

LASER SCANNER E FOTOGRAFIA DIGITALE PER LA MODELLAZIONE E L'ANALISI DI SITI ARCHEOLOGICI: IL CASO STUDIO DEL RIPARO GABAN¹

Stefano GIRARDI(*), Fabio CAVULLI(**), Francesca VOLTOLINI(*), Alessandro RIZZI(*),
Fabio REMONDINO(***), Annaluisa PEDROTTI(**), Lorenzo GONZO(**)

(*) Fondazione Bruno Kessler - IRST – Centro per la Ricerca Scientifica e Tecnologica, Povo - Trento;
e-mail: (girardi, fvoltolini, rizziale, lgonzo)@itc.it

(**) Laboratorio di Preistoria “B. Bagolini”, Dipartimento di Storia, Filosofia e Beni Culturali, Università di Trento,
Fabio.Cavulli@unitn.it

(***) Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland; *e-mail: fabio@geod.baug.ethz.ch*

Riassunto

L'integrazione di dati laser scanner e fotografia digitale per la modellazione tridimensionale permette di documentare e ricostruire virtualmente siti d'interesse archeologico e, allo stesso tempo, fornire uno strumento per l'interpretazione delle dinamiche formative e di trasformazione del sito in studio. Il caso di studio riportato è un riparo preistorico (Riparo Gaban) situato vicino a Trento. Il rilievo digitale è stato motivato dalla necessità di consolidamento del testimone stratigrafico e dalla ripresa, dopo vent'anni, delle ricerche archeologiche. L'interno del sito è protetto da una costruzione moderna eretta allo scopo di riparare l'area e che ne impedisce una visione d'insieme. E' stato quindi necessario creare due modelli tridimensionali distinti e poi registrarli insieme attraverso un algoritmo basato sui quaternioni di rotazione. Il lavoro mostra come le nuove tecnologie geomatiche possano essere impiegate nel campo archeologico per fornire in tempi relativamente brevi informazioni utili a specialisti del settore.

Abstract

The integration of active and passive sensor is getting very common in many surveying and modeling applications. Both technologies have advantages and disadvantages and their combination allow to produce precise, reliable and photo-realistic results. In this contribution we present the documentation of an archaeological area near Trento, Italy. It is a prehistoric site (8000-1400 A.C. cal.) used as shelter which required a quick and digital documentation to protect and preserve it.

1. Introduzione

Il campo dei Beni Culturali ha oggi a sua disposizione una vasta gamma di metodologie e tecnologie per il rilevamento, la documentazione e la conservazione di siti e oggetti di interesse culturale. Le possibilità offerte dall'integrazione delle moderne tecniche digitali di rilievo (fotogrammetria terrestre, sistemi attivi tipo laser, immagini satellitari ad alta risoluzione, Lidar, GPS, etc) offrono, infatti, la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo dalle attività di rilievo, ma anche nella rappresentazione e nella visualizzazione. I nuovi prodotti digitali costituiscono potenti strumenti per l'analisi degli oggetti in studio ed un supporto alle attività di indagine, documentazione, restauro, ricostruzione, conservazione. Inoltre tutti i prodotti possono confluire in un unico comune database, utile per applicazioni tipo divulgazione, studi di stabilità delle strutture, marketing, etc. In archeologia, l'uso sistematico e corretto di modelli 3D per la documentazione e conservazione di siti culturali ha una storia molto recente, per diversi motivi: (i) l'alto costo del prodotto 3D, (ii) le difficoltà nell'ottenere modelli 3D realistici e precisi, (iii) la considerazione che il 3D sia solo un fattore opzionale all'indagine, (iv) le difficoltà nell'integrare dati 2D e 3D.

¹ Studio svolto nell'ambito del progetto speciale *The Gaban Project: a proposal for a interdisciplinary laboratory for research and training practices in archaeological sciences* finanziato tramite Accordo di programma CRS-UniTn Bando 2006.

