

Tecniche ottiche e laser per l'acquisizione di fratture ossee in ambito bioarcheologico

Emanuela Faresin (*), Matteo Turchetto (**), Giuseppe Salemi (*),
Gianmaria Concheri (**), Roberto Meneghelo (**), Gianpaolo Savio (**),
Alessandro Canci (*), Luciano Salzani (***), Michele Cupitò (*)

(*) Università degli Studi di Padova, Dipartimento dei Beni Culturali (dBC), Palazzo Liviano, Piazza Capitaniato 7,
35139 Padova, Italy, Tel. 0498274592, e-mail: giuseppe.salemi@unipd.it

(**) Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova,
Via Venezia 1, 35131 Padova, Italy

(***) Soprintendenza per i Beni Archeologici del Veneto (SBAV), Italy

Riassunto

I vantaggi dei metodi di acquisizione non a contatto nel campo dei Beni Culturali sono numerosi: dalla generazione di un modello virtuale fotorealistico alla misurazione di particolari ad alta risoluzione in modo non invasivo.

In questo lavoro si documenta l'acquisizione ottica e *3D laser scanning* di una frattura perimortale su un cranio appartenente alla necropoli di Olmo di Nogara, datata tra la media e la recente età del Bronzo. Lo studio della frattura permette, in ambito bioarcheologico, di ricostruire lo stato di salute, le condizioni di vita e le cause della morte. Lo strumento utilizzato è l'OGP SmartScope Flash CNC 300, un sistema multisensore dotato di un tastatore a contatto, un sistema ottico con zoom elevato (30X – 600X) ed un singolo raggio laser coassiale che può acquisire in scansione continua lungo la superficie con una risoluzione di 0,5 µm. La frattura è stata rilevata sia con il laser coassiale che con il sensore ottico ed alcuni dettagli del tessuto osseo sono stati acquisiti ad elevato ingrandimento (33.4X e 88.3X). Le linee di acquisizione hanno reciprocamente una distanza di 0,05 mm ed ogni punto lungo la linea è stato acquisito ogni 0,05 mm. Le nuvole di punti generate sono state processate nell'ambiente di *Reverse Engineering* Geomagic Studio 12. È stato così possibile verificare la bontà di questo approccio basato sull'acquisizione multisensore; la *standard deviation 3D* è risultata essere di 0,029 mm.

Abstract

The advantages of no-contact methods of acquisition in the field of Cultural Heritage are numerous: from the generation of a photorealistic virtual model to the measurements of details.

In this paper the optical acquisition and the 3D laser scanning of a perimortal fracture of a skull, dated between the media and recent Bronze Age, are presented. This study allows, in the bioarchaeological context, to reconstruct the state of health, the living conditions and the causes of death.

The instrument used is the OGP SmartScope Flash CNC 300, a multisensor system equipped with a touch probe, a high zoom (30X-600X) optical system and a single coaxial laser beam able to acquire with a resolution of 0.5 µm. The fracture was analyzed with both laser and optical sensor; some details of bone tissue were acquired with high magnification (33.4X and 88.3X). The Reverse Engineering software Geomagic Studio 12 was used for the processing of the points clouds and the evaluation of quantitative parameters.

Introduzione

Gli studi in ambito bioarcheologico sulle fratture ossee mirano a contribuire alla ricostruzione dei contesti comportamentali ed ambientali delle civiltà del passato.

Queste analisi si sono concentrate sullo sviluppo di metodi per identificare l'agente responsabile della lesione proponendo diversi criteri per la distinzione (Bello, Soligno, 2008), (Dominguez-Rodrigo et al., 2009), (Lewis, 2008), (Smith et al., 2007).

Lo studio morfologico inizialmente si avvaleva della microscopia ottica, ma recentemente ha beneficiato dello sviluppo della microscopia ottica a scansione (SEM) (Greenfield, 2006) e della fotografia digitale (Gilbert, Richards, 2000).

