

RUGGERO PINTUS<sup>1</sup> - ENRICO GOBBETTI<sup>2</sup> - GIUSEPPA TANDA<sup>3</sup> - MASSIMO VANZI<sup>4</sup>

## Acquisizione digitale multi-sensore di siti archeologici: il caso di Montessu

---

RIASSUNTO - ACQUISIZIONE DIGITALE MULTI-SENSORE DI SITI ARCHEOLOGICI: IL CASO DI MONTESSU -

RÉSUMÉ - -

SUMMARY - -

### INTRODUZIONE

Nello studio di un sito archeologico è di fondamentale importanza l'attività di rilievo metrico e colorimetrico, che si è sempre effettuata mediante numerose tecniche, dal disegno a mano alla documentazione fotografico/fotogrammetrica. Negli ultimi anni sono emerse tecnologie di acquisizione digitale e algoritmi per il trattamento di grossi volumi di dati che diminuiscono le tempistiche

di rilievo, aumentando affidabilità ed accuratezza della analisi (Cain *et alii* 2009). Tipicamente, una volta scelto l'oggetto di studio, viene scelta la tecnologia di rilievo che più si adatta ad esso; per esempio la tecnologia di scansione laser a tempo di volo è adatta per ambienti di grandi dimensioni (CyArk), mentre per oggetti di media/piccola dimensione quali manufatti, utensili o statue è consigliabile usare la scansione laser a triangolazione (The Digital Michelangelo Project); la fotometria stereo è invece molto adatta a superfici tipo bassorilievo (Havemann *et alii* 2008; Freeth *et alii* 2006). Esistono anche numerosi casi in cui, a differenza dei lavori appena citati, vengono usate contemporaneamente più tecniche per il rilievo (Stumpf *et alii* 2003; Guidi *et alii* 2008). In ogni caso, queste tecnologie producono una quantità di dati molto alta, permettendo di ottenere ricostruzioni misurabili campionate molto densamente. Attraverso tecniche di visualizzazione e distribuzione online di

<sup>1</sup> CRS4 (Centro di Ricerca e Sviluppo, Studi Superiori in Sardegna), Loc. Piscina Manna, Edificio 1, 09010 Pula (CA-Italy); tel. 070/9250347; e-mail: ruggero@crs4.it

<sup>2</sup> CRS4 (Centro di Ricerca e Sviluppo, Studi Superiori in Sardegna), Loc. Piscina Manna, Edificio 1, 09010 Pula (CA-Italy); tel. 070/9250318; e-mail: gobbetti@crs4.it

<sup>3</sup> CIPPM (Centro Interdipartimentale per la Preistoria e Protostoria del Mediterraneo)/Dipartimento di Scienze archeologiche e Storico-artistiche - Università degli Studi di Cagliari, Piazza Arsenale 1, 09124 Cagliari; tel. 070/6757616; e-mail: gtanda@unica.it

<sup>4</sup> DIEE (Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica) - Università degli Studi di Cagliari, Piazza d'Armi, 09123 Cagliari (CA-Italy); tel. 070/6755775; e-mail: vanzi@diee.unica.it

grandi modelli 3D di dati (Bettio *et alii* 2009) può essere possibile una condivisione in remoto del dato digitale.

Il lavoro presentato mostra un caso applicativo di documentazione digitale, metrologica e colorimetrica di alcuni elementi della necropoli a domus de janus di Montessu (Villaperuccio-CI, Italia). Esso si inserisce nel dibattito in corso, complesso e delicato, sulla problematica della documentazione delle incisioni rupestri e si propone come contributo utile alla ricerca di soluzioni corrette sul piano scientifico (Arca *et alii* 2008).