Le tecniche più utilizzate per il rilievo digitale si basano su immagini (image-based modeling) e su sensori attivi tipo laser (range-based modeling). Entrambi gli approcci presentano vantaggi e svantaggi e generalmente la scelta è fatta considerando i costi, le dimensioni del progetto e gli obiettivi. Approcci che utilizzano immagini (Remondino & El-Hakim, 2006), tipo la fotogrammetria o la computer vision, sono molto utilizzati per modellare in 3D e a basso costo oggetti architettonici, paesaggi e città (Gruen, 2000; El-Hakim, 2002; Gruen et al., 2004). Metodi che impiegano sensori attivi tipo laser scanner o proiettori di frange (Beraldin et al., 2000; Blais, 2004) acquisiscono direttamente l'informazione 3D attraverso diversi principi di misura (triangolazione, tempo di volo, modulazione di frequenza, etc). In molte applicazioni, la combinazione tra fotogrammetria e scansione laser è la soluzione che porta, al momento, a risultati migliori (Beraldin et al. 2002; Voltolini et al., 2007; Lambers et al. 2007).

In questo articolo viene presentata la documentazione digitale e tridimensionale di un riparo archeologico di circa 10000 anni. Il sito rappresenta a livello internazionale una delle principali sequenze di riferimento per comprendere la successione culturale e cronologica delle comunità di cacciatori-raccoglitori fino alla comparsa della metallurgia (Mesolitico - Età del Bronzo) in ambiente alpino (Bagolini, 1980; Bagolini & Pedrotti 1996; Koszowski & Dalmeri 2000). L'interno del riparo sottoroccia è protetto da una costruzione moderna eretta allo scopo di riparare il deposito. Il modello geometrico tridimensionale del riparo (interno ed esterno) è stato realizzato tramite un sensore attivo e le due parti sono state registrate insieme tramite punti omologhi misurati con una stazione totale.

2. Il sito archeologico (8200-1400 A.C. cal.)

Il sito si trova in località Piazzina di Martignano sulle colline circostanti la città di Trento, in una vallecola posta alle pendici del Monte Calisio, a circa 270 m slm. Il riparo si caratterizza per un'ampia arcata in Rosso Ammonitico di 10 m di altezza, 6 m di profondità e circa 60 m di lunghezza. La serie stratigrafica del Riparo Gaban inizia a circa 140 centimetri dall'attuale piano di campagna e si sviluppa fino a circa 600 centimetri. La sua sequenza è in parte ancora oggi leggibile sul "testimone stratigrafico" risparmiato al centro del riparo. Le ricerche geosismiche, geoelettriche e sondaggi rotativi, condotti dal Servizio Geologico della P.A.T., attestano che il deposito archeologico si estende anche all'esterno, nel prato antistante il riparo. Le condizioni di conservazione del testimone sono oggi preoccupanti in quanto crepe e piccoli crolli diventano sempre più visibili, mentre tutta la colonna di sedimenti appare sempre più distaccata dalla parete interna del riparo alla quale era in origine attaccata.



Figura 1. Riparo Gaban: stato attuale con costruzione di protezione.

3. Documentazione digitale del riparo

L'emergenza di conservazione del riparo ha richiesto da una parte la documentazione di dettaglio delle evidenze esposte (disegno geoarcheologico, interpretazione e fotografia delle sezioni esposte, modello tridimensionale di dettaglio del testimone e della volta del riparo) e, dall'altra, lo studio (rilevamento delle condizioni ambientali in diversi punti del riparo) delle possibili cause del cedimento del testimone stratigrafico per l'individuazione di una strategia di consolidamento. Punto imprescindibile della ricerca è costituito dall'integrazione del modello tridimensionale del riparo

con la documentazione stratigrafica di scavo (fotopiani, disegni planimetrici e sezioni interpretative, database).