In questo lavoro si presenta un metodo per l'analisi delle fratture ossee con l'utilizzo della ricostruzione tridimensionale della loro morfologia utilizzando differenti metodologie di acquisizione e verificando la bontà di un approccio multi sensore.

Inquadramento storico

Il cranio oggetto di studio proviene dalla necropoli di Olmo di Nogara, sito archeologico datato tra la media e recente età del Bronzo che si trova poche centinaia di metri ad ovest del centro abitato di Nogara a sud di Verona. La necropoli si trova presso la sponda destra del paleoalveo del Tartaro, su un lungo dosso sabbioso che ha direzione NW-SE. La posizione leggermente sopraelevata, con suoli asciutti e sciolti, è una delle motivazioni principali per cui la zona è stata scelta e frequentata in epoche diverse. Le notizie sui primi rinvenimenti sono poche e vaghe. Scrive Zorzi "Nel sepolcro di Nogara, in contrada Olmo, si rinvennero scheletri distesi in nuda terra, accompagnati da grandi e pesanti spilloni di bronzo a testa tronco-conica, incisi, e da qualche ago crinale più sottile e leggero, dello stesso metallo, a tre occhielli abbastanza comune nelle palafitte gardensi" (Cupitò, Leonardi, 2005). Il complesso archeologico è stato oggetto di indagini sistematiche a partire dal 1987 attraverso una campagna di scavi effettuati dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici del Veneto.

Il complesso di Olmo di Nogara risulta particolarmente interessante poiché il campione antropologico restituito dal sepolcreto è uno dei più ampi e completi di tutta l'età del Bronzo italiana ed il materiale scheletrico è per la gran parte completo anatomicamente e in condizioni di conservazione eccellenti.

Il cranio proviene dalla tomba numero 38 (Figura 1): appartiene ad un giovane tra i 25 e i 35 anni; la lesione cranica si estende, attraversando obliquamente la sutura coronale, sull'osso frontale.

Date le sue caratteristiche morfologiche, si tratta dell'esito di un fendente inferto probabilmente dall'alto verso il basso e da destra verso sinistra. Si può ipotizzare che il colpo sia stato condotto da un soggetto destrimano posto in posizione elevata rispetto alla vittima.



Figura 1. Cranio numero 38; la frattura perimortale è marcata in rosso.

Strumentazione

Per l'acquisizione della frattura è stata utilizzata la macchina di misura a coordinate OGP SmartScope Flash CNC 300 (Figura 2).



Figura 2. OGP SmartScope Flash CNC 300.

È un sistema multisensor che può essere configurato, a seconda delle esigenze dell'utente, equipaggiandolo con differenti tipologie di sistemi di acquisizione: ad immagine, TTL laser a triangolazione, a contatto. La struttura è di tipo a portale e tavola mobile con un volume di lavoro pari a 300 x 300 x 250 mm ed una gestione di oggetti fino a 30 kg di peso.

La precisione dichiarata è:

- nello spazio XYZ: $E3 = (2,8 + 5L/1000) \mu\text{m}$;
- nel piano XY: $E2 = (1,8 + 5L/1000) \mu\text{m}$;
- lungo l'asse Z: $E1 = (2,5 + 5L/1000) \mu\text{m}$.

La parte ottica che costituisce il sistema ha un *range* di ingrandimento da un minimo di 33.4X ad un massimo di 294X, valore che può essere ulteriormente aumentato mediante l'impiego di lenti ed obiettivi aggiuntivi. L'elemento sensibile è una telecamera CCD a risoluzione 768 x 494 pixel.

L'illuminazione è assicurata da tre sistemi che, grazie alle loro differenti caratteristiche, permettono di mettere in evidenza zone differenziate dell'oggetto in esame:

- *back light* generata con un lampada a led verdi posizionata al di sotto del piano d'appoggio;
- luce a led bianca coassiale alla telecamera;
- sistema *smart ring* che emette una luce programmabile sia nella direzione che nell'angolo di incidenza (da 45° a 75° rispetto al piano) composto da sei anelli di led concentrici.

