non prevede il contatto diretto con i beni museali e che quindi è applicabile

anche a quegli oggetti che normalmente a causa della propria fragilità non sarebbero maneggiabili; tutte caratteristiche da tenere in considerazione per un'eventuale standardizzazione delle operazioni necessarie alla digitalizzazione del patrimonio mobile.

Per quanto riguarda il prodotto finale, ovvero le repliche digitali, la versatilità di questa tipologia di modelli è indubbia e ben documentata in letteratura; tali modelli se adeguatamente gestiti e ottimizzati possono essere utilizzati in svariati modi da parte di diverse tipologie di utenti (che in numero sempre maggiore hanno accesso a queste risorse, grazie alla diffusione crescente delle moderne tecnologie digitali che aumentano in maniera esponenziale il numero di possibili fruitori).

Come è già stato accennato nei paragrafi precedenti, oltre a essere alla base di un'ulteriore attività di ricerca che si sta sviluppando, nonché studi e analisi da parte di ricercatori afferenti a svariate discipline, oggigiorno modelli di questo genere possono essere visualizzati con l'ausilio di visori 3D. Possono inoltre essere ottimizzati per quanto riguarda esperienze di realtà virtuale o aumentata (in tal senso si trovano attualmente in commercio numerosi prodotti disponibili a svariate fasce di prezzo, compresi visori tridimensionali dal costo di poche decine di euro che funzionano associati a semplici smartphone). Queste tecnologie offrono la possibilità di collegare ai modelli 3D informazioni alfanumeriche in modo da affiancare al dato geometrico e radiometrico (fornito dalla texture), anche informazioni di qualsiasi altro tipo (storico, artistico, gestionale e molti altri).

Infine, è possibile 'materializzare' questi modelli digitali (ovvero passare dalla replica virtuale alla replica fisica e tangibile). Tale possibilità è offerta dalle moderne tecnologie sviluppate nell'ambito delle stampanti 3D (Balletti e Ballarin 2019; Balletti et al. 2017; Adami et al. 2015).

Queste nuove tecniche, molto utilizzate in ambito industriale e produttivo, vantano svariati impieghi anche per quanto riguarda la documentazione e la valorizzazione dei Beni Culturali e possono essere efficacemente applicate per la produzione di oggetti appartenenti al patrimonio mobile in scala 1:1 (Fig. 6.14). Esistono diverse tipologie di stampanti 3D, sottrattive o additive, a seconda che il materiale venga rimosso o depositato, e sono basate su diversi tipi di tecnologie (tra cui estrusione di polimeri plastici o deposito di polveri); nella ricerca è stato sperimentato l'utilizzo di una stampante di tipo **FDM** (Fused Deposition Model), dotata di un estrusore che, portando a temperatura di fusione un polimero plastico (nel caso osservato si tratta di PLA/acido polilattico, una plastica ecologica derivata da prodotti vegetali, biodegradabile in seguito a idrolisi, e che fonde a temperature relativamente basse), deposita degli strati sovrapposti di materiale ricostruendo in questo modo la geometria del modello (Fig. 6.13 e Fig. 6.14).