#### LA NECROPOLI DI MONTESSU

Scoperta negli anni '70 da Enrico Atzeni, la necropoli è costituita da 35 grotticelle funerarie artificiali scavate sui versanti di un anfiteatro naturale trachitico di straordinaria bellezza, a circa 2 km dal comune di Villaperuccio. Non lontano da essa, sulla sommità di un debole rilievo, si sviluppano l'insediamento abitativo di S'Arriorgiu e l'area culturale di Terrazzu, segnata da un gruppo di menhir, tra cui il celebre monolite denominato "Luxia Rabiosa". La necropoli di Montessu fra le necropoli neolitiche finora documentate nell'Isola si distingue per il numero delle tombe (è forse la necropoli più vasta della Sardegna), per la singolarità dell'ambiente naturale, per la varietà e la ricchezza delle architetture ipogeiche, per la presenza nell'intera area di un sistema di recinti ed allineamenti megalitici di funzione presumibilmente culturale e di *un'allée couverte*. Appare, inoltre, di grande interesse per la presenza singolare di motivi scolpiti a bassorilievo, incisi e dipinti sulle pareti di dieci ipogei. La tomba II, assai danneggiata, presenta tracce dell'anticella e di una camera sub-circolare con due nicchie sopraelevate e perimetro a lobi a forma di rene (Atzeni 1975; Forresu 2000; Cicilloni 2009). I motivi figurativi sono disposti sulla parete, entro due specchi ribassati disposti ai lati di una sorta di lesena centrale. Sul lato destro sono costituiti da tre motivi trapezoidali distinti, leggermente rilevati sul piano. Più complessa è la composizione figurativa dello specchio di sinistra, con motivi simmetricamente articolati ed ordinati su due fasce, l'una superiore, forse appena sotto la linea del soffitto, l'altra alla base, presso il pavimento. Nella fascia alta si individuano motivi ad arco plurimo e spiralforni (Cicilloni 2008, pp. 33-36). Più vari, nella loro ripetitività, sono i motivi della fascia inferiore

disposti poco sopra il pavimento e costituiti da una fascia a bassorilievo appena percettibile, con figure quadrangolari sporgenti verso l'alto. Questi motivi presentano a ciascuno spigolo una spirale avvolta a sinistra, salvo per il motivo situato all'estremità destra della parete, avvolto al contrario. La tecnica di esecuzione dei motivi spiralforni è la martellina diretta. All'estremità sinistra si osserva un corniforme costituito da sei archi concentrici ad incisione (a martellina diretta o picchettatura) che sormonta una figura trapezoidale a bassorilievo, interpretata come muso dell'animale rappresentato (Tanda 1985, pp. 193-195). Questo complesso figurativo pone problemi di vario genere, figurativo, genetico, esegetico, all'interno delle problematiche dell'arte ipogeica sarda che l'economia del presente lavoro non consente di approfondire (Tanda 1985, pp. 193-195).

#### ACQUISIZIONE 3D

La procedura di rilievo metrologico e colorimetrico di un oggetto reale dipende fortemente dalla metodologia utilizzata. Tuttavia, è possibile comunque elencare una serie di operazioni generali che sono comuni a ciascuna tecnica: ispezione e studio dell'oggetto/sito da acquisire, progettazione delle acquisizioni, acquisizione delle scansioni (*range maps*), allineamento delle scansioni, processamento del modello, unione delle scansioni, applicazione del colore e produzione del modello finale. Nelle successive sezioni spiegheremo questi passi relativamente al rilievo metrologico effettuato presso due tombe nell'area archeologica della necropoli di Montessu.

#### *Laser Scanner a Tempo di Volo*

La prima tecnologia usata nel sito di Montessu è stata la scansione laser a tempo di volo. Lo strumento emette un raggio laser in direzione del punto che vuole acquisire e, conoscendo la velocità della luce nell'aria riesce a misurare la distanza del punto dallo scanner misurando il tempo che impiega il raggio a tornare indietro. Nel nostro caso è stato usato un laser scanner ScanStation2 della Leica. La precisione di questo genere di strumenti nella misura della distanza è dell'ordine di grandezza dei millimetri (nel nostro caso 1 mm a 100 m) e la velocità di acquisizione è dell'ordine di migliaia di punti al secondo (nel nostro caso 50.000 punti al secondo).