Il sistema laser si basa sulla tecnologia TTL (*Through The Lens*) ed è un sistema a triangolazione ottica con un *range* di messa a fuoco pari a 0,7 mm lungo l'asse Z che sfrutta la medesima lente del sistema ad immagine. Grazie ad un meccanismo di autofocus dinamico è possibile eseguire delle scansioni in modalità continua ottenendo una *range map* molto densa. In funzione della lente installata è possibile variare la distanza operativa lente – oggetto fino ad un massimo di 200 mm.

L'acquisizione a contatto avviene tramite la sonda prodotta dalla Renishaw, modello SP25M e può effettuare acquisizioni sia a punto singolo che in scansione continua; ciò è permesso dal trasduttore ottico presente all'interno del corpo della sonda che è costituito essenzialmente da due emettitori di infrarossi, due specchi e due sensori che rilevano il segnale emesso.

Tutto il sistema è gestito dal software proprietario MeasureMind 3D multisensor ed i dati ottenuti sono stati elaborati con l'ambiente di *Reverse Engineering* Geomagic Studio 12 / Qualify.

Acquisizione laser

Ai fini dell'acquisizione, l'asse X del sistema di riferimento della macchina è stato allineato lungo la dimensione principale della frattura e l'origine vicino all'inizio della stessa.

La frattura è stata acquisita eseguendo scansioni lineari lungo l'asse X del sistema di riferimento e le nuvole di punti sono state processate in Geomagic Studio 12 (Figura 3).

Il *pre processing* consiste nella riduzione del rumore; quindi la nuvola di punti viene triangolata generando una *mesh* poligonale (*Points – Wrap*).

Il primo step nel trattamento della *mesh* consiste nell'eliminazione delle facce anormali (*Polygons – Mesh Doctor*) e, successivamente, nel riempimento delle eventuali lacune introdotte durante l'acquisizione (*Polygons – Fill Holes*).

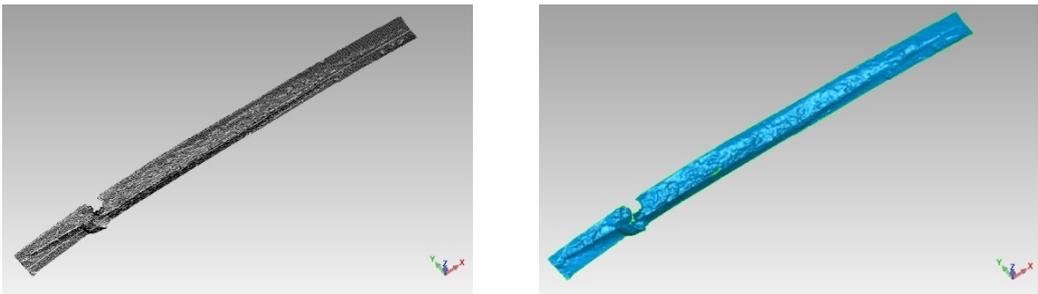


Figura 3. Nuvola di punti (a sinistra) e mesh (a destra) acquisita con il laser.

Acquisizione ad immagine

Per l'acquisizione ad immagine è stato utilizzato il comando *Softsectioner*: questa opzione di MeasureMind permette di valutare la coordinata Z di ciascun pixel del campo di vista della CCD.

Il sistema esegue un autofocus scansionando in un intervallo specifico e rilevando tutti i punti correttamente focalizzati; la densità dei punti acquisiti è definita in modo semiautomatico.

Anche in questo caso la nuvola di punti è stata esportata ed elaborata in Geomagic Studio 12 (Figura 4).

