



#### Anna Maria Manfredini

Ingegnere edile, dal 2008 è ricercatrice presso la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Bologna. Dal 1997 ha insegnato presso la Facoltà del Design del Politecnico di Milano e la Facoltà di Ingegneria di Bologna. Si interessa di tecnologie multimediali per la comunicazione dell'architettura e dei Beni Culturali.



#### Simone Garagnani

Ingegnere, Ph.D. in Ingegneria Edilizia e Territoriale. Attualmente svolge ricerca sulla modellazione digitale in architettura, il *Building Information Modeling* e l'acquisizione di informazioni spaziali attraverso metodi *range-based*, tematiche per le quali ha curato diverse pubblicazioni scientifiche. Lavora presso il D.A.P.T. dell'Università di Bologna.

## Fruizione digitale di reperti archeologici. L'esperienza del Museo Civico Archeologico di Bologna *Digital fruition of archaeological finds. The experience at the Archaeological Museum of Bologna*

Il contributo presenta una serie di indagini avviate nell'ambito di una collaborazione tra il Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale DAPT dell'Università degli Studi di Bologna e il Museo Civico Archeologico di Bologna volte alla messa a punto di procedure per il rilievo e per la fruizione digitale di reperti archeologici. In particolare, il contributo illustra come le possibilità di fruizione del patrimonio storico-artistico possano essere ampliate grazie all'utilizzo di tecniche digitali in grado di innescare meccanismi percettivi multisensoriali e di coinvolgere attivamente gli utenti nella esplorazione dei contenuti presentati attraverso le collezioni. Visualizzazioni immersive, realtà aumentata e rapporto tattile, oltre che visivo, con i reperti, contribuiscono a stabilire un canale comunicativo immediato e più vicino a utenti che utilizzano quotidianamente questi strumenti di comunicazione e di accesso alle informazioni.

*This contribution presents a series of investigations undertaken thanks to the collaboration between the Department of Architecture and Territorial Planning of the University of Bologna and the Archaeological Museum of Bologna, aimed at finding a procedure for the 3d digital survey and exploration of archaeological finds. In particular, this paper shows how users can benefit from the use of digital technologies for the fruition of historical-artistic heritage. As a matter of fact, digital communication tools stimulate multisensory perception mechanisms and therefore allow to actively involve users in the exploration of contents presented through collections. Immersive visualizations, augmented reality and both tactile and visual exploration of findings can ease the establishment of a more immediate and direct communication channel with users that generally communicate and access information using digital technologies and mediums.*

## 1. INTRODUZIONE E OBIETTIVI

Negli ultimi vent'anni i progressi conseguiti nel campo delle tecnologie digitali hanno aperto nuovi scenari e suggerito possibilità di applicazioni in ambiti molto differenti fra loro.

Nel settore dei Beni Culturali, ad esempio, la diffusione e il continuo perfezionamento di strumenti per l'acquisizione e la restituzione di dati tridimensionali hanno ampliato le possibilità di documentazione e comunicazione delle informazioni, determinando nuove modalità di accesso alla conoscenza[1].

La possibilità di creare repliche fedeli di spazi e oggetti tridimensionali consente ai curatori di Musei e Istituzioni responsabili della conservazione e della valorizzazione di Beni Culturali di arricchire e ampliare collezioni ed esposizioni di contenuti virtuali, fornendo un accesso alle informazioni personalizzabile sia in funzione dell'utente e dei contenuti, che della complessità dell'informazione restituita[2]. Le ricostruzioni virtuali consentono inoltre di contestualizzare le informazioni relative ad oggetti discreti, inquadrandole in un ambito spaziale, oltre che temporale, offrendo la possibilità di letture diacroniche della storia[3].

In questo contesto, il presente contributo illustra gli esiti di una ricerca volta ad esplorare le potenzialità offerte dalle tecnologie digitali ai fini della documentazione e della fruizione dei Beni Culturali. Grazie ad un convenzione stipulata fra il Dipartimento DAPT dell'Università di Bologna e il Museo Civico Archeologico di Bologna, sono stati individuati alcuni casi di studio significativi sia per il loro valore artistico e documentale, sia per le loro caratteristiche intrinseche tridimensionali (geometriche, cromatiche e materiche).

Partendo dall'obiettivo più generale di esplorare le possibilità di documentazione, ricostruzione virtuale e di ampliamento delle potenzialità di fruizione del Patrimonio Culturale, le indagini avviate nell'ambito di questa ricerca hanno consentito di raffrontare le caratteristiche peculiari dei reperti archeologici scelti come casi di studio con quelle delle metodologie e degli strumenti di acquisizione digitale tridimensionale e, pertanto, di verificare la funzionalità e l'efficienza di questi ultimi ai fini della individuazione di procedure e standard di

ausilio ad Enti e Istituzioni incaricati di conservare, documentare e valorizzare un ampio patrimonio storico, artistico e culturale.