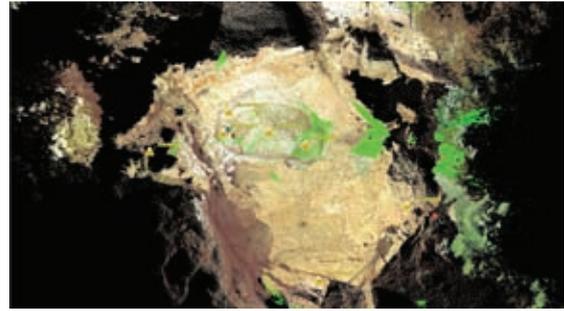
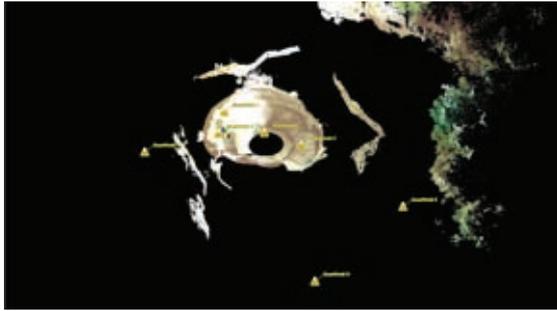


Fig.1 - Range Map di una scansione della "Tomba delle Spirali" e il posizionamento dello scanner relativo alle otto scansioni effettuate (gli otto triangoli nella figura) (sinistra); insieme delle otto scansioni allineate della "Tomba delle Spirali" (destra).

La fig. 1 mostra la prima scansione, effettuata posizionando il laser scanner al centro della tomba, e il posizionamento dello scanner relativo alle otto scansioni effettuate (gli otto triangoli nella figura). Poiché ogni singola scansione è effettuata spostando lo scanner e poiché il sistema di riferimento ha l'origine sempre coincidente con lo scanner, è evidente che due scansioni acquisite da punti diversi non saranno posizionate correttamente l'una rispetto all'altra. Per questo motivo è stato necessario allineare tramite un tool semi-automatico le otto scansioni. Il primo passo di allineamento consiste nell'operazione manuale di selezione di almeno tre coppie di punti corrispondenti di una range map con l'altra. Il restante lavoro di allineamento viene effettuato in automatico dal software, che applica un algoritmo di raffinamento (Besl e McKay 1992) che produce l'allineamento finale delle due scansioni. La stessa procedura può essere ripetuta aggiungendo le restanti scansioni (fig. 1). In seguito ad un intervento manuale di pulizia del dato, mediante editing digitale, dei punti misurati che non si desidera mantenere nel modello finale, è utile un passo di unione (merging) e regolarizzazione della nuvola

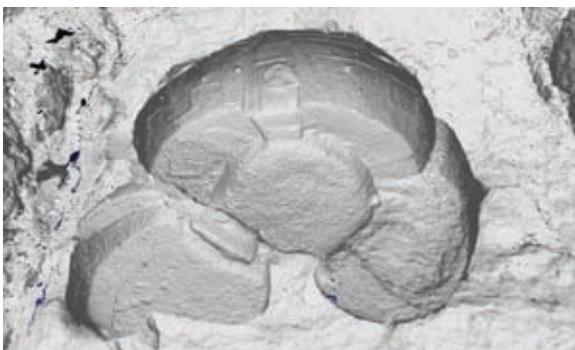


Fig. 2 - Modello 3D digitale della "Tomba delle Spirali" dopo la fase di processamento ed unione.

di punti 3D (Cuccuru *et alii* 2009). La fig. 2 mostra il modello 3D dopo la fase di processamento.

Generalmente i laser scanner acquisiscono non solo la geometria, ma anche il colore della superficie; tuttavia, questo segnale non è tipicamente di buona qualità e per questo motivo si usa acquisire nuovamente con una normale fotocamera un insieme di immagini dell'oggetto. E' quindi necessario mappare queste immagini (che rappresentano il dato colorimetrico grezzo) sul nostro modello 3D (Callieri *et alii* 2008). La fig. 3 confronta una immagine reale



Fig. 3 - Confronto fra foto originale della "Tomba delle Spirali" (sinistra) e rendering del modello 3D misurato e con colore applicato (destra).

della grotta con il rendering del modello 3D misurato. La fig. 4 mostra, invece, il modello 3D finale della "tomba 2".



