

RESTITUZIONE DI MODELLI 3D DI REPERTI ARCHEOLOGICI ISCRITTI: ASPETTI RILEVANTI E PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA INNOVATIVA

3D HIGH-QUALITY MODELING OF SMALL AND COMPLEX ARCHAEOLOGICAL INSCRIBED OBJECTS: RELEVANT ISSUES AND PROPOSED METHODOLOGY

L. Lastilla ^{a, b}

^a Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Informatica, Automatica e Gestionale (DIAG) “Antonio Ruberti”

^b Scuola Superiore di Studi Avanzati, Sapienza Università di Roma
lorenzo.lastilla@uniroma1.it

PAROLE CHIAVE: Modellazione 3D, Fotogrammetria Close-Range, Laser Scanner, Focus Stacking, Reperti Archeologici Iscritti

KEY WORDS: 3D Modeling, Close-range Photogrammetry, Laser Scanner, Focus Stacking, Small Inscribed Objects

Questo articolo è stato presentato al Premio Giovani Autori SIFET 2019.

RIASSUNTO

La restituzione di modelli 3D di reperti archeologici con iscrizioni scolpite deve tener conto dei problemi legati alla corretta acquisizione ed alla riconoscibilità delle iscrizioni, al fine di garantire i requisiti necessari all'ispezione visiva ed all'analisi delle stesse. Nel presente lavoro, realizzato nell'ambito del progetto ERC INSCRIBE, sono riportati i test eseguiti tramite fotogrammetria e laser scanning con lo scopo di individuare i sensori e le soluzioni pratiche più idonei alla produzione di modelli 3D completi di tre repliche di oggetti iscritti, prestando particolare attenzione all'accuratezza geometrica dei risultati ed all'efficienza operativa.

Attraverso queste prove sono stati definiti un setup sperimentale ed uno schema di acquisizione estremamente funzionali all'allineamento delle immagini nel processo fotogrammetrico. Inoltre, gli obiettivi fotografici testati sono stati confrontati in termini di accuratezza geometrica dei modelli 3D (sempre dell'ordine di 0.1 mm), resa della texture, durata di acquisizione e costo.

I modelli 3D ottenuti attraverso laser scanning, invece, mostrano elevata qualità nella resa delle alte frequenze ed un'accuratezza dell'ordine di 0.01 mm, ma sono privi di texture. Pertanto, è stata individuata una procedura stabile ed efficiente per integrare la texture dei modelli fotogrammetrici con la mesh di quelli ottenuti tramite laser scanning.

Infine, per migliorare la riconoscibilità dei segni, è stato testato con successo lo shader Radiance Scaling sui modelli ottenuti.

ABSTRACT

3D modelling of inscribed archaeological finds has to consider issues related to the correct acquisition and reading of ancient inscriptions, in order to guarantee the needed requirements for visual inspection and analysis of the signs. In this work, performed in conjunction with a specific strand of the ERC Consolidator project entitled INSCRIBE, photogrammetry and laser scanning were tested in order to find the optimal sensors and settings useful to the complete 3D reconstruction of three replicas of inscribed objects, paying specific attention to the final geometric accuracy and operative feasibility.

As a result, a robust acquisition setup, able to guarantee a correct and automatic alignment of the images during the photogrammetric process, was identified. Moreover, the lenses involved in the photogrammetric tests were compared in terms of geometric accuracy, texture restitution, acquisition efficiency and cost. The accuracy of the photogrammetric 3D models was of the order of 0.1 mm.

The 3D models produced through laser scanning, instead, show high quality in high frequencies reconstruction and an accuracy of few hundredths of millimeter, but they are not provided with texture. Because of this, a robust and efficient procedure for integrating the texture of the photogrammetric models with the mesh of the laser scanning ones was defined.

Finally, in order to enhance the sign recognition, the Radiance Scaling shader was successfully tested on the models produced.

1. INTRODUZIONE

La restituzione di modelli 3D di reperti archeologici può fare affidamento su tecnologie ben definite e ormai largamente utilizzate, quali la fotogrammetria ed il *laser scanning* (Remondino et al., 2005), (Ravanelli et al., 2016). Ciononostante, la variabilità di tali reperti in termini di dimensione, morfologia e materiale (e, di conseguenza, tipologia d'interazione con le radiazioni elettromagnetiche), impone la necessità di adottare, di caso in caso, strumenti specifici e strategie utili al corretto funzionamento ed all'esercizio ottimale delle tecniche sopra menzionate. Analogamente, lo scopo per cui sono realizzati i modelli 3D ed il dettaglio richiesto per le analisi condizionano

significativamente l'attuazione del processo di acquisizione dei dati.

Il presente lavoro si inserisce all'interno di questo contesto, in quanto riporta un'indagine delle soluzioni pratiche da adottare nell'applicazione di fotogrammetria e *laser scanning* per la ricostruzione 3D di un particolare tipo di reperti archeologici, aventi dimensione massima inferiore a 10 cm e recanti iscrizioni con dimensione media di circa 2/3 mm, profondità di 1/2 mm e stato di conservazione variabile.

Il complesso delle soluzioni individuate costituirà un supporto di conoscenze utile alla realizzazione di una parte delle attività del progetto ERC INSCRIBE (*INvention of SCRipts and their BEginnings*), diretto dalla Professoressa Silvia Ferrara (*Alma Mater Studiorum* – Università di Bologna) come *Principal*

Investigator. Fra gli obiettivi di INSCRIBE rientra infatti la produzione del primo corpus digitale dei sistemi di scrittura indecifrati dell'Egeo del II millennio a. C. (Geroglifico Cretese, Lineare A e Cipro-Minoico), il quale ammonterebbe a centinaia di reperti e consentirebbe di superare le limitazioni dei *database* tradizionali. Questi ultimi sono generalmente costituiti da immagini in bianco e nero dei reperti, relative esclusivamente alle parti iscritte degli stessi e pertanto parziali, oppure da disegni a mano, i quali presentano spesso trascrizioni imprecise o soggettive dei segni ed introducono una normalizzazione artificiale delle loro forme grafiche (INSCRIBE, 2018a).