## 2. IL CASO DI STUDIO

Il caso di studio presentato in questo contributo consiste nella situla Arnoaldi, un reperto datato al V secolo a.C., che fu trovato nel 1881 all'interno di una tomba etrusca nella omonima necropoli di Bologna. Tale reperto è costituito da una lamina in bronzo con incisioni a sbalzo e da un manico in bronzo fuso. Sulla superficie conica della situla sono presenti tre ordini di narrazione, intervallati da catene di fiori di loto, che rappresentano, dall'alto verso il basso, combattimenti di boxe, scene di corse su biga, una parata militare di opliti e cavalieri e una scena di caccia al cervo. Questo tipo di situla è rappresentativo di una produzione artistica molto raffinata, diffusa soprattutto nella zona Nord-Est d'Italia e dell'Europa centro orientale in un periodo compreso fra il VII e il IV secolo a.C. Lo studio del dettaglio, della raffinatezza delle incisioni e l'analisi della narrazione, rappresentativa di uno stile di vita agiato, hanno portato gli studiosi ad ipotizzare che tale situla fu probabilmente realizzata da un artista alpino-veneto su commissione di un etrusco aristocratico per essere utilizzata come dono di nozze[4]. Al di là del valore artistico e documentale di questo reperto, esso è significativo ai fini della presente ricerca per via delle sue caratteristiche intrinseche tridimensionali, per la complessità delle incisioni e per le caratteristiche cromatiche e di riflessione superficiale del materiale utilizzato.

Dal punto di vista geometrico, la situla è alta 25 cm ed ha un diametro massimo di 20 cm circa. Le incisioni hanno dimensioni variabili fra i 0.3 e i 0.5 mm in larghezza e in profondità. L'obiettivo di rilevare accuratamente la geometria delle incisioni è stato decisivo per la determinazione della tecnologia da sperimentare.

Un altro aspetto che ha influito sulla scelta di questo reperto è il colore scuro e riflettente del metallo di cui è costituito. Queste caratteristiche possono infatti mettere in evidenza criticità e restituire errori nelle misure se rilevate utilizzando strumenti che utilizzano la luce e la sua riflessione per riconoscere la posizione di punti nello spazio.

## 3. LA METODOLOGIA ADOTTATA

### 3.1. RILIEVO E RESTITUZIONE DELLA GEOMETRIA DEL REPERTO

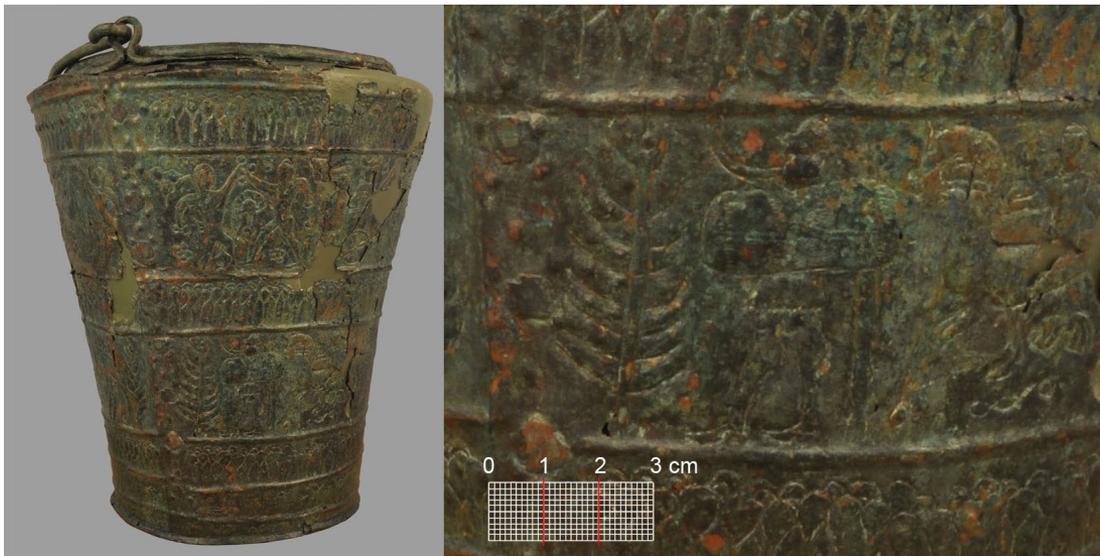
L'obiettivo primario della digitalizzazione della situla Arnoaldi è stato quello di crearne una replica digitale mediante la fedele e accurata acquisizione di informazioni sulla geometria e sulle proprietà cromatiche e di riflessione superficiale del materiale di cui è composta. La creazione di tale modello aveva anche l'obiettivo di restituire il dato di partenza per la successiva creazione di modelli derivati semplificati, caratterizzati da livelli di complessità differenti in funzione di diverse possibilità di utilizzo.

In fase preliminare sono stati pertanto definiti differenti livelli di dettaglio, corrispondenti ad altrettante finalità (archivistiche, rappresentazioni dettagliate, applicazioni web-based e animazioni stereo-fotogrammetriche), in funzione dei quali sono state successivamente stabilite le soglie di semplificazione dei dati restituiti. Il massimo livello di complessità è stato acquisito tramite l'utilizzo di strumenti diversi, in grado di rilevare informazioni metriche con un grado di accuratezza e precisione comparabile con le dimensioni minime del dettaglio rilevato. L'analisi preliminare delle caratteristiche geometriche e cromatiche del reperto ha pertanto determinato la scelta delle metodologie e delle tecnologie da testare. In Figura 1 è riportato un dettaglio della situla in rapporto alla scala metrica.

L'obiettivo dell'acquisizione del massimo livello di dettaglio ha richiesto una serie di test preliminari volti a verificare le effettive prestazioni delle tecnologie e delle metodologie di rilievo da adottare in relazione alle caratteristiche del reperto e alle condizioni operative.

Uno degli aspetti più critici è stato, in questa fase, la verifica dell'accuratezza e della definizione dei punti rilevati in rapporto al rumore prodotto durante la scansione; quest'ultimo è dovuto essenzialmente alla riflessione del metallo e alla elevata potenza del laser richiesta per l'acquisizione della superficie di colore scuro.

