

TECNICHE DIGITALI PER IL RILIEVO, LA RAPPRESENTAZIONE E LA MODELLAZIONE 3D IN ARCHEOLOGIA: IL CASO DI TILMEN HÖYÜK (TURCHIA)

Gabriele Bitelli (*), Valentina Alena Girelli (*), Fabio Remondino (**), Luca Vittuari (*)

(*) DISTART – Università di Bologna – (gabriele.bitelli, valentina.girelli, luca.vittuari)@mail.ing.unibo.it

(**) Institute of Geodesy and Photogrammetry – ETH Zurich, Switzerland – fabio@geod.baug.ethz.ch

Riassunto

Il campo del rilevamento dei Beni Culturali è probabilmente il più emblematico delle possibilità oggi offerte dall'integrazione delle moderne tecniche della Geomatica: le nuove tecniche e tecnologie digitali offrono, infatti, la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo nelle attività del rilievo primario, ma anche nella rappresentazione e nella visualizzazione, con lo scopo di avere una descrizione metrica accurata del territorio e delle strutture, fino ai singoli reperti archeologici, sia a scopo di analisi e conoscenza che a supporto delle attività di ricostruzione o restauro.

Il lavoro presentato descrive l'esperienza di rilievo e documentazione con un approccio integrato sul sito archeologico di Tilmen Höyük in Turchia, soffermandosi in particolare sulla tematica della modellazione tridimensionale di oggetti e strutture tramite fotogrammetria digitale e laser terrestre a scansione.

La possibilità di disporre di un modello tridimensionale accurato e foto-texturizzato di oggetti costituisce ormai nel campo dei Beni Culturali un'interessante opportunità di documentazione, rappresentazione e studio, fino alla produzione di repliche.

In particolare per mezzo di alcuni test effettuati su di un importante reperto rinvenuto sul sito, vengono descritte le specificità, le problematiche e i prodotti ottenuti da due diversi approcci, l'approccio *image-based* e l'approccio *range-based*, effettuando anche confronti numerici fra i modelli ottenuti.

Abstract

The paper describes an experience carried out in the framework of an archaeological activity, where various geomatic techniques were applied and integrated, tying together disciplines such as topographical surveying, geophysics, photogrammetry, remote sensing, etc. During the campaigns carried out at the archaeological site of Tilmen Höyük, in Turkey, some experiences were realized in close-range photogrammetry using non-metric cameras, with subsequent data modelling and representation as well as a laser scanning survey of the cast of an important find. The paper tries to examine the possibilities offered by digital photogrammetry and laser scanning to obtain 3D accurate reconstruction of archaeological objects, with the aim of providing a solution to situations like those above described.

Introduzione

Il rilievo e la rappresentazione di siti archeologici e oggetti rappresenta oggi un contesto veramente interessante in cui le potenzialità delle nuove tecnologie digitali della Geomatica possono esprimersi con profitto. Le problematiche da affrontare vanno dall'acquisizione del dato metrico all'integrazione delle fasi di processamento, alla gestione in modalità automatica o semi-automatica dei dati fino ai nuovi metodi di rappresentazione ed esplorazione dei prodotti finali.

In questo senso, uno dei temi più importanti è relativo alla modellazione tridimensionale di strutture archeologiche complesse e reperti, in cui emergono problemi ovviamente differenti rispetto a quelli che usualmente ci si trova ad affrontare nella modellazione del territorio o di oggetti artificiali, per

esempio della meccanica.

Le richieste di questo particolare ambito sono varie: l'alta precisione e la capacità di riprodurre fedelmente i dettagli sono caratteristiche indispensabili, ma ci sono altri requisiti come il basso costo, la maneggevolezza e l'alto livello di automazione nel processo.

Attualmente si possono distinguere 3 approcci per la documentazione e la visualizzazione di siti e oggetti archeologici: 1. metodi *image-based* (Remondino & El-Hakim, 2006); 2. metodi *range-based* (Böhler, 2005); 3. metodi *image-based* e *range-based* integrati (Beraldin et al., 2002; Voltolini et al., 2007).

Le richieste di questo particolare ambito sono varie: l'alta precisione e la capacità di riprodurre fedelmente i dettagli sono caratteristiche indispensabili, ma ci sono altri requisiti come il basso costo, la maneggevolezza, la flessibilità e l'alto livello di automazione nel processo; perciò selezionare la tecnica di modellazione 3D migliore per soddisfare tutti i requisiti per una data applicazione non è sempre un processo semplice.