3.1. Acquisizione dati

La documentazione digitale del riparo sottoroccia è stata fatta utilizzando un laser scanner terrestre Leica HDS3000. La distanza utile di ripresa in condizioni ottimali va da 1 a 100 metri, mentre l'angolo di ripresa è di 360° orizzontale e di 270° verticale. La frequenza di misura della nuvola di punti è al massimo di 1800 punti/secondo. A 50 metri l'impronta del laser sull'oggetto è di 6 mm, l'accuratezza nella posizione della nuvola di punti è di 6 mm, mentre quella in distanza è di 4 mm. La ripresa del sito ha richiesto diverse stazioni di presa. La prima stazione è stata posta sul piano predisposto ad accogliere i visitatori, mentre altre tre stazioni di ripresa sono state collocate nella parte più bassa del riparo allo scopo di completare la visione d'insieme dell'interna parete rocciosa. Nella parte bassa del riparo è conservato il testimone di scavo che è stato rilevato con tre scansioni separate a più alta risoluzione (6 mm) rispetto al resto del sito (1.5 cm).

3.2. Allineamento dei modelli

Le scansioni laser raccolte (circa 3 milioni di punti) sono state allineate usando IMAAlign di PolyWork (<http://www.innovmetric.com>). Il risultato dell'unione delle 8 scansioni laser ha prodotto una nuvola finale di 1.2 milioni di punti. Il modello è stato poi triangolato con una mesh per approssimare la superficie reale. L'approssimazione della superficie è spinta al massimo nelle zone prive di morfologia, come ad esempio sulle pareti piane della copertura, mentre nelle zone a sagoma complessa, quali rugosità della superficie e scalini di strato roccioso, il numero di punti triangolati rimane invariato così da descrivere efficientemente la morfologia della parete rocciosa. Il modello triangolato e colorato della parte interna del riparo è mostrato in Figura 2.

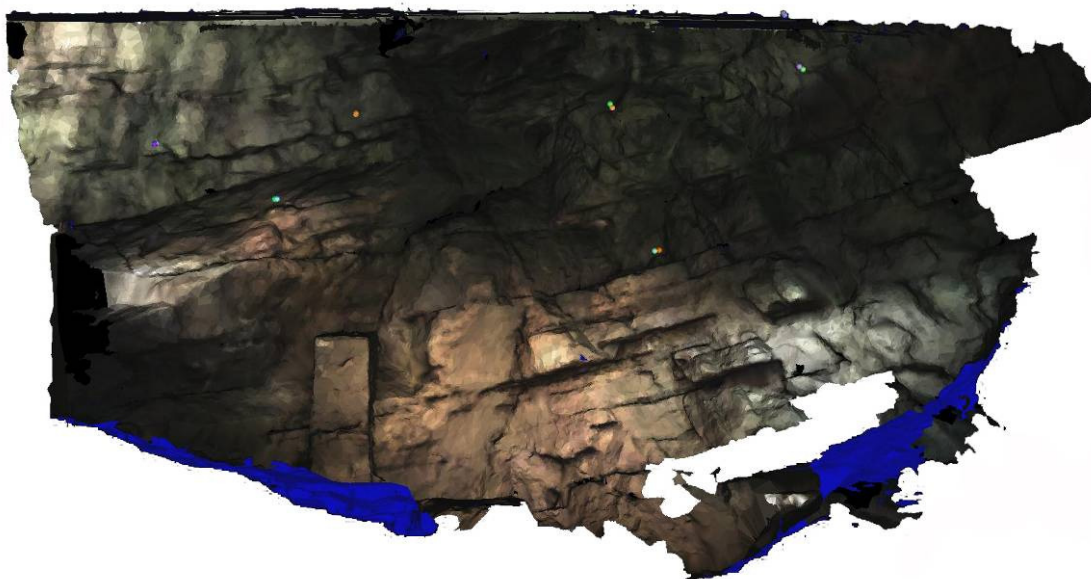


Figura 2: Modello della porzione interna triangolata del Riparo Gaban.