Per un simile campo di studio, si pone con chiarezza la necessità di garantire la *riconosibilità* dei segni, al fine di un'analisi visiva o mediante tecniche automatiche dei segni stessi; tale requisito è rispettato, essenzialmente, attraverso:

1. un'accurata restituzione della geometria (e conseguentemente della forma) del segno, proprietà ascrivibile, ad esempio, alla mano dell'autore che ha realizzato l'incisione;
2. una resa ottimale della *texture* dell'oggetto, che può fornire preziose informazioni sulle caratteristiche del materiale di cui è costituito, e quindi sui possibili usi o trattamenti subiti, e migliorare, in certi casi, la riconoscibilità delle iscrizioni.

Ciò si è tradotto, per quanto riguarda il processo fotogrammetrico (par. 4.1), nella scelta di sensori (o meglio, di configurazioni elettro-ottiche) con risoluzione spaziale adeguata a rappresentare i più piccoli dettagli d'interesse per la comprensione e l'analisi dei segni, optando di conseguenza, per degli obiettivi macro (per cui si può parlare, a tutti gli effetti, di macro-fotogrammetria). A fronte del vantaggio offerto da tali obiettivi in termini di risoluzione, si è cercato di limitarne gli aspetti negativi – ovvero, un campo di profondità (*Depth of Field*, DoF) ridotto – attraverso il cosiddetto *focus stacking* (Gallo et al., 2014), (Clini et al., 2016), (Kontogianni et al., 2017), una tecnica che integra immagini acquisite dalla stessa posizione e con lunghezza focale variabile per ottenerne una con un campo di profondità esteso, riducendo la perdita di qualità dovuta alla diffrazione.

Per quanto concerne la *laser scanning* (par. 4.2), invece, si è optato per un dispositivo in grado di fornire prestazioni ottimali in termini di accuratezza, precisione e risoluzione del modello 3D prodotto (specialmente nella ricostruzione delle alte frequenze), a scapito della restituzione della *texture*. Pertanto, le scansioni sono state realizzate mediante lo *scanner* ad alta risoluzione ScanRider 1.2 (prodotto da VGER), basato sulla tecnologia a luce strutturata.

La necessità di integrare i modelli 3D ottenuti tramite la *laser scanner* con l'informazione relativa alla *texture* è stata risolta con un approccio la cui definizione costituisce il secondo risultato principale di questo lavoro (al di là, quindi, delle soluzioni pratiche utili all'implementazione delle tecniche summenzionate): ricorrendo a metodi della computer grafica riconducibili al cosiddetto *texture mapping*, è stata individuata una procedura in grado di trasferire la *texture* dei modelli 3D ottenuti tramite fotogrammetria a quelli generati tramite *laser scanning* (par. 6.2). I modelli risultanti, pertanto, coniugano efficacemente i benefici di entrambe le tecniche.

Un elemento aggiuntivo funzionale alla riconoscibilità ed all'analisi dei segni, indipendente dalla tecnica impiegata per realizzare i modelli 3D, consiste nella regolazione dell'*ombreggiatura* degli stessi, ovvero della simulazione del modo in cui la luce interagisce con la *mesh*, la quale può esaltare significativamente la nitidezza delle iscrizioni; pertanto, in questo lavoro (par. 6.3) è riportato anche un confronto fra alcuni

algoritmi di regolazione dell'ombreggiatura implementati sul software *open source* MeshLab (MeshLab, 2019).

2. PRESENTAZIONE DEI CASI DI STUDIO

I test di restituzione dei modelli 3D hanno riguardato i seguenti oggetti, repliche affidabili (considerate equivalenti agli originali) di reperti variabili per caratteristiche dei segni, morfologia e dimensioni e rappresentati in Figura 1 (Lastilla et al., 2019a), (Lastilla et al., 2019b):

1. la copia in argilla di una pallina recante iscrizioni in Cipro-Minoico (CM);
2. la copia in gesso di una tavoletta proveniente dal Museo Nazionale di Damasco, Siria;
3. la copia in gesso di una tavoletta proveniente dal sito di Ebla, Siria.



Figura 1. Da sinistra a destra, replica della tavoletta di Damasco, replica della tavoletta di Ebla e replica di pallina iscritta in Cipro-Minoico

Le caratteristiche di tali oggetti e delle rispettive iscrizioni influenzano in vario modo l'acquisizione dei dati per la produzione di modelli 3D, come anticipato in precedenza.

La dimensione della pallina in argilla (avente diametro di circa 2.5 cm), ad esempio, impone la necessità di garantire condizioni di illuminazione uniforme anche a scale ridotte.

Per quanto riguarda la tavoletta di Ebla (le cui dimensioni sono riportate in Tabella 1, insieme a quelle della tavoletta di Damasco), la forma sottile – con due dimensioni prevalenti sulla terza – richiede particolare attenzione nell'acquisizione delle immagini per l'attuazione del processo fotogrammetrico, affinché queste presentino un numero sufficiente di *feature* (o *tie point*) in corrispondenza dei bordi dell'oggetto.