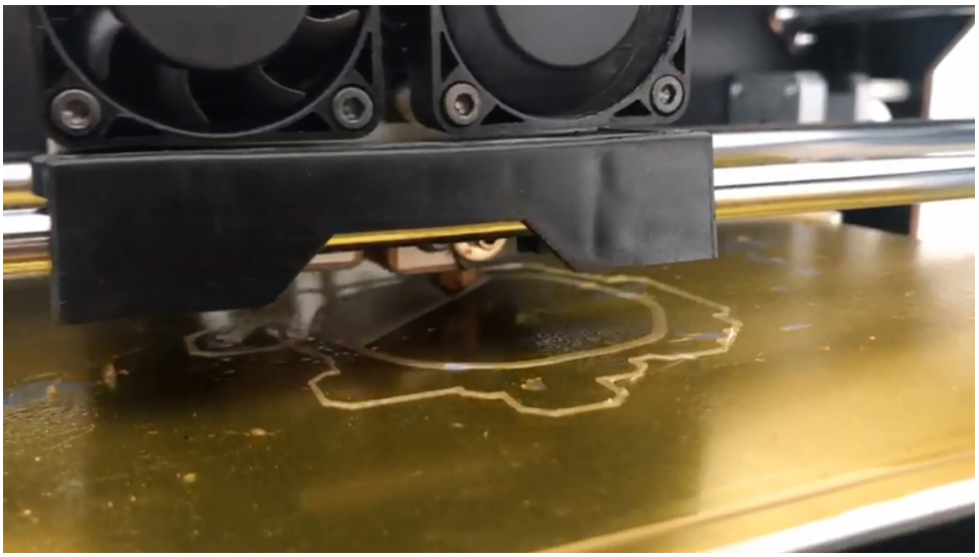

Fig. 6.13 Fasi preliminari del processo di stampa tridimensionale.

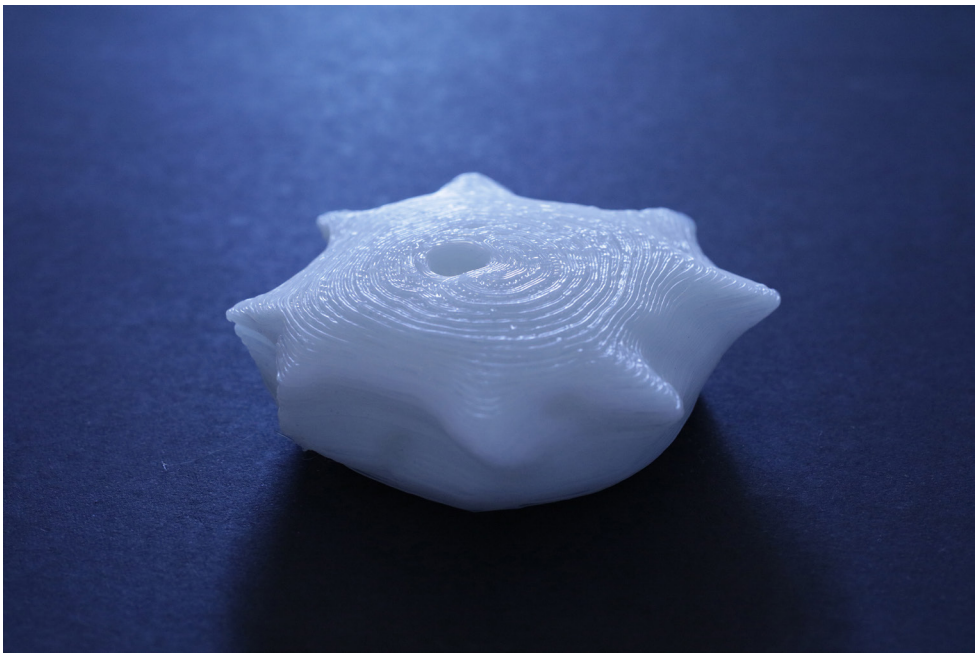

Fig. 6.14 Stampa 3D del flauto globulare in scala 1:1 realizzata in PLA (acido polilattico).

Infine, un ultimo aspetto di indubbia importanza e attualità riguarda la divulgazione e la condivisione online; negli ultimi anni numerosi ricercatori attivi nei campi della Geomatica e della modellazione 3D hanno indirizzato la propria ricerca sulla

possibilità di creare archivi digitali e database online per condividere modelli legati ai Beni Culturali, permettendone l'accesso e la visualizzazione a un pubblico sempre più vasto (Koller et al. 2009; Minto e Remondino 2014). Si tratta di una tematica estremamente attuale e un contributo importante in tal senso giunge dai visualizzatori online, che rappresentano uno strumento valido al fine di consentire la divulgazione e la condivisione di reperti storici e artistici che spesso risultano di difficile accessibilità. Negli ultimi anni sono state sviluppate numerose soluzioni a riguardo, molte delle quali di tipo open-source, al fine di garantire la diffusione di questi contenuti.

