



## STEREOFOTOMETRIA PER LA DOCUMENTAZIONE IN 3D DI INCISIONI E RILIEVI. APPLICAZIONI NELL'ARTE PREISTORICA DELLA SARDEGNA

*Massimo Vanzi\*, Cala Mannu\*\* & Giuseppa Tanda\*\*\**

**ABSTRACT** - A photogrammetric technique (Photometric Stereo), known since a long time, is here proposed as an agile and cheap tool for 3D recording engravings and reliefs.

Different from stereoscopic or monoscopic Photogrammetry, the Photometric Stereo uses a standard camera at a fixed point to take typically four snapshots of the same object under different lighting directions.

Image processing gives three maps: the "Albedo" (that is the color of the surface without any shading), the x-gradient and the y-gradient. From gradient maps one gets the 3D shape of the original surface, with results comparable with those obtained by the much more expensive and demanding laser scanning machines. The 3D surface, once re-colored with the original Albedo, renders highly natural virtual reconstructions.

The key point is the extreme simplicity of the acquisition procedure and the preservation of the 3D information even under non-ideal conditions.

Examples will be given on decorations of the Sardinian "Domus de Janas". Under the point of view of Art as a tool for reconstructing History, the method allows any scientist to investigate and interpret the handicrafts in their completeness of 3D shape and original color, without any intermediate elaboration.

**RIASSUNTO** - Una tecnica fotogrammetrica (Photometric Stereo) nota da tempo viene proposta come metodologia agile ed economica per la documentazione di incisioni e rilievi in 3D.

A differenza delle tecniche fotogrammetriche stereoscopica e monoscopica, la Photometric Stereo utilizza una fotocamera standard fissa per acquisire tipicamente quattro immagini sotto angoli di illuminazione differenti.

La elaborazione delle immagini restituisce separatamente tre mappe: l'"albedo" (il colore proprio della superficie senza ombreggiature) il gradiente in direzione x ed il gradiente in direzione y. Dalle mappe di gradiente si ottiene la forma 3D della superficie, con risultati confrontabili con quelli di apparecchi a scansione laser. La superficie 3D, ricolorata con l'albedo, fornisce ricostruzioni virtuali di grande naturalezza.

Il punto chiave è la estrema semplicità della ripresa e la conservazione delle informazioni 3D anche in condizioni di ripresa non ideali. Applicazioni alle decorazioni delle "Domus de Janas" sarde vengono presentate come esempio.

Dal punto di vista dell'arte quale strumento di ricostruzione storica, il metodo offre la possibilità di fruizione, archiviazione e condivisione dei reperti nella loro completezza, pur se virtuale, di forma 3D e colore, senza la mediazione interpretativa, che ogni studioso può elaborare per proprio conto, come dinanzi all'oggetto reale.

### INTRODUZIONE

Le tecniche consolidate per il rilievo archeologico sono efficacemente riassunte in: (BIANCHINI, 2012), e tra queste la ricostruzione tridimensionale di ambienti e manufatti ha ormai pervaso la pratica internazionale.

Tuttavia il caso particolare delle incisioni e dei rilievi pone alcune sfide che non sempre le tecniche consolidate superano efficacemente.

Si prenda il caso di incisioni rupestri, o di decorazioni parietali scolpite o incise, o di epigrafi. Si prenda, ad esempio, il logo di questo stesso congresso.

È esperienza comune che tali reperti, spesso corrosi dagli agenti atmosferici e ricoperti da patine secolari o millenarie, rivelino i propri dettagli ricorrendo a illuminazioni radenti, da adattare in direzione e inclinazione di dettaglio in dettaglio per ricostruire fin dove possibile il disegno o il testo in ogni suo particolare. La documentazione fotografica, nei casi più complessi, risulta assai problematica.

Il punto cruciale è che ciò che è importante è il tratto inciso (o scolpito in rilievo), e cioè una struttura geometrica tridimensionale minuta, ricca di dettagli e di volume quasi nullo. Questo, una volta escluse le tecniche di rilievo per contatto, porta a raccomandare l'utilizzo di tecniche 3D per la documentazione integrale di questo tipo di reperti.

\* Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica (DIEE), Università degli Studi di Cagliari, Italy

\*\* Corso di Laurea in ingegneria Elettronica, Dipartimento di Ingegneria Elettrica ed Elettronica (DIEE), Università di Cagliari, Italy

\*\*\* Dipartimento di Scienze Archeologiche e Storico-artistiche, Centro Interdipartimentale per la Preistoria e Protostoria del Mediterraneo (C.I.P.P.M.), Università degli Studi di Cagliari, Italy



Questa soluzione teorica ha molti aspetti positivi, tra i quali la possibilità di ricostruire gli oggetti al computer, ruotandoli e illuminandoli virtualmente e quindi replicando in studio tutte le condizioni di osservazione possibili altrimenti solo in campo; la possibilità di produrre repliche solide (eventualmente ingrandite o ridotte) degli oggetti, mediante stampanti tridimensionali; la facilità di condivisione, per via elettronica, degli archivi non mediati dalla interpretazione dello studioso.

Tuttavia, nel caso specifico, la soluzione stessa risulta proibitiva quando si debba ricorrere alla scansione laser per il rilievo 3D. Il costo della attrezzatura, la complessità delle operazioni, il dettaglio millimetrico richiesto, la lunghezza della fase di acquisizione, concorrono a scoraggiare questa metodologia ad esempio in siti ricchi di decorazioni da documentare ad una ad una.

Non ultimo, si consideri anche il problema della colorazione della superficie, che in reperti scolpiti e dipinti contiene informazioni che nella scansione laser vanno separatamente registrate per via fotografica (il laser di per sé non “vede” i colori), includendo effetti di ombre e ombreggiature che permangono anche nella ricostruzione che utilizzi tale colore originale nel “rendering” al computer.

D'altra parte, le straordinarie prestazioni delle scansioni laser in termini di ricostruzione e misura di forme e volumi paiono oggettivamente sovradimensionate per oggetti in cui la forma della superficie, piana, convessa, irregolare, è certamente meno importante che il tratto su di essa inciso o scolpito.

Alternativamente, metodologie basate sulla ricomposizione delle volumetrie 3D a partire da immagini riprese da varie angolazioni (Multi-View) danno eccellenti percezioni tridimensionali, ma richiedono un numero assai elevato di riprese, da angolazioni non sempre possibili, e comunque mantenendo la limitazione sulla ombreggiatura già citata per la scansione laser.

#### PHOTOMETRIC STEREO E DECORAZIONI INCISE E SCOLPITE

Nell'ambito di un progetto interdisciplinare finanziato dalla Regione Sardegna, volto alla documentazione della decorazione incisa e scolpita delle Domus de Janas sarde, una tecnica nota da decenni ma poco utilizzata si è dimostrata particolarmente efficace nella soluzione del problema. La tecnica è nota come Photometric Stereo ed i suoi fondamenti tecnici sono illustrati in: (WOODHAM, 1980).

I principi della Photometric Stereo si basano sulla assunzione che la ombreggiatura (shading) di una superficie dipenda dalla direzione della luce che la illumina e dalla forma della superficie stessa, tramite una relazione matematica nota, indipendentemente dal suo colore.

Una singola immagine può già, sotto particolari ipotesi di uniformità del colore e conoscenza della illuminazione, restituire una stima di questa forma (Shape from Shading, HORN 1989), ma la metodologia utilizzata per le Domus de Janas si libera da queste ipotesi restrittive, e spesso non veritiere in molti casi pratici, acquisendo quattro immagini con una fotocamera standard posta in posizione fissa, e spostando una sorgente luminosa tipicamente al di sopra, al di sotto, a destra e a sinistra della fotocamera, sempre puntando al centro della superficie inquadrata.

In condizioni ideali, il quartetto di immagini consente di ottenere separatamente la altezza di ogni punto immagine (pixel) ed il suo colore originale, punto per punto, ripulito da ogni ombreggiatura (il cosiddetto “Albedo”).

È questa una peculiarità della Photometric Stereo, spesso sottovalutata: la ricostruzione della terza dimensione è accompagnata dalla misura del colore puro della superficie. Nessuna delle altre tecniche 3D disponibili raggiunge questo risultato, fondamentale per una ricostruzione virtuale che usi il colore originale, e non un suo surrogato artificiale. Questo aspetto, ben al di là dall'essere puramente estetico, fornisce la possibilità di registrare e divulgare la informazione intera del reperto in forma e colore, senza artefatti e interpretazioni.