Gli strumenti di rilievo più idonei individuati in fase preliminare sono due scanner laser a



1. Situla Arnoaldi e dettaglio delle incisioni.

triangolazione, adatti per l'acquisizione accurata e dettagliata di oggetti di piccole dimensioni, contrassegnati da diverse caratteristiche tecniche (Figura 2), in grado però di acquisire la sola informazione metrica. La scelta di adottare due scanner a triangolazione diversi è dettata essenzialmente dall'obiettivo di confrontare le precisioni delle misurazioni in fase operativa. La Figura 3 mostra un dettaglio della *mesh* poligonale acquisita utilizzando i due scanner. A parità di risoluzione, è evidente come la scansione eseguita mediante l'uso dello scanner Minolta sia affetta da evidente rumore dovuto alla elevata potenza del raggio laser utilizzata per rilevare la superficie scura del metallo. La successiva applicazione di diversi algoritmi di lisciatura (*smoothing*) della *mesh* poligonale finalizzata alla riduzione dell'errore di misura ha comportato la perdita di dettaglio nella restituzione della profondità e della dimensione trasversale minima delle incisioni, di dimensioni paragonabili a quelle del rumore. In seguito all'analisi di questi risultati, lo scanner

Minolta è stato pertanto utilizzato per il rilievo di porzioni del reperto con minore dettaglio, quali ad esempio il fondo della situla o i riempimenti in resina utilizzati per completare e sostenere i frammenti originali. L'interno della situla, di importanza secondaria rispetto alla superficie esterna e difficilmente raggiungibile dallo scanner Perceptron per via dell'ingombro del braccio, è stato anch'esso rilevato sfruttando la profondità di campo dello scanner Minolta. Il Master Model (1100000 poligoni) acquisito in questa fase è costituito da una *mesh* poligonale dalla tassellazione disomogenea, determinata dalla gerarchia e dalla complessità dell'informazione, oltre che dalla tecnologia adottata (Figura 4). Successivamente a questa prima acquisizione, tramite l'applicazione dell'algoritmo *quadric edge collapse decimation* integrato nel software Meshlab sono stati generati due modelli derivati diversi, corrispondenti ad altrettanti livelli di dettaglio in grado di soddisfare requisiti e possibilità di utilizzo differenti.

Nella tabella alla pagina seguente sono riportate le principali caratteristiche dei tre livelli di dettaglio. In figura 5 è riportata una porzione della superficie restituita ai diversi livelli di dettaglio. Oltre alle differenti prestazioni dei due strumenti, è opportuno ricordare che lo scanner Perceptron ScanWorks V4i con braccio ROMER Omega messo a disposizione dalla ditta Leica Geosystems ha consentito non solo di rilevare il livello di dettaglio minimo richiesto, ma ha al contempo ridotto drasticamente i tempi di rilievo e di elaborazione dei dati grazie all'allineamento automatico delle prese ad un unico sistema di riferimento. Questa funzione ha permesso infatti di verificare la totale copertura delle riprese e di colmare immediatamente le eventuali lacune direttamente in fase di rilievo, con evidente risparmio di tempo sia in fase di rilievo che in fase di post-processamento dei dati. La figura 6 riporta la *pipeline* di lavoro adottata. In seguito alla fase di acquisizione del Master Model, l'utilizzo dello scanner Perceptron ha consentito il massimo risparmio di tempo nelle operazioni di *orientation*, *smoothing* e *remeshing*.

DENOMINAZIONE	QUALITÀ DELL'INFORMAZIONE RESTITUITA	OBIETTIVI/UTILIZZO
MASTER MODEL	restituzione del massimo dettaglio acquisito (1100000 poligoni)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- misurazioni accurate delle incisioni (sia sulla superficie della lamiera che in profondità);</li> <li>- esplorazione del modello da parte di studiosi e di utenti differenti in modalità remota;</li> <li>- produzione di replica fisica del reperto tramite 3D <i>printing</i>;</li> </ul>
LOD1 MODEL	restituzione di una informazione geometrica e cromatica ridotte del 50% rispetto a quella fornita dal Master Model (550000 poligoni)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- misurazioni sulla geometria di massima del modello (sulla superficie della lamiera);</li> <li>- esplorazione del modello da parte di studiosi e di utenti differenti in modalità remota;</li> <li>- inserimento in contesti e ricostruzioni virtuali più ampie;</li> </ul>
LOD2 MODEL	restituzione di una informazione geometrica e cromatica ridotte del 75% rispetto a quella fornita dal Master Model (275000 poligoni)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- misurazioni sulla geometria di massima del modello (sulla superficie della lamiera);</li> <li>- inserimento in contesti e ricostruzioni virtuali più ampie;</li> <li>- visualizzazione del reperto su supporti mobile.</li> </ul>

### 3.2. RILIEVO E UTILIZZO DELLE INFORMAZIONI CROMATICHE PER ANALISI E INTERPRETAZIONI

Le caratteristiche tecniche degli scanner laser a triangolazione utilizzati per il rilievo metrico non ci hanno consentito di rilevare l'informazione cromatica contemporaneamente a quella geometrica. L'acquisizione di tale informazione mediante rilievo fotografico ha richiesto pertanto un successivo allineamento dei dati, al fine di ottenere una accurata corrispondenza fra l'informazione cromatica memorizzata nei pixel delle immagini e i punti della superficie tridimensionale.

La proiezione delle immagini sulla geometria ha consentito di eliminare le deformazioni insite nelle riprese fotografiche e le differenze radiometriche dovute alle diverse condizioni di illuminazione, fornendo un'unica immagine della superficie esterna della situla. Il risultato di tale operazione è stata l'occasione per elaborazioni grafiche diverse volte a facilitare la lettura della narrazione rappresentata dalle incisioni ed aumentarne le potenzialità comunicative.