All'interno del lavoro presentato, un modello 3D (quello del rombo) è stato ottimizzato per poter essere visualizzato online e interrogato virtualmente (Fig. 6.15a); il visualizzatore online utilizzato nel caso di questa ricerca è chiamato 3DHOP (Potenziani et al. 2015).

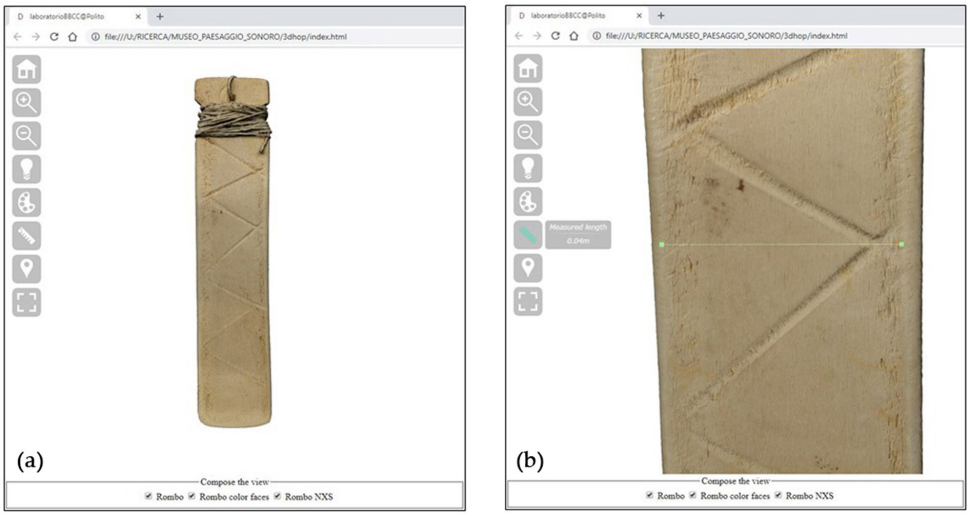

Fig. 6.15 (a) Modello digitale del rombo implementato nel visualizzatore online open source 3DHOP. (b) Esempio di misura effettuata dall'utente direttamente sul modello digitale.

Questa piattaforma fornisce una serie di strumenti che permettono non solo la visualizzazione di modelli tridimensionali per fini di divulgazione, ma anche la possibilità di personalizzare la modalità attraverso cui questi oggetti vengono condivisi e fruiti grazie ad una libreria gratuita di funzioni. La visualizzazione del modello può essere dunque modificata a seconda delle esigenze dell'utente. Tra le altre possibili opzioni, è possibile modificare il colore della mesh; l'illuminazione virtuale può essere gestita direttamente all'interno della piattaforma; l'oggetto digitale può essere visualizzato con o senza texture a seconda che ci si stia concentrando sulla consistenza materica dello strumento musicale considerato (e in questo caso

la texture, come si è già visto nei paragrafi precedenti, rappresenta uno strumento validissimo) oppure sulle sue caratteristiche geometriche e morfologiche (in questo secondo caso la texture può talvolta rappresentare una distrazione).

Il modello può inoltre essere interrogato direttamente dall'utente (per esempio possono essere eseguite delle misure per estrarre delle informazioni di tipo metrico, come è possibile osservare nella Fig. 6.15b); è inoltre possibile associare dei dati di diverso genere e tipo (alfanumerico, multimediale, ecc.) ai modelli virtuali, in modo da condividere qualsiasi genere di informazione connessa all'oggetto analizzato.