Fig. 4 - Modello 3D con colore applicato del pavimento (sinistra) e del soffitto (destra) della "Tomba delle Spirali". Acquisizione con laser scanner a tempo di volo.

#### *Laser Scanner a Triangolazione*

L'utilizzo di una singola tecnica di acquisizione non sempre è una scelta opportuna; nel nostro caso, per esempio, l'interesse nel rilievo non era concentrato solo alla misurazione e all'analisi della struttura della

grotta, ma anche allo studio delle incisioni a forma di spirale presenti sulle pareti della stessa. Quindi, benché la precisione e la risoluzione dell'ordine di grandezza del mm siano sufficienti per la gran parte del modello, non lo sono di certo per la parte relativa alle incisioni. Per questo motivo, in questa zona è stata adottata una tecnica di rilievo con sistemi di scansione laser a triangolazione. Questi strumenti proiettano un piano laser che interseca la superficie in una curva nello spazio; una fotocamera montata su di essi registra l'immagine di questa curva e applicando un semplice modello matematico riesce a misurare la distanza dei punti in questa curva rispetto al suo sistema di riferimento. Lo strumento da noi utilizzato per queste acquisizioni è uno Scanner Desktop della NextEngine e la precisione e la risoluzione di questo genere di strumenti riesce ad arrivare all'ordine di grandezza del decimo di mm. La fig. 5 mostra il modello finale di due incisioni presenti nella "Tomba delle Spirali".



Fig. 5 - Modello 3D con colore applicato di due dettagli della "Tomba delle Spirali" acquisito con laser scanner a triangolazione; dettagli a denti di lupo (sinistra) e due incisioni a forma di spirale (destra).

#### *Photometric Stereo*

Gran parte delle figurazioni eseguite sulle pareti della tomba hanno una struttura molto simile ad un 2.5D (per esempio tipo bassorilievi, incisioni etc.). In questi casi può essere applicata un'altra tecnica,

nota con il nome di Photometric Stereo che permette una acquisizione veloce e ad alta risoluzione sia della geometria che del colore. Più precisamente, invece che acquisire il semplice colore, come farebbe una normale fotocamera, questa tecnica misura quello che viene chiamato più propriamente body color, cioè il colore effettivo della superficie privato del segnale di ombreggiatura. La strumentazione è composta da una normale fotocamera e da tre (o più) illuminatori (nel nostro caso quattro); il sistema acquisisce quattro immagini e per ciascuna immagine accende un solo illuminatore. Da queste quattro immagini vengono calcolati per ciascun pixel geometria e body color. Dato che l'acquisizione della geometria ad alta risoluzione è stata effettuata tramite la scansione laser a triangolazione, abbiamo applicato questa tecnica per colorare il modello 3D nella fig. 5.

#### VISUALIZZAZIONE

Indipendentemente dalla tecnica di acquisizione utilizzata, il modello finale ottenuto è il risultato del rilievo digitale della forma e del colore. Tenuto conto della precisione, accuratezza e risoluzione del dato, il modello è una rappresentazione oggettiva della realtà in un preciso momento. A questo punto entrano in gioco tutte le tecniche che permettono la visualizzazione in real-time di questo genere di dati; recentemente, proprio nel settore dei beni culturali, è stato presentato un sistema di visualizzazione (Bettio *et alii* 2009) basato su nuvole di punti che permette di visualizzare un modello di milioni di punti in real-time su un normale pc consumer. Inoltre il software permette di effettuare

