

## L'impiego della Computer Vision nella ricostruzione 3D dei beni culturali: i Bronzi di Riace

Vincenzo Barrile <sup>(a)</sup>, Vincenzo Gelsomino <sup>(a)</sup>, Domenicantonio Lamari <sup>(b)</sup>, Paolo Sensini <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Laboratorio di Geomatica, DICEAM, Università Mediterranea di Reggio Calabria, 89123 Feo di Vito, Reggio Cal.  
vincenzo.barrile@unirc.it, ing.gelsomino@gmail.com

<sup>(b)</sup> antonio.lamari@gmail.com, paolo.sensini@gmail.com

### Riassunto

I Bronzi di Riace sono due statue di bronzo databili al V secolo a.C. custodite presso il Museo Archeologico Nazionale della Magna Grecia di Reggio Calabria. Esse, sin dal loro ritrovamento avvenuto nelle acque di Riace Marina (RC) nel 1972, rappresentano uno dei più significativi capolavori scultorei dell'arte greca e sono note in tutto il mondo per la loro eccezionale fattura. Oltre ad essere contraddistinti da uno straordinario realismo, i Bronzi sono divenuti nel tempo un simbolo della città stessa che li ospita. Nel corso degli anni sono state effettuate numerose ricerche sia in ambito storico che scientifico, finalizzate allo studio della loro natura e all'implementazione di migliori tecniche per la manutenzione e il restauro. Nella presente nota viene descritta la metodologia per la realizzazione di un modello tridimensionale delle due statue condotta dal Laboratorio di Geomatica, appartenente al DICEAM dell'Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria. La modellazione 3D realizzata si basa sull'uso delle tecniche *imaging*, quali fotogrammetria digitale e *computer vision*. Le immagini digitali acquisite, su autorizzazione del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo e del Museo Archeologico Nazionale di Reggio Calabria, sono state successivamente elaborate mediante *software* commerciale Agisoft PhotoScan. I risultati ottenuti denotano la bontà della tecnica utilizzata nel campo dei beni culturali, valida alternativa a tecniche più costose e impegnative come il *laser scanning*.

### Abstract

The Riace Bronzes are two full-size bronzes cast about V century BC, located at the Museo Archeologico Nazionale della Magna Grecia in Reggio Calabria. Since their discovery in the coast of Riace Marina (RC) in 1972, they represent one of the most significant sculptural masterpieces of the Greek art in the world, thanks to their outstanding manufacture. Besides being noted for their extraordinary reality, the Bronzes have become one of the most important symbols of their hosting city. Over the years a lot of studies have been done both in historic area and scientific field, aimed at implementing technical improvements for their maintenance and restoration. This paper describes the methodology for the realization of a 3D model of the two sculptures lead by the Geomatics Laboratory of the DICEAM of the Mediterranean University of Reggio Calabria. The 3D modeling is based on the use of imaging techniques, as digital photogrammetry and computer vision. The digital pictures obtained, with the authorization of the Ministry of Cultural Heritage and Activities and Tourism and of the Museo Archeologico Nazionale della Magna Grecia, have been then elaborated through the commercial software Agisoft PhotoScan. The results achieved denote the effectiveness of the technique used in the cultural heritage field, an acceptable alternative in relation to more expensive and demanding techniques as laser scanning.

### Introduzione e note storiche

Numerosi sono gli esempi presenti in letteratura riguardo la digitalizzazione del patrimonio culturale. L'avvento del *laser scanner* ha rappresentato una soluzione incredibilmente versatile per

l'acquisizione di enormi quantità di dati con tempi di acquisizione notevolmente ridotti garantendo sempre altissime precisioni. Tale tecnologia è stata ampiamente utilizzata anche in campo archeologico. Recentemente si è affermata una tecnica di ricostruzione degli oggetti nella forma e nelle dimensioni, che, partendo da due immagini fotografiche riprese da due punti diversi, riesce ad ottenere un modello 3D metrico dell'oggetto rilevato. Questa tecnica prende il nome di stereofotogrammetria digitale, la quale negli ultimi anni è stata combinata alla *computer vision*. In questo documento viene descritta una procedura di acquisizione e modellazione 3D dei Bronzi di Riace basata su scatti fotografici.