Replica di tavoletta	Lunghezza (cm)	Larghezza (cm)	Spessore (cm)
di Damasco	9	7	4
di Ebla	7	6	2

Tabella 1. Dimensioni principali delle tavolette

3. METODI, SOFTWARE E SENSORI IMPIEGATI

Per quanto riguarda la restituzione dei modelli 3D delle repliche mediante fotogrammetria, l'acquisizione delle immagini, che costituisce il primo momento di tale processo, è stata realizzata per mezzo di una fotocamera Canon EOS 1200D, dotata di un sensore CMOS di 18 megapixel circa, avente dimensione 22.3 mm × 14.9 mm e *crop factor* di 3:2. Sono stati testati tre obiettivi differenti:

1. un obiettivo macro 100 mm (Canon), il quale consente di fissare il rapporto di riproduzione ad 1:1, e quindi di ridurre le distorsioni nell'immagine;

2. un obiettivo YONGNUO F1.8 50 mm, non adatto, in realtà, a realizzare la macro-fotogrammetria, ma considerato una soluzione interessante per via del prezzo ridotto e della capacità di limitare le distorsioni (essendo un obiettivo a focale fissa);
3. l'obiettivo Canon proprio della fotocamera (un 18-55 mm), montato tuttavia in posizione rovesciata (*reverse mode*) tramite un adattatore (in grado di non interferire con l'autofocus, necessario per il *focus stacking*); tale soluzione è stata adottata in quanto costituisce un'alternativa economica agli obiettivi macro (Hogton, 2018).

La fotocamera è stata azionata da remoto mediante il software Helicon Remote, che ha permesso altresì di fissare manualmente i parametri di scatto (ISO, lunghezza focale, esposizione e apertura del diaframma), nonché di realizzare gruppi (o *stack*) di immagini multi-focali da elaborare tramite *focus stacking*. Per applicare questa tecnica, si è fatto ricorso al software commerciale Helicon Focus (HeliconSoft, 2018a).

Per le fasi successive del processo fotogrammetrico, ossia l'orientamento delle immagini e la restituzione del modello 3D, si è utilizzato il software Agisoft Photoscan, che implementa l'approccio *Structure from Motion*.

La ricostruzione delle repliche tramite *laser scanning*, invece, è stata eseguita tramite lo scanner a luce strutturata ScanRider 1.2 (mostrato in Figura 2), che dispone di un proiettore DLP (*Digital Light Processing*) e di una fotocamera pancromatica.



Figura 2. ScanRider 1.2 (VGER)

Lo strumento, inoltre, dispone di una tavola rotante sulla quale viene collocato l'oggetto da scansionare, che può essere così acquisito in ogni lato, ed anche per parti distinte, allineate e fuse in un secondo momento con il software SpaceRider.

Parametro fondamentale del processo è il volume di scansione (scelto dall'utente fra tre alternative), che condiziona la precisione e l'accuratezza del modello 3D risultante, nonché, ovviamente, le dimensioni del più grande oggetto scansionabile (secondo quanto evidenziato dalla Tabella 2).

Specifiche	Volume 1	Volume 2	Volume 3
Dimensioni massime campo di scansione (mm)	66×50×50	133×100×100	300×225×225
Lunghezza massima oggetto (mm)	66	133	150

Risoluzione standard (mm)	≤ 0.05	≤ 0.1	≤ 0.23
Precisione (mm)	≥ 0.03	≥ 0.07	≥ 0.15
Errore medio (mm)	≥ 0.01	≥ 0.03	≥ 0.05
Distanza di lavoro (mm)	120	200	520

Tabella 2. Specifiche dei volumi di scansione per lo scanner ScanRider 1.2 (VGER)

È utile ricordare che la scelta di tale parametro deve essere compiuta essenzialmente sulla base del dettaglio richiesto nella resa delle iscrizioni, e che, di conseguenza, può rendersi necessario l'utilizzo del volume minimo (garanzia di maggior precisione) per reperti più grandi del massimo consentito: in tal caso, si attuano scansioni distinte, che vengono successivamente allineate e fuse, come accennato in precedenza.

L'elaborazione, la valutazione di accuratezza e precisione ed il post-processamento dei modelli 3D (inclusa la regolazione dell'ombreggiatura) sono stati condotti sui software *open source* CloudCompare (CloudCompare, 2018) e MeshLab.

L'integrazione fra modelli ottenuti mediante fotogrammetria e tramite *laser scanning* è stata realizzata con il software commerciale Autodesk Maya (AUTODESK, 2019), previo allineamento eseguito su CloudCompare.

4. MODALITÀ DI ACQUISIZIONE DEI DATI E CONTESTO SPERIMENTALE

4.1 Fotogrammetria

In totale sono state realizzate 7 prove, riassunte in Tabella 3, che riporta l'ID della prova stessa, il sensore e l'obiettivo impiegati, il numero di immagini utilizzate, il numero di queste ottenute tramite *focus stacking*, la durata di acquisizione e se il modello è stato scalato o meno. L'unica prova eseguita con l'obiettivo 18-55 mm *reverse mode* ha riguardato la pallina iscritta, al fine di testare questa soluzione economica con un oggetto particolarmente complesso, data la sua superficie uniforme e le dimensioni ridotte.

In generale, è stato assicurato un controllo sulle modalità di illuminazione, al fine di prevenire l'impatto negativo di possibili variazioni della stessa sull'allineamento delle immagini e sulla resa della *texture*, significativo per dettagli dell'ordine di grandezza di qualche millimetro. Nella pratica, ciò è stato realizzato integrando due soluzioni distinte:

1. gli oggetti sono stati posti all'interno di un set fotografico portatile, in grado di realizzare un ambiente neutro ed illuminato uniformemente tramite una striscia luminosa LED;
2. un flash ad anello (con filtro bianco) è stato montato sull'obiettivo usato di volta in volta.