3.3. Texture mapping

Il modello foto-realistico della parete rocciosa interna del riparo è stato realizzato mediante la ripresa di una serie di immagini digitali ad alta risoluzione acquisite con una Kodak DCS Pro SLR/n a 13 Mega-pixel con obiettivo di 18 mm. 13 immagini sono state acquisite con illuminazione artificiale utilizzando due lampade corredate di diffusore per omogeneizzare la luce sulla parete rocciosa. L'applicazione delle immagini ad alta risoluzione sul modello triangolato è stata realizzata con TexCapture (NRC Canada). L'applicazione delle immagini al modello è subordinata alla calibrazione della macchina fotografica e, come altri software fotogrammetrici, richiede la conoscenza dell'orientamento esterno di ciascuna immagine da mappare sul modello. Un

importante accorgimento per produrre modelli foto-realistici è l'acquisizione delle immagini con angolo di presa simile a quello dello scanner laser. Il texture mapping della parete rocciosa interna del riparo è stato realizzato con 9 immagini. L'abbinamento delle foto è stato fatto suddividendo il modello in parti omogenee a ciascuna delle quali è stata abbinata un'immagine. Le singole parti sono state di seguito riunite per ottenere il modello d'insieme. Il problema più evidente nel modello finale si è rivelata la presenza di cuciture alle giunzioni dei singoli sottoinsiemi d'elaborazione. Questi difetti, corretti in fase finale tramite software di grafica, sono dovuti principalmente alla disomogeneità della luce durante le riprese, ma anche alla diversità di angolazione degli strati rocciosi che in molti casi non si potevano riprendere con angolo adeguato. Nella Figura 3 si mostrano rispettivamente l'immagine fotografica di una porzione del riparo e il modello tridimensionale triangolato e texturizzato in scala e totale.



Figura 3: Riparo Gaban: fotografia interna e screenshot del modello 3D fotorealistico.

Allo stesso modo è stata realizzata la mappatura del testimone di scavo, usando 4 immagini a più alta risoluzione. In Figura 4 è mostrato il testimone di scavo e il rispettivo modello texturizzato.



Figura 4: Il testimone di scavo stratigrafico e il modello fotorealistico ottenuto, mostrato nella sua globalità (1 m x 1.4 m di base ca 3 m d'altezza) e in dettaglio.

3.4. Unione e rifinitura dei modelli 3D

I due modelli tridimensionali del riparo, rispettivamente interno ed esterno, disgiunti e ottenuti da riprese indipendenti sono stati uniti ponendo i due modelli in un unico sistema di riferimento.

L'allineamento dei due modelli digitali è stato fatto impiegando una rete topografica di tre stazioni compensate costituita da punti raccolti con una stazione elettronica totale e appartenenti sia alla porzione interna che alla porzione esterna del sito archeologico. I punti di presa raccolti con lo strumento topografico sono stati abbinati a punti omologhi individuati all'interno dei modelli ottenuti mediante laser scanner. I due modelli tridimensionali, privi di punti comuni, sono stati uniti utilizzando un algoritmo che si basa sul calcolo della matrice di roto-traslazione, necessaria per allineare tra loro due modelli con un diverso sistema di riferimento.

Il sistema di riferimento dei punti di presa ottenuti dalla stazione elettronica totale è stato preso come sistema di riferimento globale per il progetto. Utilizzando i punti omologhi alle stazioni di presa individuati in ciascun modello si è calcolata la matrice di roto-traslazione del modello 3D interno slegato da quello esterno del riparo. L'allineamento dei modelli è stato realizzato sviluppando uno script in Matlab basato sul calcolo del quaternione unitario descritto in (Horn, 1987) e che fornisce i parametri della trasformazione (espressi in forma omogenea) con i rispettivi RMSE e le distanze residue tra punti di controllo corrispondenti (Tabella 1). In Figura 5 sono riportati entrambi i modelli 3D allineati.