I Bronzi vennero scoperti nell'agosto del 1972 in un tratto del mar Jonio antistante il comune di Riace Marina in provincia di Reggio Calabria da un appassionato subacqueo romano, Stefano Mariottini, durante un'immersione a circa 200 m dalla costa ed alla profondità di 8 m (Figura 1).

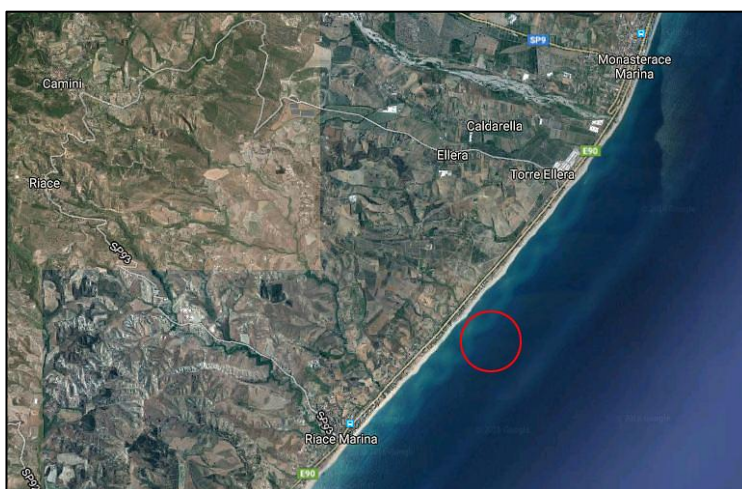


Figura 1 – Zona di ritrovamento

I due Bronzi (Figura 2), anche se in tal senso non vi è unanimità di vedute, vengono fatti risalire al V° secolo a.C. e sono, quasi certamente, opere originali dell'arte greca. Tuttavia, studiando i materiali e la tecnica di fusione, vi è una indubbia differenza tra le due statue. Cosa, questa, che li farebbe attribuire ad artisti differenti o realizzazioni in epoche distinte oppure dal medesimo artista in luoghi differenti. Le prime teorie formulate da W. Fuchs, risalenti alla fine degli anni '70 primi anni '80, ipotizzano che le due statue appartenessero al donario degli Ateniesi a Delfi, e che fossero opera di Fidia. Lo storico d'arte greca e romana Paolo Moreno, effettuando nuovi e più approfonditi studi su documenti storici e sulla terra di fusione, ha formulato una nuova teoria secondo la quale il Bronzo "A", il giovane, raffigurerebbe Tideo, un feroce eroe dell'Etolia, figlio del dio Ares e protetto dalla dea Atena; il Bronzo "B", il vecchio, riprodurrebbe, invece, Anfiarao, il profeta guerriero che profetizzò la propria morte sotto le mura di Tebe. Da questa ipotesi si può pensare che l'autore del bronzo "A", Tideo il giovane, molto assomigliante alle decorazioni presenti nel tempio di Zeus a Olimpia, sia Agelada, uno scultore di Argo che lavorava presso il santuario di Delfi verso la metà del V secolo a.C. Per il Bronzo "B", Anfiarao il vecchio, Moreno, conferma l'ipotesi dell'archeologo greco Georghios Dontàs affermando che a scolpirlo fu Alcamene, originario di Lemno, onorato di cittadinanza ateniese per la sua bravura artistica. Le due statue, con molta probabilità, furono realizzate ad Atene e poi imbarcate per essere portate a Roma ma, presumibilmente, la barca che le trasportava affondò e finirono in mare. Secondo l'archeologo Daniele Castrizio le due statue sarebbero l'originale del gruppo statuario di Eteocle e Polinice, opera di Pitagora di Reggio; il Bronzo A, il giovane, potrebbe raffigurare Polinice mentre, il Bronzo B, il vecchio, sarebbe invece Eteocle. Secondo i segni presenti sulle due statue si può argomentare che gli elementi che sicuramente facevano parte dell'iconografia sono: l'elmo di tipo corinzio, lo scudo e la lancia da oplita.