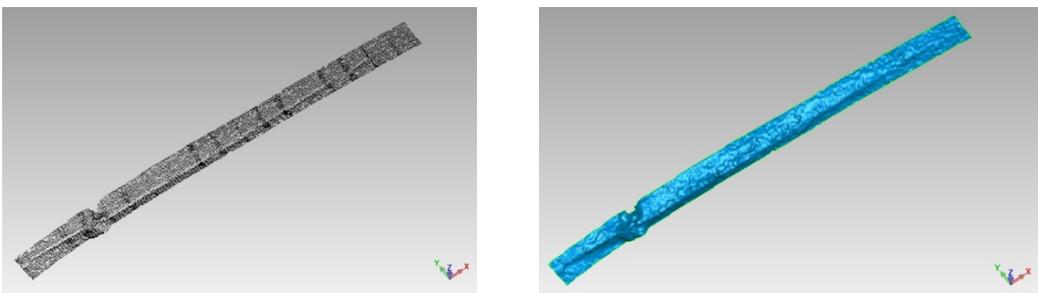


Figura 4. Nuvola di punti (a sinistra) e mesh (a destra) acquisita in modalità *Softsectioner*.

Elaborazione delle nuvola di punti.

La procedura dell'elaborazione delle nuvoli di punti prevede le seguenti fasi:

- filtraggio;
- *meshing*;
- correzione.

In via teorica, un dato tridimensionale, non dovrebbe mai essere filtrato in quanto si modificano le informazioni relative all'oggetto. Essendo però affette da errore dovuto alle proprietà ottiche degli strumenti di acquisizione (rumore), è necessario eliminarlo in modo tale da ottenere un modello coerente con il modello fisico reale.

È possibile filtrare in modo semi automatico questo errore andando ad eseguire un'analisi della superficie stessa ed individuando i punti che maggiormente si scostano da una superficie coerentemente costruita per *fitting*.

Il passaggio dalla nuvola grezza di punti 3D prodotta dallo strumento ad un reticolo di poligoni connessi tra di loro in cui vertici coincidono con i punti misurati (*mesh*) indicato con il termine *meshing*. In questa procedura automatica possono crearsi sporadiche connessioni anomale tra i poligoni. Per questo motivo è necessario eseguire un controllo con relativa correzione degli errori sulla *mesh* (Salemi et al., 2011).

I principali errori della *mesh* nella triangolazione sono:

- triangoli non *manifoald* (Figura 5 a): un triangolo condivide un lato più di una volta; le facce (V1 V2 V4), (V2 V4 V3) e (V2 V4 V5) condividono il lato (V2 V4).
- triangoli ridondanti (Figura 5 b): un vertice è condiviso da triangoli non connessi correttamente (V1 V2 V3).
- triangoli intersecati (Figura 5 c): un triangolo corretto interseca i triangoli limitrofi; il lato (V2 V3) della faccia (V1 V2 V3) è intersecato con il lato (V1 V4).
- facce instabili (Figura 5 d): i triangoli connessi presentano distorsioni della tipologia. Si possono avere triangoli con le normali invertite o triangoli con le facce invertite.