#### ASPETTI TECNICO-MATEMATICI

Dal punto di vista tecnico-matematico, si dimostra che, indicate con i punti cardinali Nord, Est, Sud Ovest le immagini riprese con la illuminazione posta, rispettivamente, sopra, a destra, sotto e a sinistra della fotocamera, ciò che serve è eseguire una operazione algebrica come  $(\text{Nord-Sud})/(\text{Nord+Sud})$  tra pixel corrispondenti nelle immagini Nord e Sud. Questa operazione (poi ripetuta per la coppia Est, Ovest) dà esattamente la misura della pendenza della superficie nella direzione Nord-Sud, ossia lungo la verticale della immagine fotografata. In questo modo si ha la pendenza (matematicamente, il “gradiente”) in direzione sia della lunghezza che della larghezza della fotografia. Questo è un risultato assai importante, perché la ricostruzione della forma (ossia la aggiunta della altezza ad ogni punto-immagine) è un problema matematico noto da tempo in molti campi scientifici, e risolto nella teoria fin dalla fine del XIX secolo, e dalla pratica mediante metodi di calcolo computerizzato eseguibili da pacchetti software commercialmente reperibili con facilità.

Ad esempio, questo è il medesimo problema che si ha in elettrostatica per il calcolo del potenziale elettrico

a partire dalla conoscenza del corrispondente campo vettoriale. Come si può immaginare, gli strumenti di calcolo sviluppati per questi problemi sono quotidianamente utilizzati da fisici e ingegneri, e sono disponibili in versioni altamente automatizzate, che non richiedono alcuna conoscenza di fisica o matematica superiore per il loro utilizzo.

Infine, la ancor più semplice operazione di media algebrica tra le immagini:  $(\text{Nord} + \text{Sud} + \text{Est} + \text{Ovest})/4$  produce a sua volta una immagine che è direttamente il sopra citato Albedo, ossia il colore pure, non ombreggiato.

Una quarta combinazione matematica, infine, torna assai utile per il lavoro sul campo, ed è quello che viene definito “modulo del gradiente”, che combina la mappa del gradiente-x e del gradiente-y sommandone i quadrati. Il risultato è una singola immagine in cui nessun colore sopravvive, e i bordi incisi o scolpiti escono in grande risalto. Questa immagine non è la ricostruzione 3D, ma ne è una sorta di “riassunto bidimensionale”, che dice in tempi rapidissimi se la più ponderosa ricostruzione 3D completa avrà successo.

#### INFLUENZA DELLA IMPRECISIONE DI RIPRESA IN CAMPO

Al di là della teoria matematica, la cosa più utile e interessante per la pratica è la tolleranza della Photometric Stereo agli “sbagli”, quello che tecnicamente si indica come “robustezza dell'algoritmo”. Infatti, se invece di luci ideali, che dovrebbero essere uniformi e parallele, ad inclinazione esatta, si usano sorgenti luminose quali torce, lampade alogene o ordinari flashes fotografici, e addirittura se le luci vengono posizionate a mano con approssimazione immaginabilmente grossolana, le distorsioni che vengono introdotte riguardano la forma globale della superficie, ma non i particolari in essa incisi o scolpiti. Questo fatto rende la Photometric Stereo inadatta per la maggior parte dei casi alla ripresa 3D di oggetti a tutto tondo o superfici con profonde sporgenze o infossature, ma straordinariamente efficace per i bassorilievi e le incisioni, anche in condizioni precarie come quelle che spesso si incontrano in campo.

#### ARCHIVIAZIONE

Dal punto di vista della archiviazione, ogni inquadratura richiede la memorizzazione delle quattro immagini primitive Nord, Est, Sud, Ovest.

Per la condivisione e la divulgazione, non potendo pretendere che ogni studioso interessato ai reperti abbia anche il software per la elaborazione delle immagini in Photometric Stereo, la ricostruzione 3D può essere messa a disposizione in formati standard per la visualizzazione 3D o la stampa (es. STL per la Stereolotografia 3D).

Tuttavia, in un caso come quello del progetto Domus de Janas, dove l'equipe usa abitualmente la Photometric Stereo, la archiviazione più efficace è quella delle quattro immagini risultanti dal primo stadio di elaborazione: Gradiente-x, Gradiente-y, Modulo del Gradiente e Albedo. Questo quartetto occupa il medesimo spazio di memoria delle immagini primitive, contiene in assoluto tutta la informazione originale, e consente già ad una consultazione diretta di individuare i dettagli di forma (nel immagine Modulo del Gradiente) e le peculiarità cromatiche (nella immagine Albedo).

#### TEMPI DI ACQUISIZIONE E ELABORAZIONE

Il tempo di acquisizione di una sequenza Photometric Stereo è il tempo di scatto di quattro fotografie. Nella soluzione con flash a controllo remoto questo si riassume in pochi secondi.

Per la elaborazione, le immagini intermedie Gradiente-x, Gradiente-y, Modulo del Gradiente e Albedo si ottengono, su un computer portatile con facilità in campo, in pochi secondi (meno di 10).