La figura 7 mostra lo sviluppo della superficie cilindrica della situla e della relativa *texture* su un'unica superficie piana.

Se il colore scuro e variegato del metallo di cui è costituito il reperto non facilita l'immediata percezione delle figure, la figura 8 mostra come l'eliminazione delle tre componenti RGB del colore

e l'accentuazione dell'ombreggiatura all'interno delle incisioni mediante l'utilizzo di *shader* di *ambient occlusion* applicati al modello tridimensionale possano contribuire ad evidenziarne i contorni. Il riconoscimento automatico di tali profili può essere facilitato utilizzando, ad esempio, un filtraggio mediante l'applicazione dell'algoritmo di Canny per la trasformazione delle immagini a toni di grigio in immagini binarie.

### 3.3. FRUIZIONE DEI MODELLI

#### 3.3.1. VISUALIZZAZIONE IN AMBIENTE TRIDIMENSIONALE

Una delle conseguenze più significative dello sviluppo di tecnologie per la modellazione tridimensionale è la possibilità di utilizzare gli strumenti digitali come mezzi per la documentazione e per la condivisione della conoscenza.

Una delle principali finalità della acquisizione e restituzione del modello tridimensionale della situla Arnoaldi è quello di indagare da un punto di vista operativo le effettive possibilità di fruizione della sua replica digitale, distinguendo metodi di acquisizione e restituzione diversi in funzione delle finalità comunicative.

Fra gli aspetti che maggiormente influiscono sulle possibilità di condivisione e di fruizione dei modelli digitali tridimensionali è generalmente possibile distinguere (i) la diffusione del software di visua-

lizzazione, (ii) l'utilizzo o meno di software *open source* e (iii) la richiesta di oneri computazionali. Questo ultimo aspetto rappresenta un requisito non secondario nel caso di utilizzo di modelli tridimensionali accurati che generalmente richiedono una significativa occupazione di memoria.

In questo caso specifico, per consentire la fruizione del Master Model della situla Arnoaldi utilizzando un visualizzatore in grado al contempo di esplorare il modello 3d renderizzato ad alta risoluzione e di consentire alcune semplici elaborazioni e valutazioni quantitative oltre che qualitative, quali ad esempio misurazioni e sezioni, abbiamo scelto di utilizzare il formato Universal3D (U3D), messo a punto nel 2004 proprio con l'obiettivo di fornire uno standard di compressione dei modelli tridimensionali[5]. Tale formato è stato scelto anche per le sue caratteristiche operative multi-piattaforma e per la possibilità di condivisione dei contenuti.

Il formato U3D è stato adottato da Adobe System Incorporated® nel 2005 ed è pertanto attualmente supportato dal PDF Portable Document Format che può essere visualizzato utilizzando Adobe® Reader® su piattaforme diverse, garantendo prestazioni di alta qualità anche durante la navigazione interattiva dei modelli. Oltre a questi aspetti, il formato 3D PDF permette di associare commenti e informazioni ai modelli tridimensionali trami-



2. Principali caratteristiche tecniche dei due laser scanner a triangolazione utilizzati.

A sinistra, Perceptron ScanWorks V4i with ROMER Omega bracket:

Width of field: 34÷73 mm; Depth of field: 109 mm

Accuracy: 0.024 mm (2 sigma corner test)

Feature resolution: 0.0045 mm (2 sigma sphere test)

Mean point to point resolution: 0.057 mm

A destra, Minolta Vivid 900 (tele lens - f= 25 mm, fine mode, survey distance 60 mm):

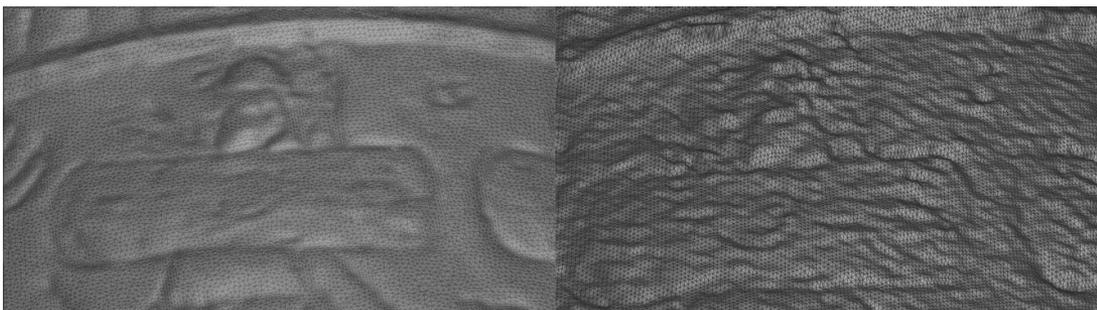
Width of field: 85x114 mm

Accuracy: X 0.22 mm; Y 0.16 mm; Z 0.10 mm

Resolution: XY 0.174 mm; Z 0.052 mm

3. Dettaglio di mesh poligonale ottenuta con scanner Perceptron ScanWorks V4i (sinistra) e Minolta Vivid 900 (destra). A destra è evidente il rumore dovuto alla elevata potenza del laser su materiale riflettente.