Per il solo caso della prova P1, tuttavia, si è fatto uso esclusivamente del set fotografico portatile, in quanto il flash ad anello non è collegabile con il retro dell'obiettivo 18-55 mm.

Nell'ottica di acquisire gli oggetti da più punti di vista, garantendo un'area di sovrapposizione sufficiente fra le immagini, si è optato per un *capturing scenario* regolare, ovvero basato su "percorsi circolari" intorno all'oggetto da ricostruire (un esempio è mostrato in Figura 3).



Figura 3. Esempio di *capturing scenario* per la tavoletta di Damasco – obiettivo 50 mm

Tali schemi di acquisizione sono stati realizzati mantenendo fissa la fotocamera (montata su un treppiede e controllata da remoto tramite Helicon Remote) e ruotando l'oggetto, posto su un supporto fissato con della gomma adesiva ad una piattaforma girevole. Si è seguito questo approccio con lo scopo di ridurre quanto più possibile le vibrazioni del setup sperimentale: considerando infatti gli standard di accuratezza e risoluzione richiesti ai modelli 3D, anche modeste vibrazioni possono indurre sfocature eccessive.

Al fine di rappresentare ciascun oggetto nella propria interezza, evitando aree mancanti o l'inclusione di elementi esterni indesiderati (come il supporto), l'acquisizione è avvenuta in sessioni di cattura distinte: una volta fotografata una zona dell'oggetto, infatti, questo è stato capovolto fotografandone la parte opposta, dopo aver cambiato il *background* per evitare problemi di corrispondenze indesiderate nella fase di *matching* (Mallison, 2018). Per quanto riguarda le due tavolette, la resa dei bordi ha richiesto un numero ridondante di immagini e l'utilizzo del *focus stacking* (per l'obiettivo 50 mm), in grado di assicurare un numero sufficiente di *tie point* alla fase di allineamento operata da Agisoft Photoscan.

Infine, per quanto concerne la materializzazione di punti d'appoggio funzionali ad ottenere modelli 3D metricamente validi, il supporto e la piattaforma girevole sono stati coperti con fogli di carta millimetrata, sui quali collimare, quando inclusi nelle immagini, dei *marker* su Agisoft Photoscan. Questa strategia ha permesso di produrre modelli scalati per le prove P3, D1, D2, E1, E2, mentre nei test rimanenti non è stata applicata per via del campo visivo limitato del sistema ottico (che escludeva il supporto e la piattaforma).

Per tutte le prove, le scelte dei parametri di scatto hanno seguito alcune regole generali, di seguito riassunte:

1. l'ISO è stato fissato al valore minimo di 100, grazie alle condizioni di illuminazione ottimali e per ridurre al minimo il rumore;
2. l'apertura è stata posta pari ad $f/13$, per avere una profondità di campo adeguata alla dimensione delle repliche;
3. per la durata di scatto si è scelto un valore variabile, comunque inferiore ad 1 s, con lo scopo di ottenere, di volta in volta, immagini nitide per i dettagli d'interesse.

4.2 Laser scanning

Attraverso il *laser scanning* sono state realizzate 3 prove, una per replica; per la pallina e la tavoletta di Ebla si è optato per il volume di scansione 1, mentre per la tavoletta di Damasco si è scelto il volume immediatamente superiore, in ragione delle rispettive dimensioni riportate in Tabella 1.

Le prove sono state precedute da una calibrazione (specifica per il volume selezionato) dello *scanner*, operata tramite il software SpaceRider.

L'oggetto da scansionare è stato fissato alla tavola rotante tramite gomma adesiva, ed è stato acquisito in due sessioni distinte (una per parte); le due *mesh* così ottenute sono state quindi allineate e fuse sul medesimo software. Il tempo necessario all'acquisizione ed alla completa elaborazione del modello è stato, all'incirca, di 20/30 minuti.

5. ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI

Se per il *laser scanning* l'acquisizione dei dati è coincisa, di fatto, con la restituzione del modello 3D, nel caso della fotogrammetria a questa prima fase sono seguiti un pre-processamento condotto su Helicon Focus (*focus stacking*), l'orientamento delle immagini e, solo alla fine, la restituzione del modello. Per quanto riguarda il *focus stacking*, il software impiegato si basa sui seguenti parametri (HeliconSoft, 2018b):

1. algoritmo di *focus stacking*; sono disponibili 3 alternative in tal senso: il metodo A, che calcola il peso di ogni pixel – per ogni immagine del gruppo – sulla base del rispettivo contrasto e computa la media pesata dei pixel per produrre un'immagine sintetica avente DoF esteso; il metodo B, che opera, all'interno dello *stack*, una ricerca (per ogni pixel) del pixel con il massimo contrasto; il metodo C, che utilizza un approccio di tipo piramidale;
2. il raggio, che definisce la dimensione della finestra su cui è calcolato il contrasto di ogni pixel;
3. il parametro di *smoothing*, che definisce il criterio con cui comporre le aree a maggior nitidezza.

La scelta dei parametri è rimasta invariata per tutte le prove: per quanto riguarda l'algoritmo di *focus stacking*, è stato selezionato il metodo B, poiché fornisce garanzie maggiori in termini di conservazione del colore e del contrasto originali e in quanto le repliche non presentano variazioni nette e frequenti di profondità. Sono stati scelti valori di default per il raggio (posto pari a 3 pixel) e per il parametro di *smoothing* (fissato al valore di 4), generalmente consigliabili a meno che le immagini sintetiche presentino un *noise* eccessivo o anomalie di altro genere (la cui assenza è stata verificata).