In generale, come si è potuto constatare dai risultati ottenuti, le potenzialità offerte da queste tecnologie sono molteplici, e consentono una fruizione di questi beni mobili che non sostituisce quella tradizionale (che avviene presso il luogo dove queste preziose testimonianze vengono custodite ed esibite e che prevede un rapporto diretto e insostituibile tra il visitatore e l'oggetto custodito), ma ne è complementare, consentendo nuove tipologie di diffusione ed esperienze virtuali coinvolgenti e interattive. Inoltre questi modelli contribuiscono significativamente a fornire una documentazione completa e tridimensionale (impensabile fino a pochi anni fa) che, grazie anche alle informazioni che è possibile associare ai modelli stessi, può fornire un valido aiuto alla gestione dei reperti rappresentati (testimonianza significativa della nostra storia) e aumentare la consapevolezza e la resilienza di questi beni.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare tutte le persone coinvolte nel progetto SAMIC; inoltre desiderano manifestare la propria gratitudine nei confronti dei colleghi del Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (G4CH Lab) del Politecnico di Torino per il costante supporto, in particolare Lorenzo Teppati Losè e Davide Einaudi per l'ottimizzazione del modello digitale e la realizzazione della stampa 3D del flauto globulare.

6.9 Testi citati e bibliografia

Adami, Andrea, Caterina Balletti, Francesco Fassi, Luigi Fregonese, Francesco Guerra, Laura Taffurelli e Paolo Vernier

2015 *The Bust of Francesco II Gonzaga: from Digital Documentation to 3D Printing*, «ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II5/W3, pp. 9-15, <**DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W3-9-2015**>.

Aicardi, Irene, Filiberto Chiabrando, Andrea Lingua e Francesca Noardo
2018 *Recent Trends in Cultural Heritage 3D Survey: The Photogrammetric Computer Vision Approach*, «Journal of Cultural Heritage», XXXII, 2018, pp. 257-266, <**DOI: 10.1016/j.culher.2017.11.006**>.

Balletti, Caterina, Martina Ballarin e Francesco Guerra
2017 *3D Printing: State of the Art and Future Perspectives*, «Journal of Cultural Heritage», XXVI, pp. 172-182, <**DOI: 10.1016/j.culher.2017.02.010**>.

Balletti, Caterina e Martina Ballarin
2019 *An Application of Integrated 3D Technologies for Replicas in Cultural Heritage*, «International Journal of Geo-Information», VIII, 6, <**DOI: 10.3390/ijgi8060285**>.

Barazzetti, Luigi, Fabio Remondino e Marco Scaioni
2010 *Automation in 3D reconstruction: results on different kinds of close-range blocks*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XXXVIII, Part 5, pp. 55-61.

Bertolini Cestari, Clara, Filiberto Chiabrando, Stefano Invernizzi, Tanja Marzi e Antonia Spanò
2013 *Terrestrial Laser Scanning and Settled Techniques: a Support do Detect Pathologies and Safety Conditions of Timber Structures*, «Avanced Materials Research», DCCLXXVIII, pp. 350-357, <**DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.350**>.

Chiabrando, Filiberto, Elisabetta Donadio e Fulvio Rinaudo
2015 *SfM for ortophoto generation: a winning approach for cultural heritage knowledge*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL5/W7, pp. 91-98, <**DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-91-2015**>.

Campomanes-Álvarez, Blanca Rosario, Sergio Damas e Óscar Cordón
2012 *Mesh simplification for 3D modelling using evolutionary multi-objective optimization*, in *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, IEEE Xplore, San Francisco, pp. 1-8, <**DOI: 10.1109/CEC.2012.6252887**>.

Donadio, Elisabetta, Luigi Sambuelli, Antonia Spanò, Daniela Picchi
2018 *Three-Dimensional (3D) Modelling and Optimization for Multipurpose Analysis and Representation of Ancient Statues*, in Diego Gonzalez-Aguilera (a cura di), *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*, MDPI, Basel, pp. 95-118, <**DOI: 10.3390/books978-3-03842-685-1**>.