La Missione Archeologica dell'Università di Bologna nel sito di Tilmen Höyük in Turchia, diretta dal Prof. Nicolò Marchetti, ha avuto inizio nel 2003 in collaborazione con l'Università di Istanbul e con il Museo Archeologico di Gaziantep. L'area di indagine è un antico insediamento, del III e II millennio a.C., situato nella piana di Islahiye, nel sud-est del paese (figura 1), attivo dal tardo Calcolitico fino alla fine dell'età del bronzo.

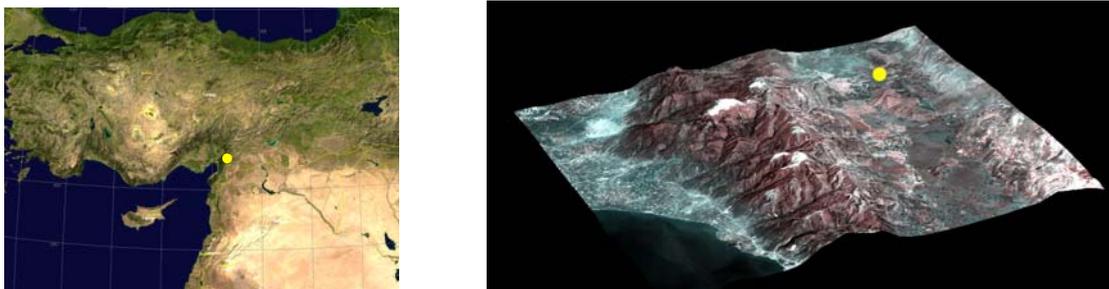


Figura 1 – La posizione del sito di Tilmen Höyük evidenziata su mosaico di immagini Landsat (a sinistra) e mediante *draping* su DTM e immagini multispettrali del sensore ASTER.

Al fine di effettuare il rilievo e lo studio del sito e del territorio circostante, è stato scelto un approccio multi-tecnica adottando metodologie e strumentazioni diverse fra loro integrate, approccio seguito in altre precedenti esperienze (Bitelli et al., 2005); il sito è soggetto a prospezioni di vario genere, anche geofisiche, ed è stata predisposta una rete di sensori per il monitoraggio in remoto di diversi parametri fisici relativi all'area di scavo.

Il lavoro presentato descrive processi e problematiche connesse alla modellazione 3D di oggetti di interesse archeologico, soffermandosi in particolare sulla modellazione 3D di una importante stele (Marchetti, 2006) scoperta in una cella del Tempio durante la campagna del 2004. Questa stele, in basalto, mostra una divinità (con ogni probabilità il Dio della Tempesta) di fronte ad un alto funzionario e risale probabilmente al tardo periodo siriano (XVII secolo a.C.). La stele misura all'incirca 70 x 60 x 25 cm (Figura 2-a); la sua superficie è irregolare e caratterizzata da buchi e cavità di diverse dimensioni.

L'oggetto originale si trova attualmente conservato al museo di Gaziantep in Turchia, perciò per procedere al suo studio è stata effettuata una fedele copia tramite calco (Figura 2-b) con una speciale resina epossidica spalmabile.



Figura 2 – La stele (a) e la sua copia (b).

Modellazione 3D *image-based*

La modellazione 3D *image-based* della stele è stata realizzata utilizzando sia immagini dell'oggetto originale acquisite sul campo dagli archeologi al momento del ritrovamento con lo scopo di valutare la possibilità di ottenere modelli 3D accurati anche da immagini “amatoriali”, sia immagini della replica acquisite con una camera digitale Canon EOS 350D da 8 Mpixel calibrata. In entrambi i casi l'estrazione del modello digitale della superficie dell'oggetto è stata realizzata tramite un software sviluppato *in house* (Remondino & Zhang, 2006).

Il problema della scelta del software è essenziale per questo tipo di applicazioni. Moderni software commerciali monoscopici multi-immagine eseguono la generazione di un modello tridimensionale in modalità *wireframe* o *textured*, tramite la collimazione assistita di un gran numero di punti, linee e superfici geometriche semplici. Stazioni fotogrammetriche digitali con approccio stereoscopico consentono invece, dopo una fase di orientamento, la generazione automatica di modelli digitali di superfici tramite algoritmi di *image matching*, ma un processo di *post – editing* dell'operatore è sempre richiesto, per eliminare gli errori dovuti ad un *matching* errato; la fase di modellazione e texturizzazione deve essere eseguita con software dedicati.

Software commerciali specificatamente sviluppati per la modellazione tridimensionale automatica di oggetti complessi da immagini non esistono, soprattutto in ambito terrestre; questo ha spinto alcuni gruppi di ricerca a creare algoritmi sviluppati ad hoc per questo scopo, che utilizzano i diversi metodi di *image matching* combinandoli insieme in modo opportuno.

