



*Alessandro Nocentini*  
**La Stele etrusca di Vicchio**  
metodologie di rilievo per un'iscrizione da svelare



Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXVIII - Novembre 2016



Università degli Studi di Firenze  
Dipartimento di Architettura DIDA  
Dottorato di Ricerca in Architettura - Curriculum Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente

Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Architettura DIDA  
Dottorato di Ricerca in Architettura - Curriculum Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente  
Settore disciplinare ICAR 17

Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXVIII - Novembre 2016

*Alessandro Nocentini*

**La stele etrusca di Vicchio**  
**metodologie di rilievo per un'iscrizione da svelare**



Università degli Studi di Firenze  
Dottorato di Ricerca in Architettura  
Coordinatore, Maria Teresa Bartoli

Curriculum in 'Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente'  
XXVIII Ciclo – Settore disciplinare ICAR 17  
Coordinatore di Curriculum, Barbara Aterini

<i>Dottorando</i> <b>Alessandro Nocentini</b>	<b><i>Dottorato in Architettura, Università degli Studi di Firenze</i></b>
<i>Tutor</i> Barbara Aterini <i>Co-Tutors</i> Grazia Tucci P. Gregory Warden	<i>Coordinatore</i> Maria Teresa Bartoli <i>Coordinatore di Curriculum</i> Barbara Aterini  Firenze, 29 novembre 2016

## La stele etrusca di Vicchio metodologie di rilievo per un'iscrizione da svelare

### Indice

<i>Premessa</i>	6		
<b>1. Introduzione</b>	11	<b>3. Sistemi di acquisizione image-based: l'approccio fotogrammetrico</b>	45
1.1 Approccio al rilevamento: linguaggio per l'esperienza conoscitiva	11	3.1 Storia della fotogrammetria	45
1.2 Tra mimesi, significato e realtà	12	3.2 Metodologia, tipologia e campi d'impiego	52
1.3 Definizione di Patrimonio e Beni Culturali: realtà dinamica e testimonianze da conservare	13	3.3 Fotogrammetria digitale	54
1.4 Documentazione del Patrimonio Culturale	15	3.4 Principi fondamentali della tecnica fotogrammetrica	55
1.5 Dal rilievo metrico al modello digitale 3D	17	3.5 Pipeline di modellazione fotogrammetrica	59
1.6 Registrazione tridimensionale: attività chiave nella gestione dei Beni archeologici	19	3.5.1 Calibrazione della fotocamera e orientamento delle immagini	59
1.7 Gestione dei Beni archeologici: progetto interdisciplinare	21	3.5.1.1 Calibrazione geometrica della fotocamera	59
1.8 Organizzazione della ricerca: obiettivi e finalità	22	3.5.1.2 Orientamento delle immagini	63
<b>2. Sistemi di rilevamento per l'archeologia</b>	33	3.5.2 Misure e restituzione fotogrammetrica 3D	63
2.1 Rilevamento archeologico	34	3.5.3 Generazione del modello poligonale	64
2.2 Metodologie e strumenti di rilievo per la costruzione dei modelli 3D	36	3.5.4 Texture mapping e visualizzazione	66
		3.6 Integrazione con la Computer Vision	68
		3.7 Tecnica Structure from Motion	70