Dostal, Christopher e Kotaro Yamafune
2018 *Photogrammetric texture mapping: A method for increasing the Fidelity of 3D models of cultural heritage materials*, «Journal of Archaeological Science: Reports», XVIII, pp. 430-436, <**DOI: 10.1016/j.jasrep.2018.01.024**>.

Elkhrachy, Ismail
2019 *Modeling and Visualization of Three Dimensional Objects Using Low-Cost Terrestrial Photogrammetry*, «International Journal of Architectural Heritage», pp. 1-12, <**DOI: 10.1080/15583058.2019.1613454**>.

Gajski, Dubravko, Ana Solter e Mateo Gašparović
2016 *Applications of Macro Photogrammetry in Archaelogy*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLI-B5, pp. 263-266, <**DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-263-2016**>.

Ghirardini, Cristina, Guido Raschieri, Ilario Meandri e Giorgio Bevilacqua
2016 *Old and New Questions on Soundscape, Musical Heritage and Musical Instruments. The Museo del Paesaggio Sonoro of Riva presso Chieri*, «Audiosfera. Koncepcje – Badania – Praktyki», I, 3, pp. 7-40 [online] <**http://pracownia.audiosfery.uni.wroc.pl/wp-content/uploads/2017/03/Audiosfera-13_2016_Cristina-Ghirardini-et-al.pdf**> (ultimo accesso: novembre 2019).

Gomarasca, Mario Angelo
2009 *Basics of Geomatics*, Springer, Berlino.

Gonizzi Barsanti, Sara e Gabriele Guidi
2013 *3D digitization of museum content within the 3DIcons project*, «ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W1, pp. 151-156, <**DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-151-2013**>.

Guerra, Maria Grazia, Chiara Volpone, Luigi Maria Galantucci e Gianluca Percoco
2018 *Photogrammetric measurements of 3D printed microfluided devices*, «Additive Manufacturing», XXI, pp. 53-62, <**DOI: 10.1016/j.addma.2018.02.013**>.

Guidi, Gabriele, Umair Shafqat Malik, Bernard Frischer, Cristiana Barandoni e Fabrizio Paolucci
2017 *The Indiana University-Uffizi project: Metrologica! challenges and workflow for massive 3D digitization of sculptures*, in *Virtual System & Multimedia (VSMM)* (Proceedings of the 23rd International Conference), pp. 1-8, IEEE Xplore, San Francisco, <**DOI: 10.1109/VSMM.2017.8346268**>.

Holz, Dirk, Alexandru E. Ichim, Federico Tombari, Radu B. Rusu e Sven Behnke
2015 *Registration with the Point Cloud Library: A Modular Framework for Aligning in 3-D*, «IEEE Robotics & Automation Magazine», II, 4, pp. 110-125, <**DOI: 10.1109/MRA.2015.2432331**>.

Howland, Matthew D., Ian W.N. Jones, Mohammad Najjar e Thomas E. Levy
2018 *Quantifying the effects of erosion on archaeological sites with low-altitude aerial photography, structure from motion, and GIS: A case study from southern Jordan*, «Journal of Archaeological Science», XC, pp. 62-70, <**DOI: 10.1016/j.jas.2017.12.008**>.

Kersten, Thomas P. e Maren Lindstaedt
2012 *Potential of automatic 3D object reconstruction from multiple images for applications in architecture, cultural heritage and archaeology*, «International Journal of Heritage in the Digital Era», I, 3, pp. 399-420, <**DOI: 10.1260/2047-4970.1.3.399**>.

Kersten, Thomas P., Daniel Omelanowsky e Maren Lindstaedt
2016 *Investigations of Low-cost Systems for 3D Reconstruction of Small Objects*, in Marinos Ioannides et al. (a cura di), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection* (Proceedings of the EuroMed 2016), Springer, Cham, Springer, Cham, pp. 521-532, <**DOI: 10.1007/978-3-319-48496-9_41**>.