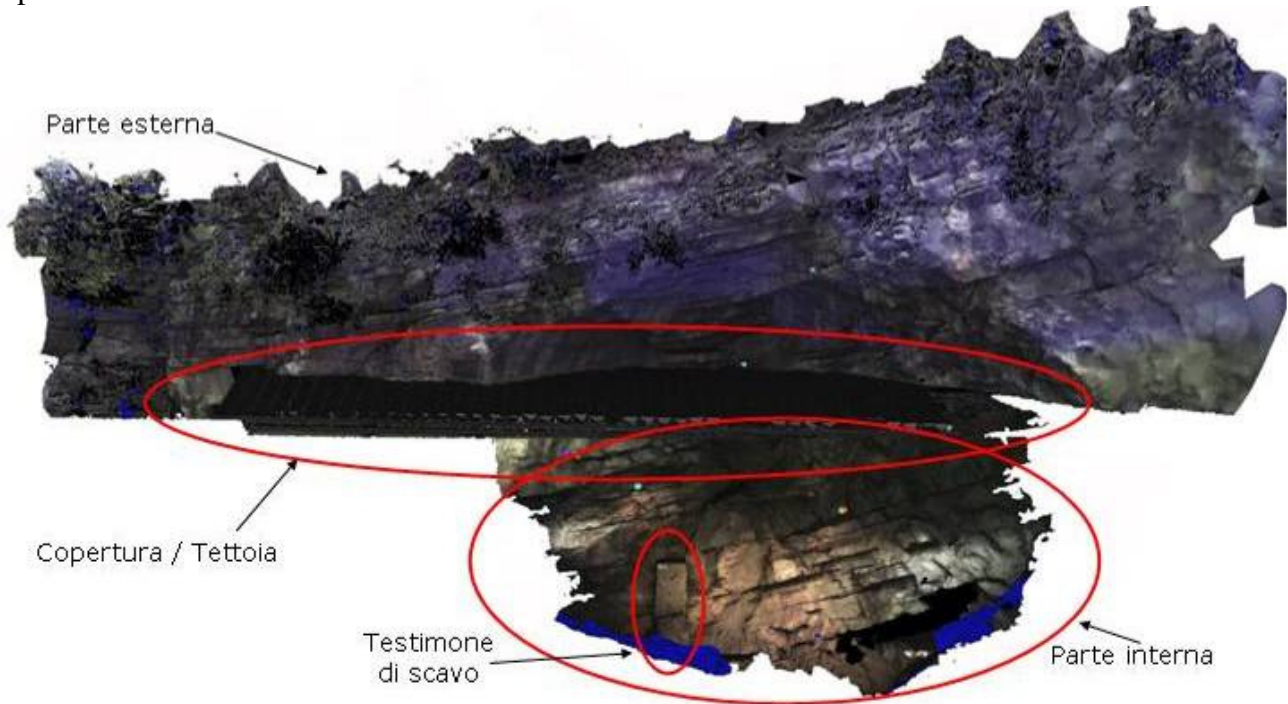


Figura 5: Unione dei due modelli del riparo archeologico.

Punti di controllo	N° Punti	RMSE X (m)	RMSE Y (m)	RMSE Z (m)
Interno	11	0.015	0.061	0.034
Esterno	7	0.052	0.031	0.023

Tabella 1: Residui dell'unione dei due modelli.

I dati della Tabella 1 mostrano come l'errore massimo sia stato commesso in asse Y con 6 cm di scostamento nella parte interna, mentre gli altri due assi si attestano rispettivamente a 1.5 cm (X) e 3.4 cm (Z). La precisione dell'unione tra i due modelli dipende strettamente dalla precisione con la quale vengono posizionati i punti reali raccolti con la stazione elettronica totale.