<b>4. Sistemi di acquisizione range-based: sensori ottici attivi</b>	89	4.7.2 Allineamento basato su features naturali (ICP)	107	5.1.7 Ruolo della donna	147
4.1 Storia dei sensori attivi	89	4.7.3 Allineamento basato su sensori complementari	109	5.2 Ritrovamento della Stele iscritta	149
4.2 Tecnologia e principi di funzionamento	90	4.8 Generazione del modello poligonale	109	<b>6. Stele di Vicchio: management del progetto di documentazione</b>	161
4.3 Sensori a triangolazione	91	4.8.1 Generazione della mesh da nuvole di punti strutturate	109	6.1 Scelta metodologica: dall'intervento di restauro al progetto di rilievo 3D	161
4.3.1 Scanner laser a triangolazione: piano luminoso singolo	93	4.8.2 Generazione della mesh da nuvole di punti non strutturate	110	6.2 Costruzione del modello 3D della stele prima del restauro	165
4.3.2 Scanner a proiezione di pattern: piani luminosi multipli	94	4.9 Fase di modifica e ottimizzazione	110	6.3 Costruzione del modello 3D della stele dopo il restauro	171
4.4 Sensori distanziometrici	95	4.10 Texture mapping e visualizzazione	111	6.4 Verifica e analisi dei risultati: la lettura delle iscrizioni	181
4.4.1 Scanner laser a tempo di volo (PW)	98	<b>5. Insediamento etrusco a Poggio Colla</b>	125	<b>7. Conclusioni</b>	189
4.4.2 Scanner laser a differenza di fase (CW)	98	5.1 Cronologia e orientamento del santuario	125	<b>Bibliografia</b>	193
4.4.3 Scanner laser FM-CW	99	5.1.1 Sviluppo fra VII e II secolo a.C.	129	<b>Ringraziamenti</b>	203
4.5 Caratterizzazione metrologica degli scanner 3D	100	5.1.2 Rituale e contesti votivi	133	<b>Abstract</b>	204
4.5.1 Risoluzione geometrica	100	5.1.3 Interpretazione dei depositi	139		
4.5.2 Accuratezza	101	5.1.4 Ritrovamenti	144		
4.5.3 Precisione e incertezza di misura	102	5.1.5 Ceramiche	145		
4.6 Acquisizione e processamento dei dati	103	5.1.6 Statuette di bronzo	145		
4.7 Allineamento delle nuvole di punti	106				
4.7.1 Allineamento basato su target di riferimento	106				

## Premessa

L'efficace collaborazione fra archeologi ed architetti si è da sempre posta lo scopo di integrare le reciproche conoscenze mettendo al servizio dell'archeologia la scienza della rappresentazione, quale mezzo indispensabile per operare nel mondo della ricerca scientifica. Proprio da tale ambito scaturisce l'esperienza affrontata dalla presente tesi, dove il rilevamento è il primo veicolo grazie al quale è possibile aggiungere tessere al mosaico conoscitivo sulle culture antiche.

Il lavoro di studio svolto durante il percorso del ciclo dottorale si è così arricchito attraverso una sempre più stretta collaborazione all'interno dell'accordo internazionale di ricerca stipulato fra il Dipartimento di Architettura DIDA dell'Università di Firenze (responsabile prof.ssa Barbara Aterini), la Soprintendenza Archeologica della Toscana ed il *Mugello Valley Archaeological Project* (MVAP). L'attività, in particolare, che quest'ultimo consorzio internazionale di università americane ed europee, diretto dall'archeologo prof. Gregory Warden, conduce da oltre vent'anni presso il sito etrusco di Poggio Colla ha costituito il campo d'applicazione entro cui poter maturare l'esperienza e svolgere la ricerca raccontata nella presente tesi. In virtù del formidabile sviluppo della tecnologia applicata nel settore del Patrimonio Culturale, e soprattutto in Archeologia, si sono dunque realmente testate le potenzialità del rilievo tridimensionale, sia come nuove opportunità sfidanti le metodologie tradizionali di riferimento che come nuove forme d'indagine nel processo conoscitivo riguardo alle vicende, ai costumi, alle forme, alle tecniche che hanno caratterizzato la vita etrusca nell'insediamento di Poggio Colla. A partire da reperti quali statuine, brocche, oggetti di medio-piccole dimensioni, fino alle stesse aree di scavo, gli interventi di restituzione 3D eseguiti mediante fotogrammetria digitale e sistemi a scansione sono stati finalizzati a documentare la realtà nel miglior modo possibile soprattutto dove l'esportazione del materiale *in*

*situ*, via via che procedono gli scavi, scopre sempre nuove conformazioni, cancellando irrimediabilmente parte del precedente evidenziato e rimandando al rilievo quale unica testimonianza di ciò che non esiste più. D'altronde i siti archeologici, dopo la fine della campagna di scavi, spesso diventano inaccessibili, così come gli oggetti ritrovati una volta catalogati vengono ammassati negli archivi; tutto ciò rende il materiale di difficile, se non di impossibile, consultazione. Quindi il modello digitale, se prodotto tramite operazioni ben pianificate ed eseguite, costituisce un'autentica fotografia tridimensionale della realtà attraverso cui non solo restituire e misurare le varie componenti, ma anche leggere indispensabili informazioni per la loro conoscenza ed interpretazione, non ultimi il materiale, la cromia e lo stato di conservazione.