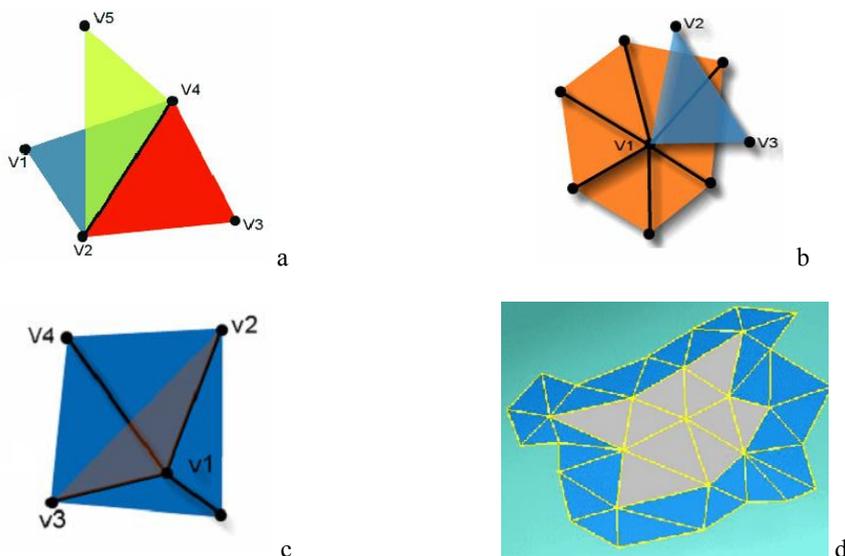


Figura 5. Principali errori della *mesh*. Triangoli non *manifoald* (a), triangoli ridondanti (b), triangoli intersecati (c), triangoli instabili (d), (AA. VV, 2006).

Deviation analysis

Le *mesh* acquisite con il sensore laser ed il sensore ottico sono state allineate (*Alignment – Global registration*) e confrontate (*Analysis – 3D Deviation*) al fine di determinare la differenza tra i due metodi di acquisizione (Figura 6).

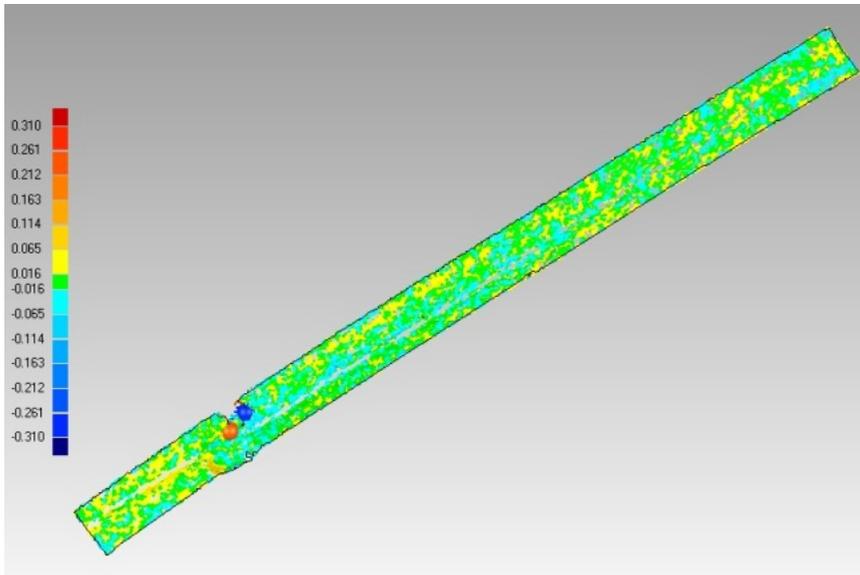


Figura 6. Deviation analysis.

La valutazione della distanza tra le *mesh* è rappresentata in un diagramma a colori dove si visualizzano le distanze calcolate in ciascun punto del modello in termini di differenza tra le coordinate dei punti corrispondenti. Ad ogni punto indagato è associato un colore che rappresenta il segno della distanza: positivo (tonalità del rosso) quando la prima superficie è esterna rispetto alla seconda, negativo (tonalità del blu) quando è interna. Dall'analisi eseguita, inoltre, è possibile ottenere i valori numerici della deviazione (Figura 7).

3D deviation		
Max (mm)	+ 0.240	- 0.310
Average (mm)	+ 0.022	- 0.022
Standard	0.029	
Max positive deviation		
X deviation (in mm)	0.027	
Y deviation (in mm)	0.238	
Z deviation (in mm)	- 0.017	
Max negative deviation		
X deviation (in mm)	-0.142	
Y deviation (in mm)	0.273	
Z deviation (in mm)	-0.036	

Figura 7. 3D deviation.

La *max positive* e la *max negative deviation*, sono localizzate nelle zone più deformate della frattura nelle quali sono presenti molti sottosquadri non acquisibili con il laser (Figura 8).