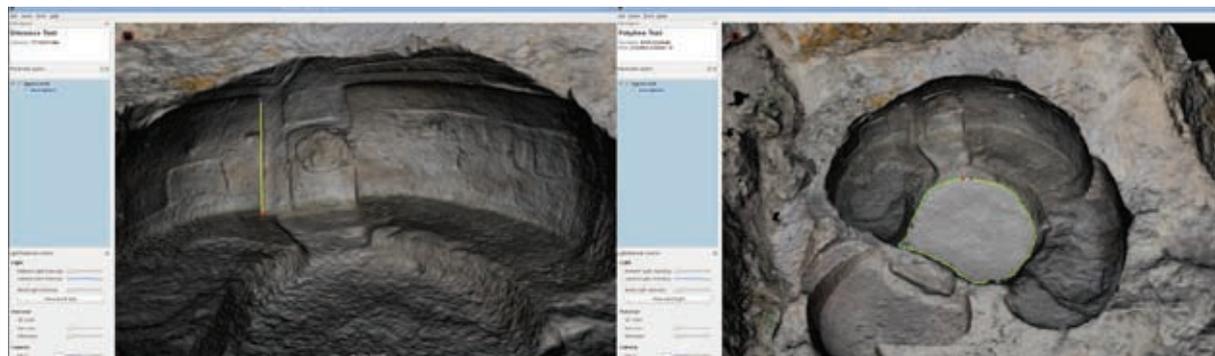


Fig. 6 - Mediante semplici tool grafici è possibile effettuare misure di lunghezze (sinistra), perimetri e aree (destra) in real-time su grossi modelli 3D; in questa figura vediamo questi tool applicati alla "Tomba delle Spirali".

analisi di vario tipo sul modello 3D; mediante tool grafici consente la misura di distanze, perimetri e aree (fig. 6); per l'analisi di oggetti quali incisioni su pietra o più in generale di bassorilievi, permette all'operatore di spostare in real-time la sorgente luminosa, consentendo la simulazione di luce radente per una percezione migliore dei dettagli superficiali. Un'altra importante caratteristica di questo software è la possibilità di distribuire il dato attraverso la rete; questo significa che tutte le misurazioni, le simulazioni ed in generale le analisi che si possono effettuare sul modello, si possono anche effettuare se il dato non è presente nel computer in uso, ma è accessibile tramite la rete internet.

### STAMPA 3D

Le tecnologie di prototipazione rapida permettono di produrre copie reali di modelli 3D digitali, impiegando numerosi tipi di materiali. Nell'ambito dei beni culturali il materiale più usato tra quelli disponibili è il gesso, che spesso somiglia, come resa materica, ai materiali originali (terra, argilla etc); in più in questo settore è diffuso l'utilizzo di strumenti di stampa 3D a colori, che meglio rendono la riproduzione di manufatti archeologico-culturali. Recenti lavori (Cignoni *et alii* 2008; PINTUS *et alii* 2010) hanno dimostrato la possibilità di aumentare la percezione dei dettagli delle stampe sia sfruttando la possibilità di stampare a colori, sia modificando la geometria. In questo lavoro presentiamo i risultati di una stampa in gesso a colori, utilizzando la stampante 3D ZCorp ZPrinter 450, del modello delle incisioni a spirale della "Tomba delle Spirali". La fig. 7 mostra la stampa scalata di questo dettaglio con un colore calcolato per aumentare la percezione dei dettagli.



Fig. 7 - Stampa 3D di una copia reale in scala delle incisioni presenti nella parete della "Tomba delle Spirali". Il colore è stato ottenuto calcolando prima l'ambient occlusion dal 3D e

successivamente applicando tecniche di enhancing al segnale colore del modello 3D.

### 6. CONCLUSIONI

In questo lavoro abbiamo mostrato l'applicazione di tre tecniche di acquisizione digitale al caso di studio dell'area archeologica della necropoli di Montessu. Abbiamo mostrato come queste tecnologie possano restituire un modello denso, ad alta risoluzione, accurato e, quindi, misurabile del sito. Abbiamo mostrato come queste tecnologie siano ormai mature e affidabili. Il loro utilizzo può aumentare la facilità di studio e di condivisione di informazioni tra gruppi di ricerca del settore dei beni archeologici e culturali, tuttavia, la loro complessità richiede una stretta collaborazione tra ricercatori nel settore della acquisizione e visualizzazione e nel settore archeologico.