Il calcolo della forma dai gradienti è, invece, ancora una operazione impegnativa, che può richiedere molti minuti di calcolo su un computer portatile odierno. Questo probabilmente è stato il vincolo che ha impedito la diffusione sul campo della Photometric Stereo: facendo un confronto con la scansione laser, quello che si guadagna in tempo e facilità di acquisizione lo si perde in elaborazione, e questo riporta in evidenza il problema della documentazione quando un sito contenga decine o centinaia di decorazioni incise o scolpite.

Tuttavia, il ricorso al Modulo del Gradiente consente di valutare in pochi istanti la bontà della acquisizione, e di visualizzare la presenza di quei dettagli che poi la ricostruzione 3D riprodurrà in forma realistica.

#### STRUMENTAZIONE

Dal punto di vista della strumentazione necessaria, questa potrebbe avvalersi di fotocamere ed impianti di illuminazione altamente sofisticati. Qui, tuttavia, si vuole sottolineare l'esigenza minima per ottenere risultati veloci ed adeguati alla documentazione delle decorazioni incise e scolpite.

In questo caso, occorre una fotocamera, un treppiede, un cavetto per lo scatto remoto (meglio ancora se lo scatto è telecomandato, funzione ormai disponibile in moltissimi apparecchi anche di fascia medio-bassa) e una sorgente luminosa.



Il tipo di sorgente luminosa deve sottostare a due vincoli: essere abbastanza potente da sovrastare la luce ambiente, ed avere la emissione da un singolo punto.

Il primo requisito ci dice che un sorgente continua (come un faretto alogeno) richiede di operare in luce ambiente molto bassa, e non certo in campo aperto. In questo caso, si accende la luce, si scatta la prima immagine, si sposta la luce e si scatta la seconda, e così via. In luce diurna intensa, invece, un flash commerciale è capace di sovrastare completamente la luce ambiente (tranne che in pieno sole diretto, a meno di non dotarsi di flash di altissima potenza e costo). Questa è sicuramente la versione più agevole della tecnica, ma richiede che il flash, a sua volta, sia telecomandato dalla fotocamera, senza che questa faccia scattare alcun proprio flash eventualmente incorporato. Anche questo requisito è soddisfatto da apparecchi disponibili a costi molto contenuti.

Il secondo requisito, quello della sorgente puntiforme, non è mai verificato esattamente nella pratica. Quello che è importante è che la sorgente (continua o flash) non sia costituita da luci multiple, come ad esempio in alcune sorgenti LED oggi in commercio.

Per passare a qualche esempio, con riferimento al Progetto Domus de Janas, le immagini 1a e 1b mostrano una forma animale o antropomorfa incisa in una delle tombe della necropoli di Anela. La prima immagine è una del quartetto originale, e la seconda una ricostruzione virtuale, ad inclinazione ed illuminazione scelte arbitrariamente, allo scopo di dimostrare la conservazione della informazione. La immagine ricostruita, nella versione a colori risulta assolutamente naturale, avendo utilizzato per il “rendering” l’albedo estratto dalle immagini sperimentali. Si noti infatti come nella immagine 1a la illuminazione provenga da destra (il disegno è inciso, e non in rilievo), mentre nella ricostruzione 1b la luce (virtuale) proviene da sinistra. Le ombreggiature nella ricostruzione sono solo quelle della luce virtuale, mentre sono scomparse quelle della illuminazione originale.

Si osservino poi le immagini 2a, 2b e 2c, relative a quella che è stata identificata come la incisione della mappa del villaggio sulla roccia, all’esterno della Domus XV. La immagine originale 2a evidenzia tutta la difficoltà della documentazione fotografica convenzionale, a causa della mescolanza tra chiaroscuri dovuti al colore della superficie e ombreggiature dovute ai solchi incisi. La immagine 2b è la semplice prima elaborazione e corrisponde al Gradiente-x. La immagine pare coincidere con una normale ripresa in luce radente, ma in realtà l’operazione eseguita ha cancellato tutte le variazioni cromatiche della superficie, lasciando solo le ombreggiature dei solchi. La immagine 2c, infine, mostra una ricostruzione 3D, spogliata del colore.

Infine, con riferimento alla Tomba 2 (“delle Spirali”) della necropoli di Montessu-Villaperuccio, la fig.3a mostra la immagine originale, dove ancora una volta la decorazione è offuscata dalla colorazione; la immagine 3b il Modulo del Gradiente, e la 3c una ricostruzione 3d della superficie, privata della colorazione per evidenziare i tratti incisi.