Koller, Davi, Bernard Frischer e Greg Humphreys
2009 *Research challenges for digital archives of 3D cultural heritage models*, «Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH)», II, 3, 2009, <**DOI: 10.1145/1658346.1658347**>.

Kraus, Karl
1994 *Fotogrammetria. Teoria e Applicazioni*, I, Libreria Universitaria Levrotto & Bella, Torino.

Luhmann, Thomas, Stuart Robson, Stephen Kyle e Jan Boehem
2013 *Close-range Photogrammetry and 3D Imaging*, Walter de Gruyter, Berlino.

Lo Turco, Massimiliano, Paolo Piumatti, Fulvio Rinaudo, Rosa Tamborrino e Diego González-Aguilera
2018 *B.A.C.K. TO T.H.E. F.U.T.U.RE. – BIM Acquisition as Cultural Key TO Transfer Heritage of ancient Egypt for many Uses To many Users Replayed*, in Stefano Bertocci (a cura di), *Conference Proceedings of Symposium of representation scientific area for the development of multidisciplinary international programs*, DIDA Press, Firenze, pp. 107-110.

Minto, Simone e Fabio Remondino
2014 *Online access and sharing of reality-based 3D models*. «SCIRES-IT-SCIentific RESearch and Information Technology», IV, 2, pp. 17-28, <**DOI: 10.2423/i22394303v4n2p17**>.

Ning, Xiaojuan, Fan Li, Ge Tian e Yinghui Wang
2018 *An efficient outlier removal method for scattered point cloud data*, «PloS one», XIII, 8, e0201280, <**DOI: 10.1371/journal.pone.0201280**>.

Patrucco, Giacomo, Filiberto Chiabrando, Piercarlo Dondi e Marco Malagodi
2018 *Image and Range-Based 3D Acquisition and Modeling of Popular Musical Instruments*, «Proceedings from the Document Academy», V, 2, <**DOI: 10.35492/docam/5/2/9**>.

Potenziani, Marco, Marco Callieri, Matteo Dellepiane, Massimiliano Corsini, Federico Ponchio e Roberto Scopigno
2015 *3DHOP: 3D heritage online presenter*, «Computer & Graphics», LII, pp. 129-141, <**DOI: 10.1016/j.cag.2015.07.001**>.

Povroznik, Nadezhda
2018 *3D Models of Ancient Greek Collection of the Perm University History Museum*, in Marinos Ioannides et al. (eds.), *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection* (Proceedings of the EuroMed 2018), Springer, Cham, pp. 144-154, <**DOI: 10.1007/978-3-319-75826-8_12**>.

Remondino, Fabio
2011 *Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning*, «Remote Sensing», III, 6, pp. 1104-1138, <**DOI: 10.3390/rs3061104**>.

Remondino, Fabio, Maria Grazia Spera, Erica Nocerino, Fabio Menna e Francesco Nex
2014 *State of the art in high density image matching*, «The Photogrammetric Record», XXIX, 146, pp. 144-166, <**DOI: 10.1111/phor.12063**>.

Samaan, Mariam, Raphaële Héno e Marc Pierrot-Deseilligny
2013 *Close-range photogrammetric tools for small 3D archeological objects*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XL-5/W2, pp. 549-553, <**DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-549-2013**>.

Sammartano, Giulia e Antonia Spanò
2017 *High scale 3D modelling and orthophoto of curved masonries for a multipurpose representation, analysis and assessment*, «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-5/W1, pp. 245.252, <**DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W1-245-2017**>.

Unesco
1979 *Recommendation for the protection of movable cultural property*, «Records of the General Conference», 20th session, I: Resolutions, Unesco, Parigi.

Westoby, Matt, James Brasington, Neil F. Glasser, Michael J. Hambrey e John M. Reynolds
2012 *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*, «Geomorphology», CLXXIX, pp. 300-314, <**DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021**>.