Figura 2 – Bronzo A (sx) e Bronzo B (dx)

### Rilievo e ricostruzione dei modelli

Il principio su cui si basa la tecnica di *Structure from Motion* (SfM) ricalca quanto avviene per la fotogrammetria stereoscopica dove, la generazione della struttura 3D, viene definita e risolta attraverso la sovrapposizione di immagini. Diversamente da quanto avviene per la fotogrammetria tradizionale, la ricostruzione della scena con il posizionamento e l'orientamento della telecamera vengono automaticamente risolti dal *software* utilizzato. Non vi è, così, la necessità di specificare a priori punti notevoli o *target* presenti nelle immagini acquisite. Questi vengono individuati e risolti automaticamente dal *software* che si basa su una campagna fotografica composta da prese multiple con sovrapposizione delle immagini della scena da acquisire. Questa tecnica è particolarmente efficace quando gli scatti fotografici risultano costituiti da un insieme di immagini con elevato grado di sovrapposizione tale da permettere una ricostruzione tridimensionale completa della scena acquisita. Sviluppata negli anni '90 trae le sue origini dalla *computer graphics* e, nonostante le enormi potenzialità del sistema, ad oggi non ha ancora trovato ampio utilizzo nell'ambito della geomatica. Di seguito verrà descritto il flusso di lavoro necessario per l'ottenimento di una nuvola densa e del modello tridimensionale.

La prima operazione consiste nell'identificare e nell'estrarre dei punti notevoli presenti in ogni fotografia scattata. Ciò avviene mediante l'utilizzo di un algoritmo implementato da D. Lowe nel 2004 definito SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*). Grazie a questo algoritmo vengono, dapprima, individuati i punti omologhi presenti negli scatti mediante operatori di interesse, successivamente, mediante l'utilizzo di descrittori di immagine, saranno scelti, fra i punti omologhi individuati, quelli che si discostano meno l'uno dall'altro. Oltre a valori intrinseci (quali illuminazione, colore, rotazione, ecc.) i punti omologhi vengono ricercati all'interno di particolari zone della scena inquadrata: angoli oppure zone dove si riscontrano maggiormente elementi di discontinuità. Individuati i punti omologhi questi vanno accoppiati. Ciò avviene attraverso il loro *matching*. In questa fase è fondamentale valutare la somiglianza tra vari punti individuati. A tal fine si utilizza il concetto di distanza euclidea. Individuato un punto nella prima scena avente determinate caratteristiche (luminosità, colore, ecc.), l'omologo nella scena successiva risulta essere quello che maggiormente si avvicina a quello in esame. Risulta, inoltre, determinante l'impiego della geometria epipolare per definire i vincoli geometrici che legano i punti omologhi individuati negli scatti raffiguranti la stessa scena. Nella fase successiva si procede alla generazione del modello in 3D. Per far ciò vengono individuati i parametri di orientamento interno della camera

utilizzata per le prese. L'individuazione avviene tramite le corrispondenze già individuate (punti omologhi e geometria epipolare). In questa fase il controllo e la limitazione degli errori avviene tramite il “*bundle adjustment*”. Ultima fase è la generazione del modello attraverso una nuvola densa. Qui vengono utilizzati gli algoritmi di *dense image matching*. Vengono distinti in due tipi, algoritmi di *area based matching* (AMB) che lavorano sul confronto statistico dell'intensità di grigio presente nelle varie foto e che non prevedono l'estrazione delle *feature* trattando, appunto, l'intensità del grigio; e algoritmi di *feature based matching* (FBM) che prima ricercano le *feature* comuni e successivamente eseguono l'estrazione. La combinazione di entrambi garantisce risultati ottimali ma allunga notevolmente i tempi di elaborazione. Risultano essere di fondamentale importanza le metodologie di scatto delle fotografie. Va ricordato che i sistemi di ricostruzione da foto restituiscono un modello che in proporzione è corretto ma non risulta essere in scala. La nuvola di punti così ottenuta non risulta essere georiferita ma rappresentata in un sistema locale. Occorre, quindi, passare da un sistema di coordinate spaziali ad un sistema di coordinate assolute. Ciò avviene individuando un numero congruo di punti di controllo a terra di coordinate note e riconducibili all'interno della nuvola ottenuta attraverso la ricostruzione SfM. Di seguito verranno illustrati i passi necessari per generare una nuvola di punti densa attraverso tecniche di SfM.