## CONCLUSIONI

In conclusione, questa presentazione riporta la esperienza sul campo che ha condotto alla sperimentazione e perfezionamento di tecniche 3D di Photometric Stereo in campo archeologico. Non vi è ambizione alcuna di proporre tale metodologia come alternativa alle molto più raffinate e popolari metodiche esistenti, quali la scansione laser o il 3D da Multi-View. Al contrario, la conoscenza diretta dei limiti intrinseci della Photometric Stereo, essenzialmente collegati alla distorsione delle volumetrie in condizioni di ripresa reali, induce a restringerne il campo di applicazione al settore specifico delle incisioni o decorazioni in bassorilievo.

In tale ristretto ambito, tuttavia, le prestazioni qualitative e metriche della tecnica sono di assoluta eccellenza.

La capacità di separare forma da colore e di estrarre questo ultimo in forma non alterata da ombreggiature aggiunge alla metodologia proposta la capacità di realizzare ricostruzioni assolutamente realistiche dei reperti.

## BIBLIOGRAFIA

BIANCHINI M.

2012 [http://www.rilievoarcheologico.it/manuale\\_rilievo8\\_000006.htm](http://www.rilievoarcheologico.it/manuale_rilievo8_000006.htm)

WOODHAM R.J.

1980 Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering* 19, I, 139-144.

HORN B. K. P.

1989. Obtaining shape from shading information. In B. K. P. Horn and M. J. Brooks, eds., *Shape from Shading*, pages 121-171. MIT Press.



Fig.1a - Incisione di forma animale o antropomorfa (Anela). Immagine originale



Fig.1b - Ricostruzione 3D della incisione di fig.1



Fig.2a - Incisione di mappa del villaggio sul pavimento di una tomba (Anela). Immagine originale



Fig.2b - Gradiente-x della stessa incisione. La scomparsa della colorazione della superficie riporta in evidenza i tratti incisi.

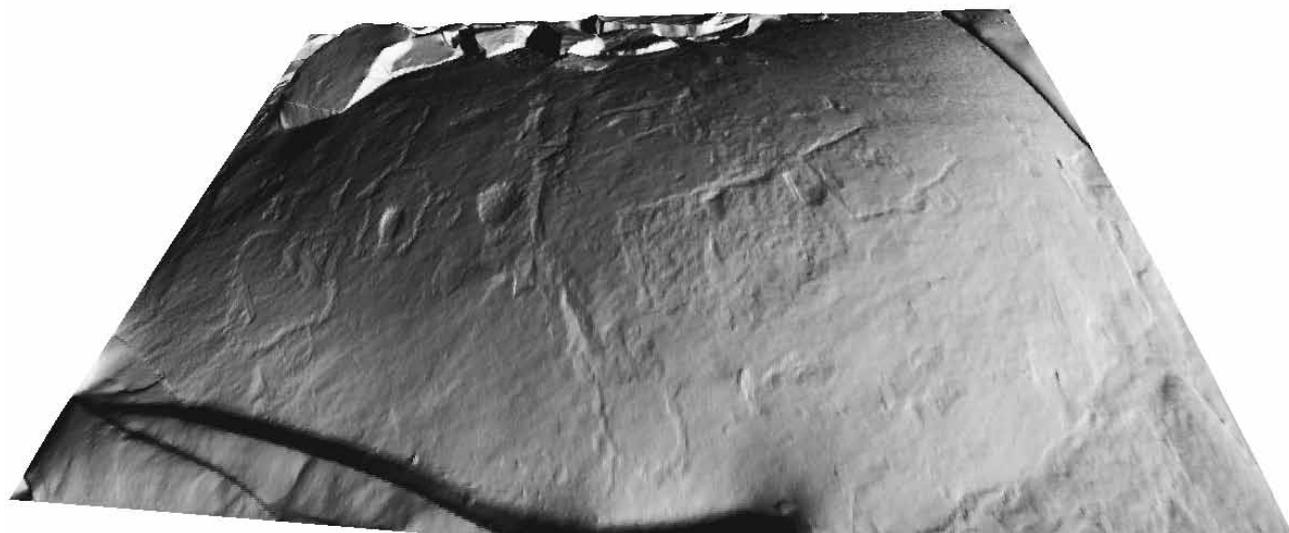


Fig.2c - Ricostruzione 3D, privata del colore



Fig. 3a - Tomba delle Spirali (Montessu). Immagine originale



Fig. 3b – Modulo del Gradiente della Tomba delle Spirali, per evidenziare la decorazione incisa e scolpita



Fig.3c – Ricostruzione virtuale 3D, con colorazione originale sovrapposta della decorazione della Tomba delle Spirali