L'orientamento delle immagini e la restituzione dell'informazione 3D sono stati realizzati, come anticipato precedentemente, su Agisoft Photoscan.

L'allineamento stimato (con l'accuratezza desiderata) dal software è stato rifinito rimuovendo (in parte automaticamente, in parte manualmente) i *tie point* considerati non affidabili. In seguito, ciascun modello è stato scalato attraverso la collimazione di almeno 6 *marker* (ciascuno dei quali presente in almeno 4 immagini), eccezion fatta per le prove P1 e P2.

La restituzione del modello 3D è consistita, invece, nella produzione di una nuvola densa di punti, nella creazione di una *mesh* poligonale e infine nell'applicazione della *texture* alla *mesh*.

In Tabella 4 sono mostrati i tempi di elaborazione dei modelli su Agisoft Photoscan; infatti, ai fini di una valutazione comparativa delle configurazioni elettro-ottiche (fra di loro e rispetto al *laser scanning*) in termini di efficienza operativa, è utile considerare anche questo aspetto. Il tempo necessario per il *focus stacking* non è invece riportato, in quanto trascurabile rispetto alla durata complessiva dell'elaborazione. È opportuno ricordare che l'intera procedura è stata eseguita su un Mac Pro, con un

processore 3.5 GHz 6-Core Intel Xeon E5, una RAM 64 GB 1866 MHz DDR3 ed una scheda grafica AMD FirePro D300 2048 MB.

6. RISULTATI OTTENUTI

6.1 Considerazioni sulle prove eseguite

Tutte le prove realizzate hanno portato alla restituzione di modelli 3D delle 3 repliche attraverso la fotogrammetria ed il *laser scanning*.

Per quanto riguarda le prove eseguite con la seconda tecnica, i modelli ottenuti sono caratterizzati da un'accuratezza geometrica dell'ordine del centesimo di millimetro (stando alle specifiche fornite dal produttore) e da un'elevata risoluzione nella resa delle alte frequenze, ma allo stesso tempo risultano privi di *texture*, come è possibile notare dal dettaglio del modello della tavoletta di Ebla riportato in Figura 4.



Figura 4. Dettaglio del modello della replica di Ebla ottenuto con il *laser scanner*

Nella Tabella 5 sono presenti alcuni dettagli relativi alla geometria dei modelli prodotti.

Replica	Numero di punti	Numero di facce	Volume di scansione
Pallina in CM	1687154	3374306	V1
Tavoletta di Damasco	3240532	6481060	V2
Tavoletta di Ebla	6767990	13536102	V1

Tabella 5. Geometria dei modelli prodotti con il *laser scanning*

Per quanto riguarda invece le prove condotte con la fotogrammetria (per le quali, in Figura 5, è riportato come esempio il modello della tavoletta di Ebla ottenuto con l'obiettivo 100 mm), queste consentono di ricavare numerosi spunti pratici e metodologici da mettere in atto anche in operazioni in sito.



Figura 5. Modello della tavoletta di Ebla - 100 mm (E1)

In primo luogo, è emersa la necessità di garantire un'illuminazione uniforme, ottenibile per mezzo di un set fotografico portatile e di un flash ad anello: i risultati ottenuti sono ottimali in termini di *texture*, sebbene, nel caso del modello della pallina ottenuto con l'obiettivo 100 mm, l'illuminazione dei

segni li abbia resi, di fatto, indistinguibili dalla superficie dell'oggetto. D'altro canto, l'assenza del flash ad anello nella prova P1 ha portato ad una *texture* meno omogenea (Fig. 6).



Figura 6. Problemi nella resa della *texture* - prove P2 e P1

Un ulteriore aspetto emerso con chiarezza dai test fotogrammetrici riguarda l'importanza della *stabilità alle vibrazioni* del setup sperimentale e della regolarità del *capturing scenario*, che forniscono maggiori garanzie in termini di risultato atteso, di qualità dei dati acquisiti e di rapidità di esecuzione delle prove.

Il tentativo di ricostruire gli oggetti nella loro interezza, inoltre, ha comportato la realizzazione di schemi di acquisizione tali per cui il *background* ed un eventuale supporto dovessero essere completamente esclusi dal processo di *image matching*; all'atto pratico, ciò è stato fatto modificando questi elementi, di volta in volta, sulla base del lato dell'oggetto da acquisire.

È stato inoltre ricavato un supporto semplice ed economico per assegnare una scala ai modelli fotogrammetrici da un blocchetto quadrangolare rivestito con della carta millimetrata.

I tre obiettivi testati possono essere confrontati sulla base di quattro aspetti:

1. qualità nella resa della *texture*;
2. durata di acquisizione ed elaborazione;
3. accuratezza geometrica dei modelli prodotti;
4. costo dell'obiettivo.

Per quanto concerne la resa della *texture*, è possibile affermare tramite un'analisi visiva (in assenza di un criterio quantitativo di valutazione di questo aspetto) che l'obiettivo macro 100 mm produce i risultati migliori, poiché caratterizzato da una risoluzione maggiore e per il fatto che può sfruttare appieno la condizione di illuminazione uniforme (diversamente, ad esempio, dal 18-55 mm rovesciato).

Dal punto di vista della durata di acquisizione, invece, l'obiettivo fisso 50 mm è nettamente il migliore, in quanto non richiede necessariamente la realizzazione di *stack* di immagini per il *focus stacking*, mentre il 18-55 mm *reverse mode* è estremamente oneroso, vista la limitatezza del campo di profondità (che comporta un numero elevato di immagini per *stack*) e del campo visivo, nonché l'elevata sensibilità alle vibrazioni.