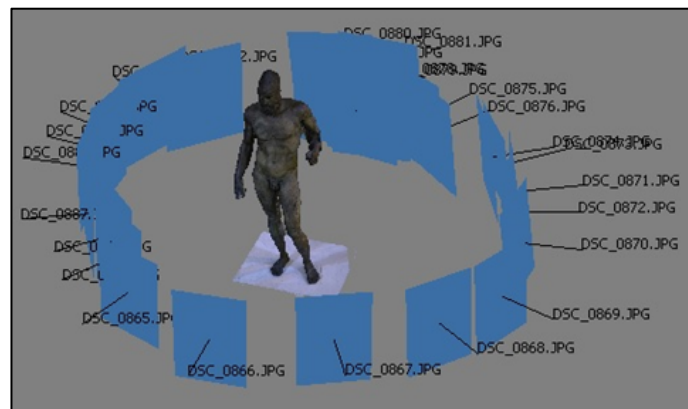


Figura 3 – Scatti fotografici e modello restituito

La tecnica *Structure from Motion* viene utilizzata in diverse applicazioni tra le quali *il reverse engineering* e, negli ultimi tempi, applicazioni legate all'ambiente UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Il *software* utilizzato per questo studio è PhotoScan prodotto dalla Agisoft LLC di San Pietroburgo (Russia) che permette la generazione di nuvole dense, di *mesh* e di *texture*. Agisoft PhotoScan è un *software* commerciale a basso costo che consente di ottenere un modello 3D di alta qualità. Il flusso di lavoro è completamente automatico sia per quanto riguarda l'orientamento delle immagini sia per la generazione e ricostruzione del modello. Il modello generato può essere esportato per essere gestito ed eventualmente trattato con *software* esterni. Tutti i processi possono essere eseguiti con vari livelli di precisione e diversi parametri possono essere impostati al fine di migliorare il risultato finale. Per il lavoro in esame è stato utilizzato PhotoScan installato su una *Workstation* HP Z800 con CPU 2 x Xeon Hexa Core X5650 RAM 64 GB 128GB SSD Hard Disk aggiuntivo da 2TB equipaggiata con due schede video NVIDIA Quadro FX 4800 con 1,5 GB di RAM ciascuna e con sistema operativo Windows 7 Professional a 64 bit. Il flusso di lavoro è completamente automatico sia per quanto riguarda l'orientamento delle immagini sia per la generazione e ricostruzione del modello. Questa condizione ha portato ad una ottimizzazione dei tempi di elaborazione garantendo buone prestazioni del complesso macchina/*software*. L'acquisizione delle immagini è stata condotta utilizzando una fotocamera digitale *reflex* Nikon D3100 equipaggiata con un obiettivo *zoom* ultra-compatto AF-S DX Zoom-Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6 G ED II in seguito all'autorizzazione alle riprese da parte del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo – Museo Archeologico di Reggio Calabria con Prot. N. 175 del 19/06/2015. Le immagini ottenute hanno dimensioni di 4608 x 3072 *pixel*, una risoluzione di 300 dpi e una

profondità del colore pari a 24 bit (Figura 3). Sono state salvate in formato .jpeg, formato supportato dal *software* utilizzato nella prova.

Le fasi dell'elaborazione sono state le seguenti:

1. *Align photos* (allineamento foto) consistente nell'individuare i punti di legame attraverso l'uso di operatori di interesse. I punti scelti nelle diverse foto devono avere delle caratteristiche in comune per poter essere adeguatamente sovrapposti. Per una buona riuscita la qualità dell'immagine deve essere elevata, bisogna avere poche zone d'ombra e una adeguata illuminazione;
2. *Build Dense Cloud* (nuvola densa). Attraverso questa fase viene costruita una nuvola densa utilizzando gli algoritmi di *dense image matching*. Questi si suddividono in algoritmi che usano una stereo coppia per trovare le corrispondenze (*stereo matching*) e quelli che invece le identificano in multiple immagini (*multi-view stereo*);
3. *Build mesh*, che consiste nel generare un modello poligonale sulla base della nuvola densa appena creata. La *mesh* è una suddivisione di un solido in solidi più piccoli di forma poliedrica;
4. *Build texture*, permette invece di ottenere la rappresentazione in 3D dell'opera sotto indagine.