Le tecniche digitali applicate a procedure di acquisizione e modellazione 3D affidabili, rigorose e non invasive, permettono dunque, attraverso il campionamento denso e accurato dello spazio con punti di cui sono note le coordinate, di avere a disposizione in modo costante lo scavo e ciò che vi è stato ritrovato. In altri termini esse consentono la formazione di dati fruibili da parte di archeologi, di studiosi e delle istituzioni interessate, garantendone l'ulteriore diffusione anche fra i non addetti ai lavori tramite l'organizzazione in esposizioni virtuali.

L'interdisciplinarietà permessa dall'efficace e crescente collaborazione con l'MVAP è divenuta dunque la chiave di lettura dell'approccio allo studio, soprattutto nel momento in cui il ritrovamento di un importante reperto, come la Stele di Vicchio, ne ha confermato gli intenti dando la svolta decisiva al lavoro di tesi.

Straordinaria scoperta per l'etruscologia – che ha avuto un'eco mondiale e di cui si sono occupate le maggiori testate giornalistiche esistenti – tale monumento è una grande lastra in pietra arenaria del VI secolo a.C., che pesa circa 250 kg ed ha un'altezza di oltre un metro.

Era parte di un tempio che risale a 2500 anni fa e che venne demolito per costruirne al suo posto uno di maggiori dimensioni. Mentre la connessione della Stele di Vicchio al luogo in cui questa è stata ritrovata ne suggerisce già di per sé il grande valore, il contenuto del testo in lingua etrusca iscritto sulla sua superficie, probabilmente sacro, può far luce sulle prime credenze di questa civiltà antica e, contestualmente, consentire progressi significativi per lo studio della relativa epigrafia, dal momento in cui iscrizioni così lunghe sono particolarmente insolite soprattutto al di fuori di un contesto funerario.

La morfologia irregolare dei grafemi iscritti, il loro spessore sub-millimetrico e la condizione precaria della superficie della Stele in arenaria hanno costituito le maggiori problematiche per la lettura e la traduzione del contenuto testuale ivi iscritto, esigendo un completo progetto di documentazione, il cui *management* definisse e pianificasse le diverse operazioni da eseguire prima, durante e dopo la fase di restauro, coniugando le esigenze conservative del monumento con l'applicazione non invasiva di tecniche e strumentazioni ad alta definizione per la sua autentica ricostruzione 3D.

Oltre alla documentazione fotografica con luce radente, si è scelto infine di impiegare la fotogrammetria digitale ed un sensore laser a triangolazione, quali sistemi ottici non a contatto in grado di rilevare con precisione metrica e morfologica, lo status del monumento rispettivamente prima e dopo la fase di ripulitura. L'intero progetto di documentazione è stato, dunque, finalizzato alla conoscenza della Stele di Vicchio attraverso output finali tridimensionali in grado di soddisfare sia le esigenze della ricerca scientifica che i requisiti di musealizzazione virtuale per una sua più ampia diffusione.

## Abstract

Oggi il processo conoscitivo di manufatti archeologici è legato alla definizione del relativo progetto di management culturale in cui l'efficace sinergia fra archeologi ed architetti esercita un ruolo di primaria importanza. L'obiettivo documentativo comune diviene il campo d'applicazione entro cui sviluppare un solido approccio olistico, grazie al quale operare una sintesi fra le reciproche competenze, per aggiungere nuove ed importanti tessere al mosaico delle conoscenze. Le tappe di questo processo sono state scandite, quindi, nella presente esperienza di ricerca, attraverso la determinazione di un approccio di studio in cui la linea guida è stata dettata dall'interdisciplinarietà, fornita dall'efficace e crescente collaborazione con il *Mugello Valley Archaeological Project* - Consorzio di università americane ed europee - soprattutto nel momento in cui il ritrovamento negli scavi sul Poggio Colla, nel comune di Vicchio del Mugello, di un eccezionale reperto etrusco come la Stele iscritta, ne ha confermato gli intenti, dando la svolta decisiva al lavoro di tesi. Si tratta di una grande lastra di pietra arenaria del VI secolo a.C., che pesa 250 chilogrammi, è alta più di un metro e faceva parte di un tempio di 2500 anni fa che venne demolito per costruirne uno di maggiori dimensioni. Il reperto ha grande importanza perché reca iscritto sulla superficie un testo in lingua etrusca, probabilmente sacro, che può far luce sulle prime credenze di questa civiltà e, contestualmente, consentire progressi significativi nello studio della relativa epigrafia. Rendere decifrabili i numerosi grafemi, dallo spessore sub-millimetrico, iscritti sulla superficie della Stele, ha costituito la principale fonte d'indagine verso la quale è stata sperimentalmente orientata e condotta l'intera procedura documentativa di rilievo 3D.