4. Tassellazione disomogenea del Master Model.



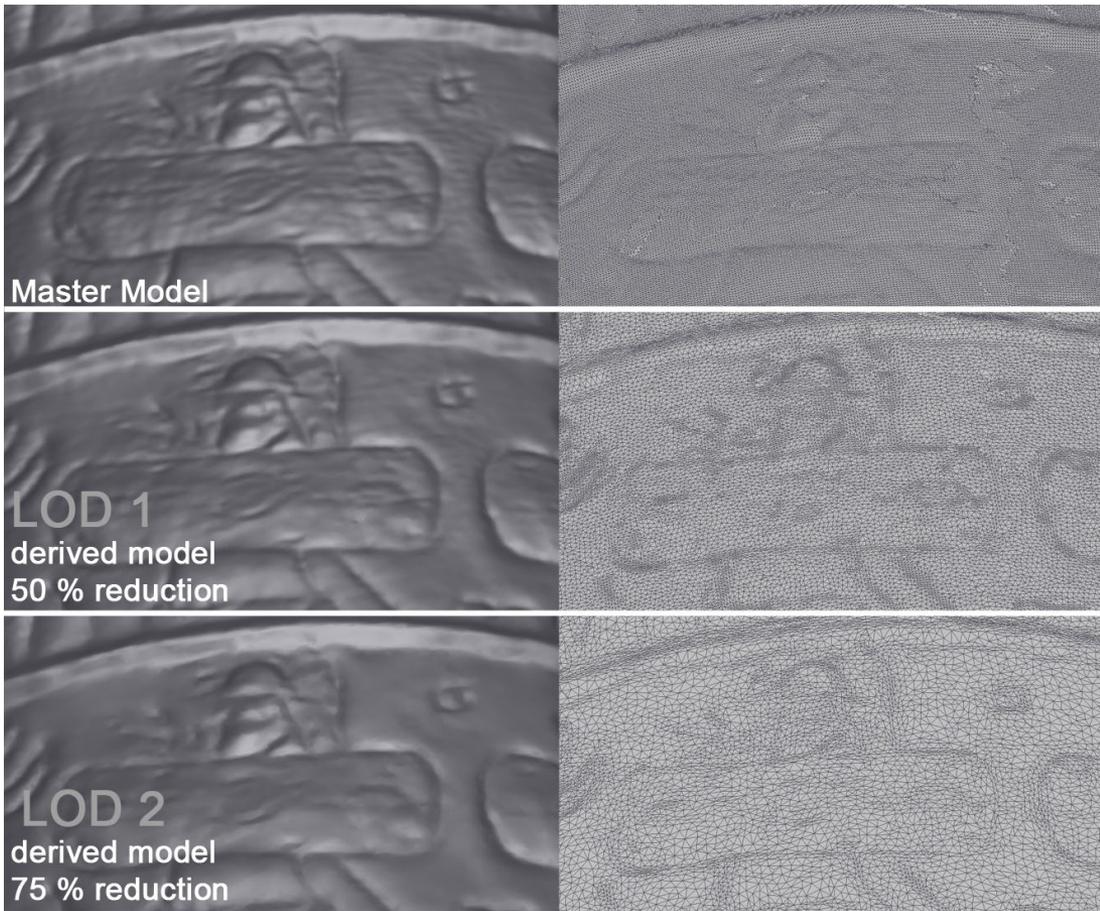
te l'utilizzo di link ipertestuali ed *embedding* di documenti multimediali, oltre a consentire una organizzazione semantica dei modelli attraverso l'uso di strutture ad albero.

A partire dalla versione 8 di Adobe® Acrobat® Standard, i file in formato 3D PDF sono georeferenziati, per cui è possibile effettuare misurazioni direttamente sulla geometria dei modelli.

La figura 9 mostra la *pipeline* per la generazione e la condivisione di un documento 3D PDF e un esempio di visualizzazione di un contenuto 3d all'interno di una finestra di *browser web*.

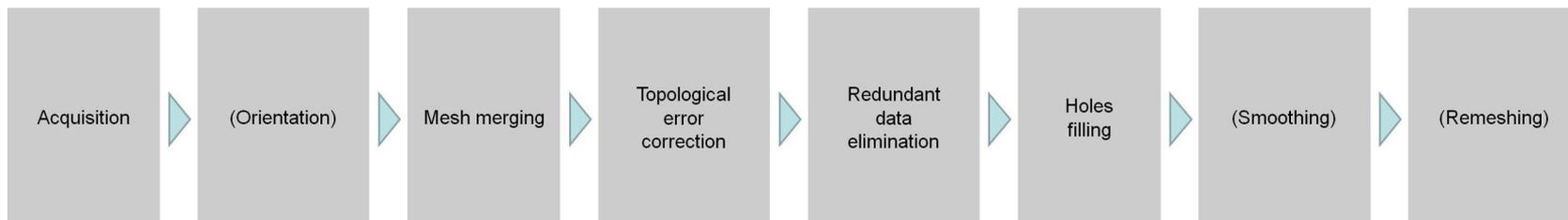
La recente diffusione di dispositivi mobile e l'abitudine ad un loro utilizzo per la navigazione on-line di contenuti diversi ha consentito di adottare questi sistemi di accesso alle informazioni anche per l'esplorazione del modello 3d di situla Arnoaldi. La rapidità della loro diffusione su larga scala lascia infatti intuire la possibilità di un loro utilizzo anche all'interno di Musei o nell'ambito di esposizioni temporanee.

A tale scopo è stata testata la *release 2.0* del software di modellazione fotogrammetrica Autodesk® Project Photofly® per creare una versione alleggerita (200000 poligoni, pari a circa 10 MB) e texturizzata del modello della situla, destinata ad essere esplorata tramite dispositivi iPhone e iPad in formato IPM utilizzando il visualizzatore Autodesk® Inventor Publisher Mobile Viewer® (fig. 10).