Le immagini sono state scattate seguendo la tecnica degli assi convergenti ed il loro numero è riportato nella tabella riepilogativa (Tabella 1).

<i>Soggetto</i>	<i>N° Foto</i>	<i>N° Punti Nuvola Rada</i>	<i>N° Punti Nuvola Densa</i>	<i>N° Facce</i>	<i>N° Vertici</i>	<i>Tempo di rilievo</i>	<i>Tempo di elaborazione</i>
Bronzo A	142	582091	10759713	1500000	752141	0,45 h	8,54 h
Bronzo B	178	806360	12588170	1500000	752626	0,51 h	12,00 h

Tabella 1 – Riepilogo dei dati di elaborazione



Figura 4 – Nuvola rada, mesh e texture della testa del Bronzo B

Il modello ottenuto utilizzando la SfM, contiene tutte le informazioni metriche utili alle successive analisi e verifiche strutturali, (Figure 4, 5 e 6). Lo stesso è stato, quindi, importato in ambiente Rhinoceros v.5 all'interno del quale è possibile in dettaglio analizzare tutte le proprietà geometriche dell'elemento importato ottenendo, con semplici comandi automatici, le sezioni ed i prospetti oltre a tutte le possibili viste 3D.

### Confronto dei risultati

Al fine di validare, in termini di precisione e accuratezza dei risultati, quanto ottenuto mediante l'uso del *software* commerciale Agisoft PhotoScan (modello a “basso costo”), è stato realizzato un altro modello tridimensionale metrico dei Bronzi utilizzando una tecnica fotogrammetrica rigorosa, con tre fotocamere Nikon Coolpix S2600, già nota in letteratura (Pozzoli, Mussio, Scaioni, 2004). La metodologia adottata permette di ricavare i parametri per l'orientamento relativo e assoluto delle

immagini riprese in modo automatico. In particolare, vengono stimati i valori preliminari per l'orientamento relativo simmetrico (risolvendo un elevato numero di equazioni lineari ed esplorando le possibili configurazioni spaziali) ed i parametri per l'orientamento assoluto attraverso una semplice sostituzione di variabili, tale da poter trasformare il problema da non lineare a lineare, (Figura 7).



Figura 5 – Mesh e texture del Bronzo A

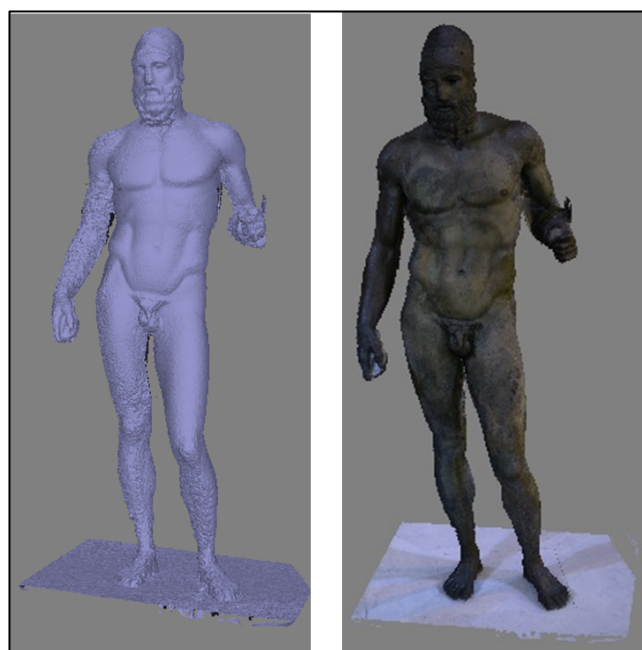


Figura 6 – Mesh e texture del Bronzo B

Il modello ottenuto mediante la metodologia rigorosa fotogrammetrica è stato confrontato con il modello ottenuto mediante tecnica speditiva a “basso costo” *imaging* da *computer vision* riscontrando in termini di accuratezza, stima dei principali parametri di orientamento fotogrammetrico, precisione dei risultati una sostanziale comparazione delle due tecniche di ricostruzione dei modelli tridimensionali. A tal proposito si osservi la Figura 8 relative ai confronti tra le due tecniche in termine di precisioni ottenute fissando dei *target* posizionati sulle basi delle due sculture bronzee.