4. Conclusioni

Il lavoro è stato svolto al fine di documentare con la massima precisione e preservare anche virtualmente il testimone stratigrafico. Le difficoltà maggiori in questo progetto sono state incontrate nell'applicare le immagini ad alta risoluzione al modello della parte interna del riparo e nell'unione dei due modelli, interno ed esterno, senza punti in comune. I risultati incoraggianti dati dalla metodologia seguita saranno applicati per unire il modello 3D del riparo al modello digitale della valletta antistante al sito. Obiettivi futuri vedranno l'integrazione del modello tridimensionale del riparo con la documentazione stratigrafica di scavo (fotopiani, disegni planimetrici e sezioni interpretative, database). Il modello così creato darà la possibilità di nuove ricostruzioni del deposito che si sta scavando, un processo per forza di cose "distruttivo". Attraverso l'esportazione del modello tridimensionale su piattaforma GIS e/o programmi

informatici dedicati saranno possibili nuove ricostruzioni paleoambientali e analisi mirate allo studio delle dinamiche di accumulo naturale, dei processi antropici di deposizione.

Ringraziamenti

Gli autori sono grati a Paolo Chistè per la documentazione fotografica e a Matteo Rapanà dell'Università di Trento per l'aiuto nell'elaborazione dati.

Riferimenti Bibliografici

- Bagolini, B., 1980: Riparo Gaban. Preistoria ed evoluzione dell'ambiente. Museo Tridentino di Scienze Naturali. Edizioni didattiche.
- Bagolini B., Pedrotti A., 1996, Riparo Gaban. In Broglio A. (a cura di), *Paleolitico Mesolitico e Neolitico dell'Italia nord-orientale*, Guide archeologiche. Preistoria e Protostoria; 4, Tunbridge Wells: Abacus: 119-129.
- Beraldin, J.A., Blais, F., Cournoyer, G., Godin, G., Rioux, M., 2000: Active 3D sensing. Scuola Normale Superiore di Pisa, Centro di ricerche informatiche per I Beni Culturali.
- Beraldin, J.-A., M. Picard, S. El-Hakim, G. Godin, C. Latouche, V. Valzano & A. Bandiera 2002: Exploring a Byzantine crypt through a high-resolution texture mapped 3D model: combining range data and photogrammetry. In: Böhler, W. (ed.), Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, September, 2002. Corfu, Greece, 65-72.
- Blais, F., 2004: A review of 20 years of Range Sensors Development. Journal of Electronic Imaging, 13(1): 231-240.
- El-Hakim, S.F., 2002: Semi-automatic 3D reconstruction of occluded and unmarked surfaces from widely separated views. IAPRS&SIS, Vol. 34(5), pp. 143-148, Corfu, Greece.
- El-Hakim, S., Remondino, F., Voltolini, F., Gonzo, F., 2007: Effective high resolution 3D geometric reconstruction of heritage and archaeological sites from images. Proc. of CAA 2007, Berlin, Germany, April 2007 (in press).
- Gruen, A., 2000: Semi-automated approaches to site recording and modelling. IAPRS&SIS, 33(5/1): 309-318.
- Gruen, A., Remondino, F. and Zhang, L., 2004: Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. Photogrammetric Record, 19(107): 177-199.
- Horn, 1987: Closed form solution of absolute orientation using unit quaternions. Journal of the Optical Society of America A, Vol. 4, p. 629, April 1987.
- Lambers, K., H. Eisenbeiss, M. Sauerbier, D. Kupferschmidt, T. Gaisecker, S. Sotoodeh & T. Hanusch 2007: Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. J. of Archaeological Science 34.
- Kozłowski S.K., Dalmeri G., 2000, Riparo Gaban: the Mesolithic layers, Preistoria Alpina 36:3-42
- Remondino, F., El-Hakim, S., 2006: Image-based 3D modelling: a review. Photogrammetric Record, 21(115), pp. 269-291.
- Rizzi, A., Voltolini, F., Remondino, F., Girardi, S. Rizzi, A., Gonzo, L., 2007: Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritage. VIII Conference on Optical 3D Measurement Techniques - Gruen/Kahmen (Eds), pp. 16-24, Vol.2, July 2007, Zurich, Switzerland.
- Voltolini, F., El-Hakim, S., Remondino, F., Girardi, S., Rizzi, A., Pontin, M., and 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.