5. Porzione della mesh poligonale a diversi livelli di dettaglio.

6. Pipeline di acquisizione dei dati geometrici. In alcuni casi, le fasi operative indicate fra parentesi possono essere non necessarie.



7. Sviluppo su superficie piana della texture.



### 3.3.2. FRUIZIONE VISIVA IMMERSIVA

Sebbene l'utilizzo del formato 3D PDF consenta una visualizzazione personalizzata, in tempo reale e di alta qualità dei modelli 3d, l'irregolarità superficiale e la tridimensionalità caratteristiche di situla Arnoaldi può essere apprezzata in maniera più efficace in ambiente stereoscopico. A questo scopo, nell'ambito della presente ricerca sono state sperimentate sia visualizzazioni stereo attive che anaglifiche che consentono rispettivamente la visualizzazione in sequenza (ad una frequenza di 120 Hz mediante utilizzo di software Nvidia® e occhiali sincronizzati con il monitor) e contemporanea di due immagini del modello osservato da due pun-

ti di vista differenti posti alla distanza bioculare dell'osservatore[6].

La figura 11 mostra sulla destra le camere utilizzate per il calcolo delle coppie di immagini stereoscopiche del modello e, sulla sinistra, un singolo frame di una visualizzazione anaglifica della situla.

La figura 12 mostra la visualizzazione anaglifica della situla su iPad.

Nell'ambito della ricerca, la situla è stata inoltre l'occasione per sperimentare la visualizzazione dei reperti archeologici in realtà aumentata; questa tecnologia contribuisce ad un maggiore coinvolgimento degli utenti tramite la navigazione personalizzata e contemporanea di scene reali (l'utente

ripreso da una telecamera) e digitali (i modelli 3d dei reperti). La figura 13 mostra il *marker* personalizzato che è stato predisposto per la georeferenziazione e per l'orientamento del modello nello spazio e una tipica schermata in fase di visualizzazione.

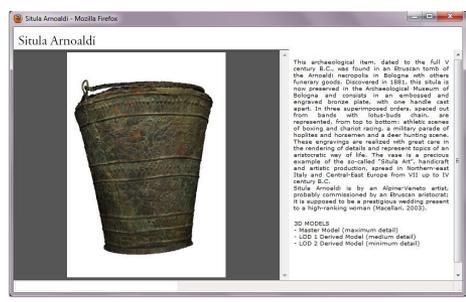
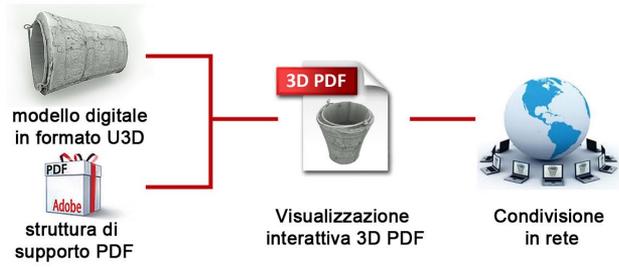
### 3.3.3. FRUIZIONE TATTILE

La disponibilità di una replica digitale della situla ad alta definizione (Master Model) è stato il presupposto per sperimentarne la riproduzione fisica mediante l'utilizzo di tecniche di *3d printing*. L'uso di queste tecnologie consente infatti di avvicinare gli utenti agli oggetti esposti, stabilendo un rapporto tattile, oltre che visivo, con essi. L'eliminazione



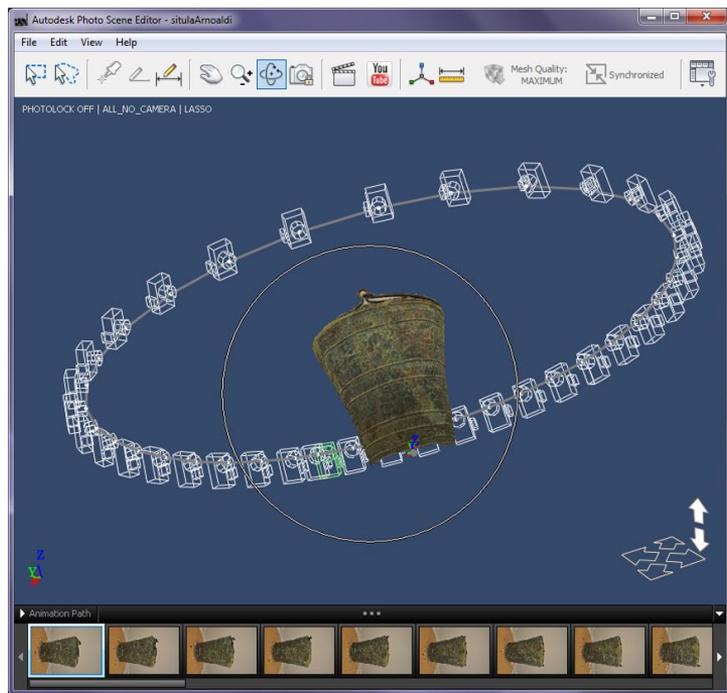
8. Aumento leggibilità della narrazione tramite elaborazioni grafiche di evidenziazione delle incisioni. Al centro, applicazione di shader di ambient occlusion, a sinistra, trasformazione di immagine in toni di grigio in immagine binaria.

9. A sinistra, pipeline di generazione e condivisione di modelli 3d in formato 3D PDF. A destra, esempio di visualizzazione del contenuto 3d all'interno di una finestra di browser.