La sfida di fornire una rappresentazione digitale, ad alta definizione, delle iscrizioni è stata risolta con un progetto di rilievo che ha documentato costantemente lo *status* del-

la Stele durante tutte le operazioni di restauro conservativo, in collaborazione con la Soprintendenza Archeologia della Toscana che ne ha eseguito le fasi di pulitura.

Il progetto di documentazione, scegliendo di rilevare sperimentalmente l'oggetto della ricerca tramite la fotogrammetria digitale e sistemi laser a triangolazione, opportunamente applicati per ottenere risposte che avevano l'obiettivo di leggere e trasmettere ad altri studiosi più dati possibili, si è concretizzato nella produzione di *output* 3D finali in grado di soddisfare sia le esigenze della ricerca scientifica che requisiti di musealizzazione virtuale per una sua più ampia diffusione.

L'agevole visualizzazione e l'esplorazione del modello 3D ad alta risoluzione in ambiente virtuale, permettono di ricavare direttamente dalla sua geometria i segni iscritti sulla superficie accuratamente ricostruita.

Dunque la tesi, articolata in sette capitoli, si è posta principalmente due obiettivi: definire le potenzialità dei sensori ottici 3D non invasivi nell'ambito dei Beni archeologici e valorizzare l'interdisciplinarietà come linea guida dell'approccio di studio che permette di rappresentare, documentare e leggere i reperti

Modern processes for understanding material culture are intrinsically an important component of cultural management where an efficient synergy between archaeologists and architects can play a major role. The origins of this project are based on the interdisciplinary relationship that was part of close collaboration with the *Mugello Valley Archaeological Project* – a consortium of American and European universities – which coalesced as the result of extraordinary find by the excavations of Poggio Colla, in the Comune of Vicchio. This find, an inscribed stele, became the focal point of this thesis. The stele is a large sandstone slab that dates to the 6th century BC. It weighs 250 kilograms, is well over a metre high, and was placed in the foundations of a temple. The stele is especially important because its surface is inscribed with a long Etruscan text, probably sacred in nature, which promises to shed light on the Etruscan belief system as well as to provide important evidence for Etruscan language and epigraphy. The principal research goal was to render decipherable through experimental methods, based on 3D digital documentation, the numerous incisions, some of which are now barely even a millimetre deep.

The challenge of providing a high-definition digital representation of the inscriptions was resolved by the repeated documentation of the stele during all parts of the conservation process, thanks to the collaboration of the Soprintendenza Archeologia della Toscana, which supervised the process of restoration. The experimental methodology that was chosen for documentation was digital photogrammetry and triangulation-based laser scanning. These techniques, carefully applied with the goal of documenting and eventually communicating to other researchers the maximum amount of data, resulted in a 3D model that was designed satisfy research needs that require virtual display for a broader audience. The easy visualization and exploration of the high-resolution 3D model will allow re-

searchers to directly retrieve the inscribed letters and signs from a surface that is accurately reconstructed.

This thesis, articulated in seven chapters, has two goals: defining the capabilities of noninvasive 3-D optical sensors for archaeological purposes and setting forth the value of interdisciplinary approaches that permit the representation, documentation, and interpretation of archaeological evidence.



Alessandro Nocentini è nato a Firenze il 26 novembre 1982. Ha ottenuto il diploma di maturità scientifica presso il Liceo 'A. Gramsci' di Firenze e nel 2011 ha conseguito la laurea in Architettura Magistrale con il massimo dei voti e lode presso la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, discutendo la tesi dal titolo: *San Bruzio e la sua cupola a padiglione* (relatore prof. Barbara Aterini).

Cultore della materia in Laboratorio di Rappresentazione ed Applicazioni della Geometria Descrittiva dall'A.A. 2011/2012, dal 2013 ha frequentato il XXVIII ciclo di Dottorato di Ricerca in Architettura, curriculum 'Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente', presso il Dipartimento di Architettura DIDA dell'Università degli Studi di Firenze. Durante il suo percorso formativo ha prodotto diverse pubblicazioni, partecipando a convegni di interesse internazionale.

Grazie alla crescente collaborazione con il *Mugello Valley Archaeological Project* (MVAP), ha rivolto particolare interesse alle metodologie di rilievo digitale per l'archeologia.