La valutazione dell'accuratezza geometrica dei modelli 3D ottenuti tramite fotogrammetria è stata realizzata confrontando questi ultimi con quelli prodotti dal *laser scanner*, considerati affidabili sulla base dei valori di accuratezza e precisione nominali dichiarati dal costruttore. È evidente quindi come tale valutazione abbia riguardato esclusivamente i modelli fotogrammetrici già scalati.

Il confronto è stato svolto su CloudCompare: i modelli sono stati registrati, prima manualmente e poi automaticamente, tramite l'algoritmo *Iterative Closest Point*; è stata quindi calcolata la distanza fra i punti della nuvola densa relativa al modello fotogrammetrico ed i triangoli costituenti la *mesh* del modello corrispettivo ottenuto tramite *laser scanning*, seguendo la procedura descritta in (Ravanelli et al., 2018). La distribuzione delle distanze così calcolate è stata sintetizzata attraverso i

parametri media e deviazione standard, i quali sono riportati, per tutti i modelli, in Tabella 6 (a valore negativo della media corrisponde un modello fotogrammetrico mediamente più piccolo del riferimento).

Test ID	Distanza media	Deviazione standard
	(mm)	(mm)
P3	0.000 ¹	0.094
D1	0.078	0.077
D2	0.056	0.072
E1	0.124	0.163
E2	-0.275	0.128

Tabella 6. Accuratezza e precisione dei modelli fotogrammetrici scalati

Se confrontiamo i risultati ottenuti con gli obiettivi 50 mm (prove E2 e D2) e 100 mm (prove E1 e D1) per le tavolette di Ebla (E) e di Damasco (D), notiamo valori molto simili, in termini di ordine di grandezza: per la prima replica, statistiche (leggermente) migliori si ottengono con l'obiettivo macro (forse a causa della ricchezza di dettagli di dimensioni ridotte), mentre avviene il contrario per il secondo oggetto.

In generale, la precisione media ottenibile con la fotocamera Canon EOS 1200D è di circa 0.1 mm ed è inferiore alla precisione nominale del *laser scanner*; tale valore rappresenta il *noise* del modello, e non è migliorabile con una variazione di scala dello stesso.

Se consideriamo, infine, il costo degli obiettivi, il 18-55 mm ed il 50 mm sono paragonabili fra loro (circa 80 € il primo, circa 50 € il secondo) e molto più economici del 100 mm (il cui prezzo ammonta a circa 850 €).

6.2 Integrazione fra *laser scanning* e fotogrammetria

Sulla base delle prove condotte, si può affermare che l'informazione relativa alla *texture* è ottenibile esclusivamente tramite fotogrammetria, mentre dal punto di vista dell'accuratezza geometrica e dell'efficienza, il *laser scanning* offre standard più elevati.

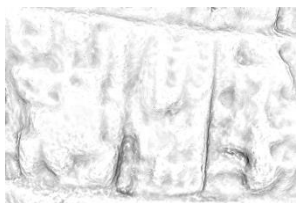


Figura 7. Dettaglio del modello della tavoletta di Ebla ottenuto con l'obiettivo 50 mm

Inoltre, quest'ultima tecnica è nettamente migliore in termini di risoluzione (o qualità nella ricostruzione delle alte frequenze) rispetto alla prima, come si può osservare dal confronto tra la Figura 7 e la Figura 4, che rappresentano il medesimo dettaglio, la prima per il modello della tavoletta di Ebla ottenuto con l'obiettivo 50 mm, la seconda per il modello ottenuto tramite *laser scanning*.

Come si è anticipato nell'introduzione, tuttavia, tutti gli aspetti appena menzionati concorrono in maniera determinante all'analisi dei reperti iscritti.

¹ Poiché la distanza media è significativamente minore della deviazione standard, avendo ottenuto questo risultato

Pertanto, è stata individuata una procedura realizzabile tramite il software commerciale Maya che consente di trasferire (con grande precisione) la *texture* dal modello fotogrammetrico al corrispettivo ottenuto tramite *laser scanning*, ottenendo un prodotto ottimale sotto tutti i punti di vista (accuratezza, *texture* e risoluzione). Tale procedura si basa sulla funzionalità *UV Mapping*, disponibile anche in Maya: l'*UV mapping* definisce una relazione fra la posizione di ogni triangolo che compone la *mesh* (rispetto ad un sistema di riferimento 3D) e la posizione dello stesso in un sistema di riferimento bidimensionale di coordinate (U, V). Questa proiezione (detta mappa UV) consente di assegnare ad ogni triangolo la *texture* della porzione di oggetto corrispondente (un esempio è mostrato in Figura 8).

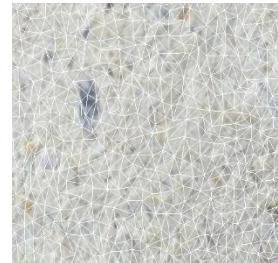


Figura 8. Dettaglio della mappa UV per la pallina (con relativa *texture*)

Tramite Maya, quindi, sono state assegnate la mappa UV e la *texture* dei modelli fotogrammetrici (generate automaticamente da Agisoft Photoscan) ai corrispondenti modelli ottenuti tramite *laser scanning*.

Tale procedura ha richiesto una registrazione preliminare dei modelli, conseguita su CloudCompare e realizzata anche per i modelli fotogrammetrici non scalati (associando alla registrazione una correzione di scala automatica del modello).