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ARCA A., CASINI S., DE MARINIS R., FOSSATI A. 2008, *Arte rupestre, metodi di documentazione: storia, problematiche e nuove prospettive*, RSP LVIII, pp. 351-384.
- ATZENI E. 1972, *Notiziario: Montessu (Santadi)*, RSP XXVII, 2, pp.477-478.
- BESL P.J., MCKAY N.D. 1992, *A method for registration of 3-d shapes*, IEEE Trans. Pat. Anal. and Mach. Intel. 14(2), pp. 239-256.
- BETTIO F., GOBBETTI E., MARTON F., TINTI A., MERELLA E., COMBET R. 2009, *A point-based system for local and remote exploration of dense 3D scanned models*, in AA.VV. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, pp.
- CAIN K., GILL T., DOWNING G., MARTINEZ P., EAKLE M., DEBEVEC P., BROWN B.J., WARD G., GLENCROSS M., CIGNONI P. 2009, *Computation and Cultural Heritage: Fundamentals and Applications*, SIGGRAPH Course.
- CALLIERI M., CIGNONI P., CORSINI M., SCOPIGNO R. 2008, *Masked Photo Blending: mapping dense photographic dataset on high-resolution 3D models*, Computer & Graphics, pp.
- CICILLONI R. 2009, *Montessu. Una necropoli preistorica di 5000 anni fa*, Mogoro.
- CIGNONI P., GOBBETTI E., PINTUS R., SCOPIGNO R. 2008, *Color Enhancement Techniques for Rapid Prototyping*, in AA.VV. Proceedings of the 9th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, pp.
- CYARK, <http://archive.cyark.org/>.
- CUCCURU G., GOBBETTI E., MARTON F., PAJAROLA R., PINTUS R. 2009, *Fast low-memory streaming MLS reconstruction of point-sampled surfaces*, Graphics Interface, pp.
- FREETH T., BITSAKIS Y., MOUSSAS X., SEIRADAKIS J., TSELIKAS A., MANGOU H., ZAFEIROPOULOU M., HADLAND R., BATE D., RAMSEY A., ALLEN M., CRAWLEY A., HOCKLEY P., MALZBENDER T., GELB D., AMBRISCO W., EDMUNDS M.

- 2006, *Decoding The Ancient Greek Astronomical Calculator Known As The Antikythera Mechanism*, Nature 444, pp. 587-591.
- FORRESU R. 2000, *Montessu, necropoli a domus de janas*, in ATZENI E., MELIS M.G., a cura di, *Villaperuccio tra Ipogeismo e Megalitismo, Testimonianze archeologiche dalla preistoria all'età romana*, pp. 82-83, Sassari.
- GUIDI G., REMONDINO F., RUSSO M., MENNA F., RIZZI A. 2008, *3D Modeling of Large and Complex Site Using Multi-Sensor Integration and Multi-Resolution Data*, in AA.VV. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage, pp.
- HAVEMANN S., SETTGAST V., FELLNER D., WILLEMS G., VAN GOOL L., MULLER G., SCHNEIDER M., KLEIN R. 2008, *The Presentation of Cultural Heritage Models in Epoch*, in AA.VV. EPOCH Conference on Open Digital Cultural Heritage Systems, pp.
- PINTUS R., GOBBETTI E., CIGNONI P., SCOPIGNO R. 2010, *Shape Enhancement for Rapid Prototyping*, The Visual Computer, pp.
- STUMPFEL J., TCHOU C., YUN N., MARTINEZ P., HAWKINS T., JONES A., EMERSON B., DEBEVEC P. 2003, *Digital Reunification of the Parthenon and its Sculptures*, in AA.VV. Proceedings of the 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Brighton, UK, pp.
- TANDA G. 1985, *L'arte delle domus de janas nelle immagini di Ingeborg Mangold*, Sassari.
- THE DIGITAL MICHELANGELO PROJECT, [www.graphics.stanford.edu/projects/mich](http://www.graphics.stanford.edu/projects/mich).