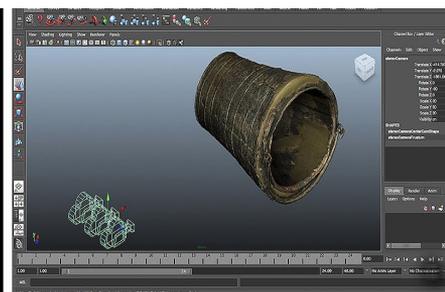
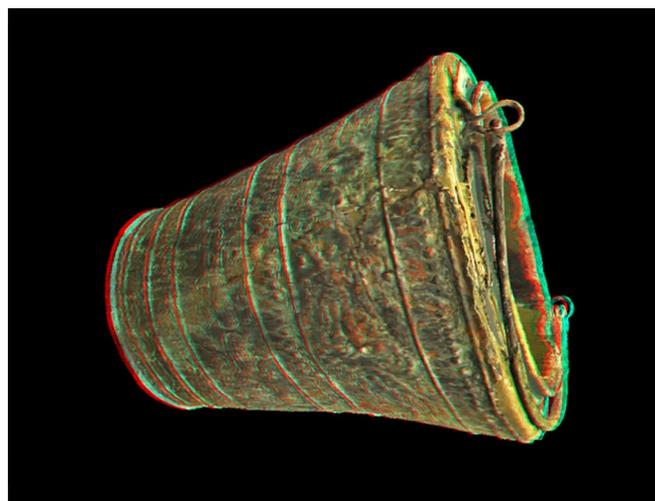
dell'ostacolo costituito dalla teca e la prossimità fisica fra l'osservatore e il reperto contribuiscono infatti ad un maggiore coinvolgimento dell'utente nella visita. Oltre a questi aspetti, la possibilità di percepire i contenuti della narrazione attraverso il tatto facilita l'accesso alle informazioni anche agli utenti ipovedenti.

La figura 14 mostra alcune fasi della stampa di una porzione del modello della stula realizzata utilizzando la stampante a polvere ZPrinter® 310 Plus (dimensioni area di stampa: 203 x 254 x 203 mm; spessore dei layer di polvere: 0.089 - 0.203 mm). Un campione della stampa è stato successivamente trattato con pigmenti con l'obiettivo di riprodurre il colore originale ed evidenziare le incisioni.



10. Visualizzazione del modello in formato IPM su iPhone.

11. Impostazione delle camere per la visualizzazione stereoscopica anaglica del modello 3d.



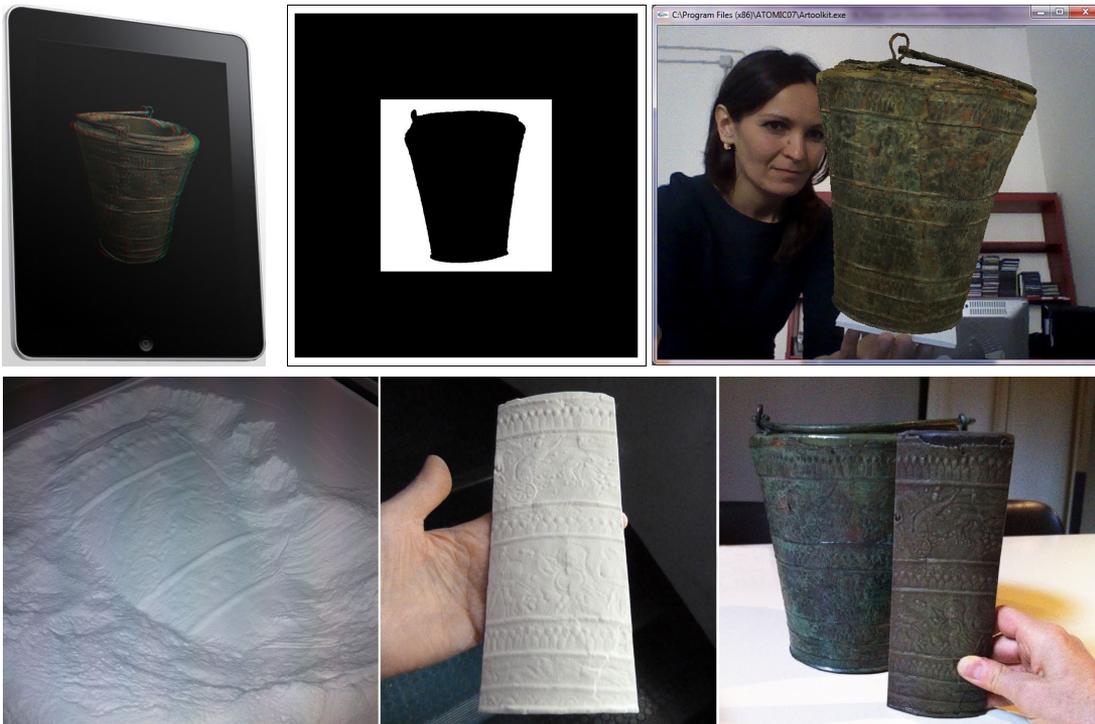
Left eye

Right eye



#### 4. CONCLUSIONI

Questo contributo mostra il flusso di lavoro legato alla acquisizione e restituzione in forma di modello digitale *reality-based* di reperti archeologici. Il caso di studio preso in esame è stata l'occasione per delineare la sequenza di procedure operative e per evidenziare criticità ricorrenti. Il contributo mostra come da un'unica acquisizione accurata e ad alta definizione sia generalmente possibile ottenere informazioni con livelli di complessità inferiori, destinate ad essere fruite da utenti diversi e secondo modalità differenti. Il contributo mostra inoltre come tecnologie a costo contenuto in grado di restituire visualizzazioni stereoscopiche o in realtà aumentata



possano ampliare le modalità di fruizione delle ricostruzioni digitali e coinvolgere gli utenti mediante una comunicazione più immediata e diretta che si attua attraverso l'utilizzo di apparecchiature e strumenti destinati a diventare di uso comune.