Un altro fattore chiave in questo ambito è la calibrazione della camera o delle immagini utilizzate. Infatti, se da un lato risulta evidente che le nuove camere digitali a medio – basso costo offrono enormi vantaggi nell'utilizzo anche sul campo grazie alle loro caratteristiche di portabilità e maneggevolezza unite all'elevata risoluzione geometrica raggiungibile, risulta ormai dimostrata la loro instabilità, che suggerisce l'acquisizione contemporanea delle immagini per la restituzione degli oggetti di interesse e per la calibrazione della camera, ponendo attenzione ad una efficace geometria delle prese.

Nel campo dei Beni Culturali può però talvolta capitare di avere a disposizione immagini di un oggetto acquisite durante gli scavi non a scopo fotogrammetrico, ma esclusivamente a scopo di documentazione da personale non esperto; l'utilizzo di queste immagini a scopo metrico è possibile, ma presuppone l'utilizzo di procedure di calibrazione e di restituzione specifiche, col supporto di software spesso creati espressamente per il caso in esame (Remondino & Zhang, 2006).

Per l'acquisizione delle immagini amatoriali della stele di Tilmen Höyük è stata usata sul campo la camera Nikon D70 da 6 Mpixel. Non è stato possibile realizzare la completa calibrazione di tali immagini e si è scelto quindi un approccio “*on the job*” su una tripletta opportuna di immagini, ponendo come valore approssimato iniziale della camera il valore dato dagli *exif* file; a causa della sfavorevole geometria non si sono determinati tutti i parametri, ma l'errore medio a posteriori della

compensazione è risultato inferiore ad 1 pixel.

Per l'estrazione automatica dei punti della superficie è stato utilizzato per entrambi i data set di immagini (amatoriali e del calco) un software sviluppato dall'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria del Politecnico di Zurigo, che utilizza, combinandoli insieme, *Multi – Photo Geometrically Constrained Matching, Feature Matching e Relational Matching*; la Figura 3 mostra i modelli ottenuti (Bitelli et al., 2007).

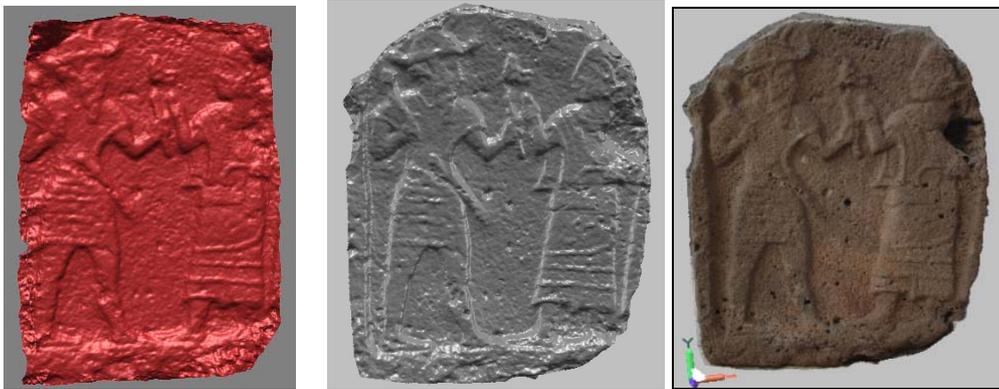


Figura 3 – I modelli 3D *image-based* della stele. Risultati dalle immagini amatoriali (a sinistra) e dalle immagini del calco (al centro *shaded view*, a destra il modello foto-texturizzato).

Modellazione 3D *range-based*

I sensori laser terrestri sono ormai dispositivi comunemente usati in varie e differenti applicazioni di modellazione tridimensionale. I moderni software per il data processing permettono di eseguire in modalità quasi totalmente automatica le fasi classiche del processo di elaborazione dei dati ed in particolare l'allineamento delle scansioni, raggiungendo residui inferiori ai 100 μm .

Un rilievo laser della replica della stele è stato effettuato con lo strumento Opto TOP HE (Breuckmann), un sensore cosiddetto a “frange codificate”, in cui immagini a codice binario multiplo sono create con risoluzione crescente; tutte le linee proiettate sono numerate ed i numeri sono codificati con il cosiddetto “Gray – Code”, in cui linee adiacenti differiscono esattamente per un bit (0/1): una linea chiara rappresenta uno “0” e una scura un “1”; tutte le linee sono proiettate in mezzo secondo. Questo dispositivo permette di acquisire fino a 1 milione di punti in 1 secondo con una precisione anche inferiore ai 50 μm ; il campo e la profondità di vista sono funzioni dell'obiettivo usato e della baseline.