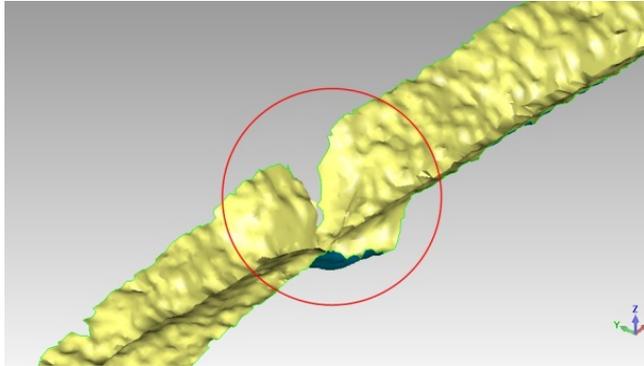


Figura 8. Regione deformata della frattura.

Acquisizione al microscopio

Per completare l'analisi della frattura, sono state acquisite otto immagini ad un ingrandimento di 33.4X utilizzate per creare una foto panoramica ad alta risoluzione nell'ambiente software di *image stitching* Autostich (Figura 9).

L'elevato ingrandimento del sistema ottico permette di osservare i microscopici dettagli del tessuto osseo: la porosità, non acquisibile con il sensore laser, è stata rilevata con ingrandimenti di 33.4X e 88.3X (Figura 10).



Figura 9. Foto panoramica ad alta risoluzione della frattura cranica.



Figura 10. Porosità ossea con ingrandimento 33.4X (a sinistra) e 88.3X (a destra).

Conclusioni

Negli ultimi anni si sta assistendo ad un crescente interesse nell'ambito del trasferimento tecnologico dal campo industriale a quello del patrimonio culturale. In particolare, le tecnologie per il *Reverse Engineering* trovano sempre più applicazioni anche nell'ambito bioarcheologico.

Uno dei principali vantaggi legati all'applicazione di tali tecnologie in questo campo è la non invasività dei processi di rilievo che permettono di ottenere riproduzioni digitali ad altissima risoluzione preservandone l'integrità.

Nel caso di studio qui presentato, la superficie della frattura cranica è stata acquisita con differenti metodologie: laser, ad immagine ed al microscopio dimostrando che, l'impiego integrato di diverse tecnologie porta notevoli vantaggi nello studio morfologico, geometrico e metrico di fratture ossee.

Bibliografia

AA. VV. (2006), Rapidform™ 2006 User Guide & Tutorial, 7-1, 7-2

Bello S. M., Soligno C. (2008), "A new method for the quantitative analysis of cutmark micromorphology", *Journal of Archaeological Science*, 35: 1542-1552

Cupitò M., Leonardi G. (2005), "La necropoli dell'età del Bronzo all'Olmo di Nogara", *Memorie del Museo Civico di Storia Naturale di Verona*, 488-491

Dominguez- Rodrigo M., De Juana S., Galan A. B., Rodriguez M. (2009), "A new protocol to differentiate trampling marks from butchery cut marks" *Journal of Archaeological Science*, 36: 2643-2654

Gilbert W. H., Richards G. D. (2000), "Digital Imaging of bone and tooth modification", *The Anatomical Record*, 261: 237-246

Greenfield H. J. (2006), "Slicing cut marks on animal bones: diagnostic for identifying stone tool type and raw material", *Journal of Field Archaeology*, 31: 147-163

Lewis J. E. (2008), "Identifying sword marks on bone: criteria for distinguishing between cut marks made by different classes of bladed weapons", *Journal of Archaeological Science*, 35: 2001-2008

Salemi G., Canci A., Salzani L., Cupitò M., Concheri G., Meneghello R., Savio G., Faresin E. (2011), "3D high resolution photo realistic models from a protohistoric burial sites (Olmo di Nogara, Italy), XXIII International CIPA Symposium

Smith M. J., Brickley M. B., Leach S. L. (2007), "Experimental evidence for lithic projectile injuries: improving identification of an under-recognised phenomenon", *Journal of Archaeological Science*, 34: 540-553