I modelli 3D ottenuti con questa strategia mostrano una sovrapposizione molto precisa fra *texture* e *mesh*, come si può vedere in (INSCRIBE, 2018b) e (INSCRIBE, 2018c).

L'unico caso in cui è stata osservata un'anomalia (molto modesta, a dire il vero) nella resa della *texture* riguarda l'*UV mapping* condotto a partire dal modello della pallina ottenuto con l'obiettivo 50 mm.

6.3 Miglioramento della riconoscibilità delle iscrizioni

Un contributo ulteriore all'analisi visiva ed automatica delle iscrizioni raffigurate dai modelli 3D è certamente offerto da alcuni strumenti che permettono di regolarne l'ombreggiatura, ovvero di simulare particolari condizioni di illuminazione o di assegnare una *texture* alla *mesh* sulla base di alcune caratteristiche geometriche della stessa.

In questo lavoro, in particolare, è stato valutato l'effetto di un filtro e tre *shader*, messi a disposizione da MeshLab, sulla riconoscibilità dei segni nei modelli prodotti con il *laser scanner*. Il primo strumento (*Algebraic Point Set Surfaces, APSS*) è un filtro che assegna un colore ai vertici della *mesh* sulla base della curvatura locale, stimata tramite regressione algebrica di una sfera (Guennebaud et al., 2007), (Guennebaud et al., 2008). La curvatura è una caratteristica strettamente legata alla rugosità di una superficie, pertanto può risultare effettivamente predittiva della reale riconoscibilità dei segni.

Il secondo strumento (*Depth Shader*) è uno *shader* che assegna un livello di grigio ad ogni punto del modello 3D, variabile

sperimentale non è stato ritenuto necessario fornire ulteriori cifre oltre il micron.

linearmente sulla base della sua maggiore o minore profondità rispetto alla scena visualizzata.

Il terzo (*DIMPLE*) è uno *shader* che simula l'ombreggiatura indotta da una fonte luminosa collocata in un punto a piacimento dello spazio da parte dell'utente.

Il quarto ed ultimo (*Radiance Scaling*) è uno *shader* che modifica l'intensità della luce riflessa sulla base della maggiore o minore concavità (o convessità) locale della superficie (Vergne et al., 2012).

Un esempio dell'effetto prodotto da tali strumenti è mostrato in Figura 9 e Figura 10.

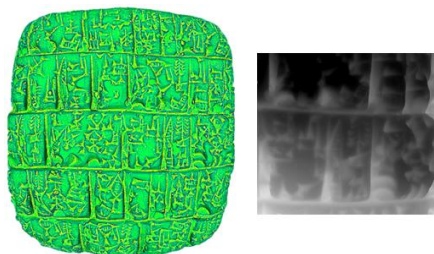


Figura 9. Effetto prodotto dal filtro *APSS* e dal *Depth Shader*

Stante l'obiettivo iniziale di migliorare la riconoscibilità dei segni, lo strumento migliore è risultato essere, senza dubbio, il *Radiance Scaling*. L'*APSS*, infatti, per quanto metta in risalto la curvatura, non contribuisce efficacemente allo scopo primario. Per quanto riguarda il *rendering* realizzato dagli altri due *shader*, esso non garantisce, in entrambi i casi, una risoluzione adeguata; per di più, la versione del *Depth Shader* implementata su MeshLab non consente una gestione fluida ed agevole del modello 3D.



Figura 10. Effetto prodotto da *DIMPLE* e *Radiance Scaling*

CONCLUSIONI

Fra i risultati del seguente lavoro, si possono menzionare:

1. la definizione di una procedura stabile per ottenere modelli 3D (di oggetti iscritti) accurati e con una buona restituzione della *texture*, basata sull'integrazione di modelli fotogrammetrici e ottenuti tramite *laser scanning*, nonché speditiva e replicabile in sito e per un numero elevato di reperti;
2. lo studio degli effetti del *focus stacking* sulla performance degli obiettivi macro, rilevando ottimi risultati in termini di accuratezza, a fronte di un incremento della durata di acquisizione;
3. un confronto in termini di accuratezza, resa della *texture* e costo, fra diversi obiettivi fotografici;
4. l'individuazione di uno *shader* (*Radiance Scaling*) in grado di far risaltare maggiormente le iscrizioni rispetto alla superficie del modello 3D, fatto che lo rende estremamente utile in vista di analisi visive o automatiche dei segni.

I risultati emersi sono particolarmente funzionali alla realizzazione degli obiettivi del progetto INSCRIBE, nonché, in generale, all'acquisizione ed allo studio di reperti archeologici che richiedano particolare accuratezza.

In futuro saranno realizzate nuove prove per estendere la procedura precedentemente descritta all'acquisizione di reperti costituiti da materiali lucidi o riflettenti, quali legno o metalli, e di reperti molto sottili, che costituiscono una parte importante del corpus da digitalizzare nell'ambito del progetto INSCRIBE e pongono ostacoli significativi all'applicazione dei metodi di acquisizione fotogrammetrico e tramite *laser scanning*.

Inoltre, per oggetti più grandi rispetto a quelli analizzati in questo lavoro si dovrà individuare un compromesso tra la risoluzione del sensore, al crescere della quale aumenta la leggibilità dei segni, e le dimensioni del modello, che minano la gestibilità dello stesso. Infine, dovrà essere definita una misura realmente predittiva della qualità della ricostruzione dei segni (come, ad esempio, la curvatura della superficie).

RINGRAZIAMENTI

L'autore è sinceramente grato alla Prof.ssa Silvia Ferrara, alla Dr. Ing. Roberta Ravanelli ed al Prof. Mattia Crespi per la disponibilità e per i preziosi consigli ricevuti durante la realizzazione di questo lavoro.