Al fine di ricostruire l'intera superficie della stele senza lacune sono state acquisite 59 nuvole di punti; la nuvola finale risultante dopo le fasi di allineamento, riduzione e filtraggio consta di circa 4.000.000 di punti, spazati mediamente a circa 0.20 mm e la superficie ottenuta tramite triangolazione è composta da circa 7.500.000 triangoli; il processamento è avvenuto all'interno del software RapidForm (Inus Technology).

In Figura 4 è evidente il principio di funzionamento del sensore utilizzato (4-a e 4-b) ed un particolare della fase di rilievo; la Figura 5 mostra invece il modello tridimensionale ottenuto.

Allo scopo di valutare i modelli 3D ottenuti con i due diversi approcci, è stato condotto un confronto fra di essi. In particolare è stato comparato il modello ottenuto dal laser con il modello derivato dalle immagini amatoriali. Da una prima analisi visuale, appare evidente che il modello laser è più fedele nella ricostruzione di tutti i piccoli particolari e dettagli dell'oggetto, come per esempio i piccoli buchi caratteristici della superficie; questo è soprattutto dovuto al fatto che le immagini utilizzate per la modellazione 3D avevano una risoluzione (*footprint*) non sufficiente per poter restituire i piccoli dettagli dell'oggetto.

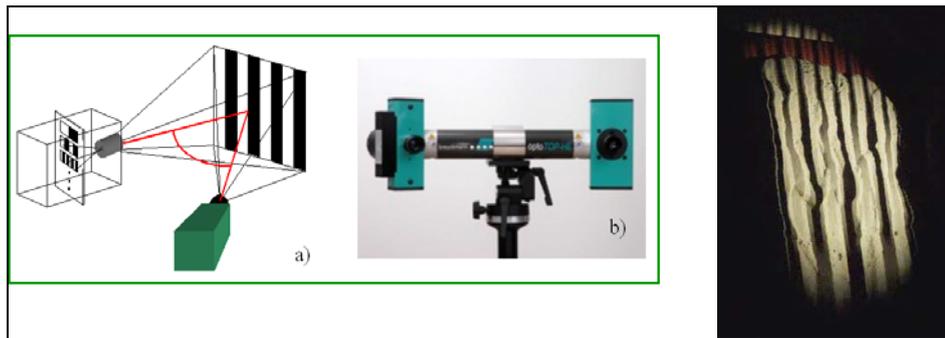


Figura 4 – Il laser Opto TOP HE ed un'immagine della fase di rilievo.

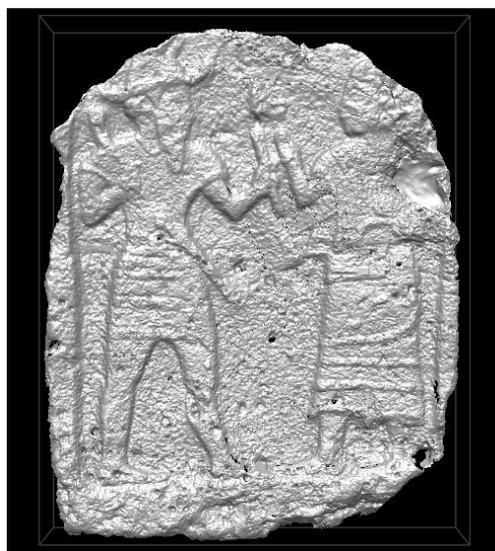


Figura 5 – Il modello 3D della stele ottenuto tramite rilievo laser della replica.

Un confronto quantitativo fra la superficie da laser e quella da fotogrammetria delle immagini originali della Stele, è stato effettuato mappando la differenza nella componente Z fra le due *shells*, mostrata in Figura 6. I residui presentano una media di 1.5 mm nell'area in comune ed il 70% dei punti presenta una differenza inferiore a tale valore; i punti con discrepanze elevate giacciono per lo più lungo i bordi.

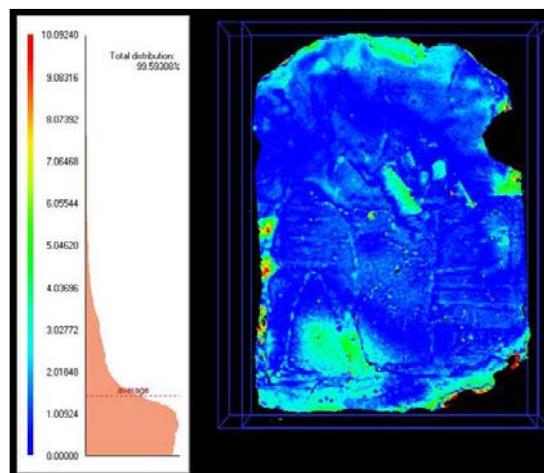


Figura 6. Mappa delle differenze fra le due superfici, laser – fotogrammetria.