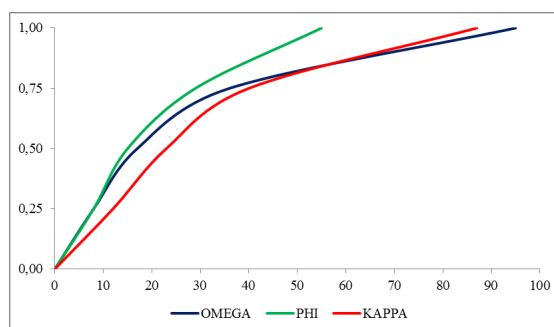


Figura 7 – Risultati dell'orientamento assoluto relativi alla tecnica fotogrammetrica rigorosa

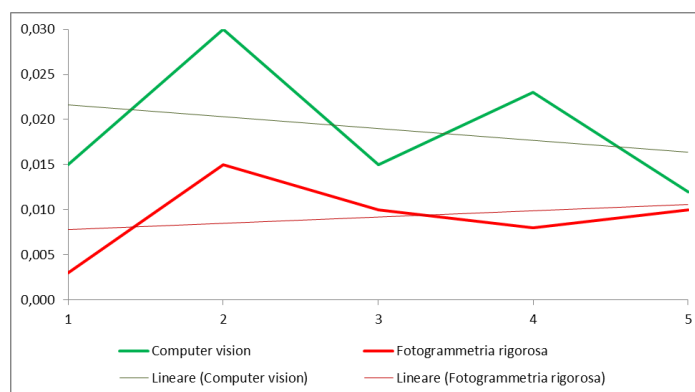


Figura 8 – Confronto dei risultati ottenuti dalle due tecniche

### Sperimentazione di un modello 3D termico

Al fine di investigare ancora più dettagliatamente la fattura delle due note sculture bronzee, si è sperimentato una prima ricostruzione di un modello 3D da immagini termiche effettuata utilizzando la tecnica SfM. La prova ha avuto luogo su una statuetta in lega di piombo (emissività pari a 0,28) con evidenti segni di degradazione. Il procedimento eseguito è stato il medesimo di quello che ha portato alla realizzazione dei modelli 3D dei due Bronzi, ma le immagini sono state acquisite mediante termocamera ad alta risoluzione FLIR P620 con bolometro miniaturizzato (sensore infrarossi) sensibile alla radiazione infrarossa LWIR detta di onda lunga (7-13 micrometri) e frequenza di acquisizione delle immagini pari a 30 Hz. La termocamera è una particolare videocamera, sensibile alla radiazione infrarossa, capace di ottenere immagini o riprese termografiche. Tutti i corpi che abbiano una temperatura superiore allo zero assoluto ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) emettono radiazione elettromagnetica in dipendenza dalla propria temperatura; dalla misura della radiazione emessa da un corpo può quindi essere ricavata la sua temperatura senza alcun contatto. Ciò la rende un valido strumento tra i possibili controlli non distruttivi (CND), insieme di prove fisiche concepite allo scopo di indagare sull'eventuale presenza di difetti (cricche) in un oggetto, senza doverlo distruggere tutto o in parte rendendolo inutilizzabile.

La ricostruzione del modello 3D termica è stata resa possibile mediante la combinazione e l'elaborazione integrata degli scatti (nel visibile e nell'infrarosso) della termocamera utilizzata (Figura 9). Tuttavia la scarsa qualità delle immagini nel visibile si ripercuote nella realizzazione del modello 3D relativo. Ciò non compromette la riuscita del modello 3D termico, rendendo interessante la prova su ulteriori modelli come i due Bronzi.