Si ringrazia inoltre la società VGER, per la realizzazione delle prove di scansione delle tre repliche con lo ScanRider 1.2.

Il progetto INSCRIBE è stato finanziato dal Consiglio europeo della ricerca (ERC), in base al Programma Quadro europeo per la Ricerca e l'Innovazione Horizon 2020 (convenzione di finanziamento No. 771127).

BIBLIOGRAFIA

- AUTODESK, 2019. Maya. <https://www.autodesk.it/products/maya/overview>. (Febbraio 2019).
- Clini, P., Frapiccini, N., Mengoni, M., Nespeca, R. and Ruggeri, L., 2016. SfM technique and focus stacking for digital documentation of archaeological artifacts. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- CloudCompare. <http://www.cloudcompare.org/>, 2018. (Novembre 2018)
- Gallo, A., Muzzupappa, M. and Bruno, F., 2014. 3D reconstruction of small sized objects from a sequence of multi-focused images. *Journal of Cultural Heritage* 15(2), pp. 173–182.
- Guennebaud, G., Germann, M., and Gross, M. 2008, Dynamic sampling and rendering of algebraic point set surfaces. *Computer Graphics Forum* (2008), vol. 27, Wiley Online Library, pp. 653-662.
- Guennebaud, G., Gross, M., 2007, Algebraic point set surfaces. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* (2007), vol. 26, ACM, p. 23.
- HeliconSoft, 2018a. Helicon Focus. <https://www.heliconsoft.com/heliconsoft-products/helicon-focus/>. (Novembre 2018).

- HeliconSoft, 2018b. Understanding the Focus Stacking Parameters. <https://www.heliconsoft.com/helicon-focus-main-parameters/>. (Novembre 2018).
- Hogton, S., 2018. Focus stacked reverse lens macro photogrammetry. <http://www.hogton.com/focus-stack-reverse-lens-macro-photogrammetry/>. (Novembre 2018).
- INSCRIBE, 2018a. <https://site.unibo.it/inscribe/en>.
- INSCRIBE, 2018b. Cypro-Minoan inscribed clay ball replica. <https://www.youtube.com/watch?v=Ifq8TELM2g>. (Dicembre 2018).
- INSCRIBE, 2018c. Replica of cuneiform tablet. <https://www.youtube.com/watch?v=jIFW3Qjpcx0>. (Dicembre 2018).
- Lastilla, L., Ravanelli, R., Ferrara, S., 2019a. 3D high-quality modeling of small and complex archaeological inscribed objects: relevant issues and proposed methodology. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W11, pp. 699-706.
- Lastilla, L., Ravanelli, R., Ferrara, S., 2019b. Investigation on methodologies for 3D high-quality modeling of small archaeological objects. Report on first INSCRIBE results.
- Kontogianni, G., Chliverou, R., Koutsoudis, A., Pavlidis, G., Georgopoulos, A., 2017. Enhancing close-up image based 3D digitisation with focus stacking. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Mallison, H., 2018. How to handle a project in Agisoft Photoscan. <https://dinosaurpalaeo.wordpress.com/2015/10/11/photogrammetry-tutorial-11-how-to-handle-a-project-in-agisoft-photoscan/>. (Novembre 2018).
- MeshLab. <http://www.meshlab.net/>, 2019. (Febbraio 2019).
- Ravanelli, R., Lastilla, L., Nascetti, A., Di Rita, M., Nigro, L., Montanari, D., Spagnoli, F., Crespi, M., 2018. 3D modelling of archaeological small finds by the Structure Sensor range camera: comparison of different scanning applications. *Applied Geomatics* 10(4), pp. 399-413.
- Ravanelli, R., Nascetti, A., Crespi, M., 2016. Kinect V2 and RGB stereo cameras integration for depth map enhancement. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 5, pp. 699-702.
- Remondino, F., Guarnieri, A., Vettore, A., 2005. 3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning? In: Videometrics VIII, Vol. 5665, *International Society for Optics and Photonics*, p. 56650M.
- Vergne, R., Pacanowski, R., Granier, X., Reuter, P. Enhancing surface features with the radiance scaling meshlab plugin. In *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) 2012* (2012), vol. 2, Amsterdam University Press, pp. 417-421.

Replica	Sensore e obiettivo	Test ID	Numero di immagini	Immagini risultanti da <i>focus stacking</i>	Durata di acquisizione	Scala
Pallina	Canon – 18-55 mm <i>reverse mode</i>	P1	106	106/106	8 h 20 min	No
	Canon – 100 mm	P2	64	64/64	2 h	No
	Canon – 50 mm	P3	80	0/80	19 min	Sì
Tavoletta di Damasco	Canon – 100 mm	D1	67	67/67	1 h 57 min	Sì
	Canon – 50 mm	D2	72	28/72	37 min	Sì
Tavoletta di Ebla	Canon – 100 mm	E1	121	121/121	3 h 5 min	Sì
	Canon – 50 mm	E2	61	23/61	48 min	Sì

Tabella 3. Dettagli relativi alle prove di restituzione dei modelli 3D tramite fotogrammetria

Replica	18-55 mm <i>reverse mode</i>	100 mm	50 mm
	Tempo di elaborazione		
Pallina	1 h 34 min 50 s	29 min 55 s	10 min 8 s
Tavoletta di Damasco	×	59 min 35 s	34 min 18 s
Tavoletta di Ebla	×	1 h 57 min 2 s	19 min 59 s

Tabella 4. Tempo di elaborazione su Agisoft Photoscan