Conclusioni

La documentazione, conservazione e analisi del patrimonio culturale ha a sua disposizione al giorno d'oggi una grande varietà di strumenti e tecnologie. Nel caso di studio esaminato è stato riportato in primo luogo l'approccio basato su immagini, economico e veloce anche se richiedente spesso l'interazione di un operatore: software sviluppati ad hoc in diversi centri di ricerca permettono la misurazione di superfici da immagini con risultati simili a quelli ottenuti con i sensori a scansione (El-Hakim et al, 2007; Rizzi et al, 2007). Nella scelta della tecnica di rilievo, la precisione non risulta dunque più il fattore principale da considerare, ma elementi di pari importanza sono la portabilità, i costi, la rapidità di acquisizione, le possibilità di riproduzione cromatica, la facilità di utilizzo e processamento, etc., da considerarsi sia per il rilevamento sul sito che, in minor misura, nelle elaborazioni di laboratorio.

Bibliografia

- Beraldin J.-A., Picard M., El-Hakim S., Godin G., Latouche C., Valzano V., Bandiera A. (2002), "Exploring A Byzantine Crypt Through A High-Resolution Texture Mapped 3d Model: Combining Range Data And Photogrammetry", *Proceedings Of Isprs/Cipa Int. Workshop Scanning For Cultural Heritage Recording*, Corfu, Greece, Pp. 65-72.
- Bitelli G., Girelli V.A., Tini M.A., Vittuari L. (2005), "Integration of geomatic techniques for quick and rigorous surveying of cultural heritage", *Proc. XX CIPA Int. Symp.*, (cd rom ISSN 1682-1777).
- Bitelli G., Girelli V. A., Remondino F., Vittuari L. (2006), "Surface modelling of complex archaeological structures by digital close-range photogrammetry", *Proc. II Int. Conference on Remote Sensing in Archaeology, BAR International Series 1568*, pp. 321-326.
- Bitelli G., Girelli V. A., Guarnieri A., Vittuari L. (2006), "Accurate survey of the stela from Tilmen Höyük by laser scanning technique", *Festschrift Refik Duru*, O. Belli, Ö. Bilgi, G. Umurtak and Ş. Dönmez (Eds.), Istanbul (in stampa).
- Bitelli G., Girelli V.A., Remondino F., Vittuari L. (2007), "The potential of 3D techniques for Cultural Heritage object documentation", *Videometrics IX, Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging*, Vol. 6491, San Jose (CA)
- Boehler W. (2005), "Comparison of 3D laser scanning and other 3D measurement techniques", *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage - E.Baltsavias, A.Gruen, L.Van Gool, M.Pateraki (Eds)*, Taylor & Francis / Balkema, 89-99, Ascona, Switzerland
- El-Hakim, S., Gonzo, L., Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F., Whiting, E., 2007. Detailed 3D modeling of castles. *Int. Journal of Architectural Computing*, Vol5(2), pp. 199-200
- Marchetti N. (2005), "Tilmen Höyük (Gaziantep)", *Dall'Eufrate al Mediterraneo. Ricerche delle missioni archeologiche italiane in Turchia*. Firattan Akdenize. Türkiyedeki İtalyan Arkeoloji Heyetlerinin Araştırmaları, Istituto Italiano di Cultura, pp. 41-48.
- Marchetti N. (2006), "A Late Old Syrian Stela from Temple M at Tilmen Höyük", in *Festschrift Refik Duru' - O. Belli, Ö. Bilgi, G. Umurtak and Ş. Dönmez (Eds.)*, Istanbul (In stampa).
- Remondino F., El-Hakim S. (2006), "Image-Based 3d Modeling: A Review", *The Photogrammetric Record*, 21(115), Pp. 269-291.
- Remondino F. and Zhang L. (2006), "Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling", *Int. Arch. of Phot., Rem. Sens. and Spatial Information Sciences*, Vol.36(B3).
- Voltolini F., El-Hakim S., Remondino F., Girardi S., Rizzi A., Pontin M., Gonzo L. (2007), "Digital Documentation of complex architectures by integration of multiple techniques – The case study of Valer Castle". *Videometrics IX, Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging*, Vol. 6491, San Jose (CA)

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare i membri della Missione Archeologica dell'Università di Bologna in Turchia ed in particolare il direttore Nicolò Marchetti.