Alcuni aspetti di questa ricerca sono attualmente in fase di implementazione; fra questi, uno dei più immediati è legato alla navigazione in realtà aumentata dei modelli 3d dei reperti archeologici utilizzando applicazioni per *mobile phone* e *tablet pc* in grado di accompagnare l'utente all'interno dei percorsi museali.

#### Ringraziamenti

Questo progetto di ricerca è stato avviato grazie alla preziosa collaborazione del Museo Civico Archeologico di Bologna, nella persona della Direttrice Paola Giovetti e dell'archeologa Federica Guidi. Gli autori desiderano riservare un ringraziamento speciale a Federico Uccelli e Gabriella Giacomoni di Leica Geosystems per aver supportato questo progetto e per avere fornito un contributo indispensabile alla sua realizzazione.

La ricerca è stata condotta grazie all'attrezzatura messa a disposizione dal Prof. Roberto Mingucci, responsabile scientifico del Laboratorio Silab del Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale dell'Università di Bologna. Un ringraziamento speciale a Giovanni Bacci del laboratorio Silab per il suo prezioso supporto durante le operazioni di rilievo e di realizzazione del prototipo fisico.

12. Visualizzazione anaglifca del modello su iPad.

13. A sinistra, marker utilizzato per georeferenziare e orientare il modello 3d; a destra, visualizzazione del modello in realtà aumentata.

14. Fasi di stampa di porzione del modello della situla mediante uso di stampante a polvere ZPrinter® 310 Plus.

#### NOTE

[1] Bernardini, F., Rushmeier, H., *The 3D model acquisition pipeline*, Computer Graphics Forum, 2002, 21(2), 149-172.

Blais, F., *A review of 20 years of range sensor development*, Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1), 231-240.

Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Tsioukas, V., Chamzas, C., *Methods for 3D Digitization of Cultural Heritage*, Journal of Cultural Heritage, 2007, 8 (1), 93-98.

Remondino, F., *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*, Remote Sensing, 2011, 3(6), 1104-1138.

Remondino, F., El-Hakim, S., *Image-based 3D Modelling: A Review*, The Photogrammetric Record, 2006, 21 (115), 269-291.

[2] Aguiló, C., Lore's, J., Junyent, E., *Enhanced cultural heritage environments by augmented reality systems*, Proceedings of the Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia, vol. 874, 2001, 357-364.

Barceló, J.A., Forte, M., Sanders, D.H., *Virtual Reality in Archaeology*, Archaeopress, Oxford, 2000.

Forte, M., *Musealizzare il virtuale: il progetto di allestimento multi-interattivo per la Cappella degli Scrovegni*, ArchèSrl, Bologna, 2002.

Frischer, B., *New Directions for Cultural Virtual Reality: A Global Strategy for Archiving, Serving, and Exhibiting 3D Computer Models of Cultural Heritage Sites*, Proceedings of the Conference, Virtual Retrospect 2005, 2006, 168-175.

Guidi, G., Frischer, B., et al., 2005. *Virtualizing Ancient Rome: 3D Acquisition and Modeling of a Large Plaster-of-Paris Model of Imperial Rome*, Videometrics VIII, Proceedings of the SPIE, vol. 5665, 2005, 119-133.

Portalés, C., Lerma, J.L., Pérez, C., *Photogrammetry and augmented reality for cultural heritage applications*, The Photogrammetric Record, 2009, 24(128), 316-331.

V. Vlahakis, J. Karigiannis, M. Tsotros, M. Gounaris, L. Almeida, D. Stricker, T. Gleue, I.T. Christou, R. Carlucci, N. Ioannidis, *ARCHEOGUIDE: first results of an augmented reality, mobile computing system in cultural heritage sites*, Proceedings of the 2001 International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage, 2001, 131-139.

Museo virtuale dell'antica Via Flaminia: <http://www.vhlab.itabc.cnr.it/flaminia>;

Museo virtuale dell'IRAQ: <http://www.virtualmuseumiraq.cnr.it>;

Le Mostre Impossibili: [www.mostreimpossibili.rai.it](http://www.mostreimpossibili.rai.it)

[3] Frischer, B., *The Rome Reborn Project. How Technology is helping us to study history*, OpEd, University of Virginia, 2008, 1-5.

"Virtual History. Rome", applicazione per iPad sviluppata nel 2011 da Arnoldo Mondadori Editore S.p.A. <http://itunes.apple.com/it/app/virtual-history-roma/id410358487?mt=8>;

Progetto Teramo virtuale: [http://www.vhlab.itabc.cnr.it/Projects\\_teramo.htm](http://www.vhlab.itabc.cnr.it/Projects_teramo.htm)

[4] Macellari, R., *Il sepolcreto etrusco nel terreno Arnoaldi di Bologna (550-350 a.c.)*, Marsilio, Bologna, 2003.

[5] Majorov, A., *Universal 3D (U3D)*, Proceedings of the International Conference Graphicon, 2005, 1-4.

[6] Howard, I.P., Rogers, B.J., *Bino-cular vision and stereopsis*, Oxford University Press, 1995.

Woods, A.J., Docherty, T.M., Koch, R., *Image distortions in stereoscopic video systems*, Stereoscopic Displays and Applications IV, Proceedings of the SPIE, Vol. 1915, 1993, 227-238.