### Conclusioni

Sulla base dei risultati fino ad ora ottenuti può essere affermato che l'approccio SfM ha i suoi punti di forza nella rapidità, nel basso costo e nella procedura altamente automatizzata per la produzione di modelli 3D. I tempi di elaborazione risultano influenzati notevolmente dalla potenza di calcolo a disposizione. La tecnica è stata appositamente studiata per ottenere risultati ottimali nel minor

tempo pur mantenendo bassi i costi. L'acquisizione diretta del modello all'interno di un *software* strutturale consente di avere a disposizione, per le successive analisi, un modello strutturale corrispondente esattamente al Bene indagato. Inoltre, l'integrazione della tecnica con altre tipologie di acquisizione di immagini (per esempio l'infrarosso) può aprire nuove frontiere nel campo delle prove non distruttive.

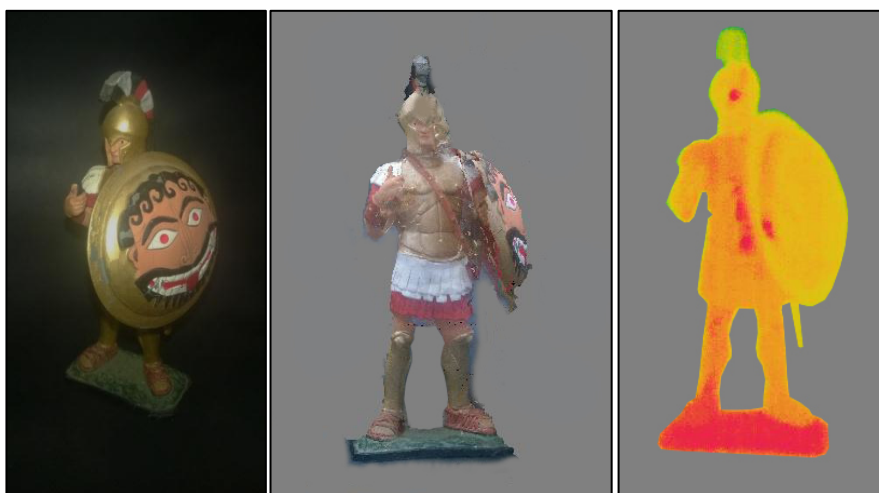


Figura 9 – Foto, texture visibile e texture termica della statuetta

## Bibliografia

- Angela A. (2014), *I bronzi di Riace. L'avventura di due eroi restituiti dal mare*, Rizzoli
- Barrile V, Bilotta G, Lamari D, Meduri G.M, Monardi Tringadi U, Ricciardi A. (2015), “Computer Vision/Structure for Motion per la Diffusione dei Beni Culturali”, *Atti Della XIX Conferenza Nazionale Asita*, P. 51-60, Milano
- Barrile V, Critelli M, Lamari D, Meduri G.M, Pucinotti R, Ricciardi A. (2015) “Applicazione di Sistemi di Scansione 3D e Fotogrammetrici al caso dei Beni Culturali”, *Atti 16° Convegno Aipnd Milano* 21-23 Ottobre 2015
- Barrile V, Meduri G.M, Bilotta G. (2015). “Integration of TLS and Thermography for the Morphometric Characterization”, *International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol. 9, P. 110-114, Issn: 2074-1308
- Bolognesi M, Furini A, Russo V, Pellegrinelli A, Russo P. (2014), “Accuracy of cultural heritage 3D models by RPAS and terrestrial photogrammetry”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5: 113-119
- Fonstad M.A, Dietrich J.F, Courville B.C, Jensen J.L, Carbonneau P.E (2013), “Topographic structure from motion: a new development in Photogrammetric measurement”, *Eart. Surf. Process. Landforms*, 38: 421-430
- Pozzoli A, Mussio L. (2003), “Quickly solutions particularly in close range photogrammetry”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIV, part 5W12, pp. 273-8
- Pozzoli A, Mussio L, Scaioni M. (2004), “A solution for the general case of three-image orientation”, *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXV, part B3, pp. 992-997
- Remondino F, El-Hakim S.F, Gruen A, Zhang L. (2008), “Turning images into 3-D models”, *IEEE Signal Processing Magazine*, 25: 55-65
- Remondino F, Menna F. (2008), “Image-based surface measurement for close-range heritage documentation”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37: 199-206
- Vlad Borrelli L, Pelagatti P. (1984), *Due Bronzi da Riace, Rinvenimento, restauro, analisi e ipotesi di interpretazione*, I-II, Bollettino d'Arte, Serie speciale, III, Roma