

## Le texture polinomiali per l'analisi di reperti di interesse archeologico

Emanuela Faresin, Giuseppe Salemi

Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento (DAUR)  
Via Venezia 1, 35131 Padova, Italy, Tel. 0498276741 e-mail: giuseppe.salemi@unipd.it

### Riassunto

In questo lavoro si presenta l'applicazione delle *texture* polinomiali nel campo dei Beni Culturali, in particolare per lo studio di lacerti musivi, provenienti dal Sacello di San Prodocimo della Basilica di Santa Giustina.

Questo tempio è tra le opere architettoniche più importanti della città di Padova, fondato intorno al V secolo in onore della martire Giustina. I mosaici, che originariamente decoravano il sacello, oggi totalmente scomposti in lacerti, sono testimonianza dell'esistenza, in epoca paleocristiana, di un doppio edificio eretto in memoria della santa.

Nella fase preliminare di studio, sono state utilizzate tecniche di *image processing*: l'*edge detection*, per il riconoscimento delle caratteristiche geometriche del lacerto; la *feature extraction* sulle singole tessere musive con il filtro di Sobel, per calcolare il gradiente di luminosità dell'immagine in ciascun punto; la fotografia panoramica in tre differenti ambienti software (Autostich, Hugin e PTGui) per la realizzazione di foto panoramiche ad altissima risoluzione.

Successivamente, al reperto sono state applicate le *Polynomial Texture Mapping* che permettono di gestire immagini statiche multiple con differenti condizioni di illuminazione, al fine di ottenere un *rendering* foto realistico di alta qualità ed estremamente interattivo per una migliore analisi autoptica.

### Abstract

In this paper we present different image processing techniques in the field of Cultural Heritage, in particular for the study of mosaic fragments from the Shrine of St. Prodocimo in the Basilica of Santa Giustina, Padua. This temple is one of the most important architectural works of the city, founded around the fifth century in honor of Justin Martyr. The mosaics originally decorated the chapel, but now are totally broken into fragments.

In the preliminary study, image processing techniques are used: the edge detection, for the recognition of geometric characteristics of the object; the feature extraction of the individual mosaic tiles with the Sobel filter that calculates the gradient of brightness at each point; the panoramic photo with three different softwares (Autostich, Hugin e PTGui) to create high resolution panoramic pictures.

Then Polynomial Texture Mapping, that allow to manage multiple static images with different lighting condition, are applied in order to get a photo realistic rendering of high quality and highly interactive for a better analysis.

### Inquadramento storico

Il tempio di Santa Giustina (figura 1), che secondo alcuni studiosi sorgerebbe sulle rovine di un tempio pagano, è tra le più importanti opere architettoniche di Padova ed è il più antico luogo di culto della città. La chiesa, situata in posizione laterale ed asimmetrica rispetto a Prato della Valle, venne fondata intorno al V secolo su un luogo cimiteriale in memoria della martire Giustina, giovane cittadina patrizia martirizzata nel 304 durante le persecuzioni di Massimiliano.



Figura 1 – Basilica di Santa Giustina a Padova vista da Prato della Valle (a sinistra) e particolare del sacello di San Prodocimo (a destra).

Questa basilica è la testimonianza più antica riguardante il culto tributato a santa Giustina e risale al VI secolo, quando il “*vir clarissimus*” Opilione fece costruire “*basilicam vel oratoium in honore sanctae Iustinae martiris*”, come attesta l’iscrizione incisa nel timpano in marmo greco, oggi conservata nel nartece dell’oratorio di San Prodocimo. Questo reperto, databile intorno al terzo decennio del VI sec. d.C., assieme ai lacerti del mosaico visibili al livello della pavimentazione del sacello, rappresenta la testimonianza dell’esistenza, in epoca paleocristiana, di un doppio edificio eretto in onore e memoria di santa Giustina [Pepi, 1966].

Non esistono testimonianze dirette sull’aspetto né della prima basilica, che affiancava il sacello, né sulla facciata. Nel figurarla si possono soltanto utilizzare le conoscenze dei monumenti cristiani coevi e pensare a probabili analogie: di semplici mattoni, forse riservava l’abbellimento più ricco, realizzato in mosaici, all’interno [Ludeschi 2009].

Il terremoto del 1117 distrusse l’antica basilica lasciando intatto il sacello paleocristiano e la comunità benedettina provvide alla costruzione di una nuova basilica utilizzando pietre e materiale costruttivo dell’antico teatro romano.

La chiesa fu demolita nel 1502 per dar posto all’attuale basilica, realizzata tra il 1532 e il 1579 da Andrea Maroni e Andrea da Valle.

L’interno, uno dei massimi capolavori dell’architettura rinascimentale, è a croce latina e si presenta diviso da grandi pilastri in tre navate. Per dimensioni (122 metri di lunghezza) Santa Giustina è la nona tra le chiese del mondo segnate sul pavimento della Basilica di S. Pietro a Roma.

Il Sacello di San Prodocimo si presenta ora, in seguito a numerosi restauri, nella sua revisione cinquecentesca. I mosaici che ne decoravano anticamente la cupola, con i colori rosso a levante e a ponente e celeste a mezzogiorno, scelti per ottenere effetti di luci riflesse, sono oggi totalmente scomposte in lacerti musivi e tessere sciolte.

### Tecniche di image processing

L'*image processing* è definita come qualsiasi forma di elaborazione del segnale che ha come input un'immagine e come output la sua elaborazione, che può essere anch'essa un'immagine, oppure un'insieme di caratteristiche o parametri ad essa relativi.

Le finalità, nelle applicazioni ai Beni Culturali, sono essenzialmente due:

- Enfaticizzazione del contenuto informativo di un'immagine attraverso la trasformazione del contenuto stesso, per raggiungere un nuovo valore gnoseologico non immediatamente percettibile ad "occhio nudo";
- Attribuzione di un valore documentativo all'immagine, tramite la sua rappresentazione sintetica o simulata, in modo realistico.

### Edge Detection

L'*edge detection* permette il riconoscimento delle caratteristiche di un oggetto, generando immagini contenenti un numero di informazioni minori rispetto alle originali, ma conservando quelle essenziali per descrivere le caratteristiche strutturali e geometriche dell'oggetto.

In questo caso, è stata effettuata utilizzando il filtro di Sobel che calcola il gradiente della luminosità dell'immagine in ciascun punto, trovando la direzione lungo la quale si ha il massimo incremento possibile dal chiaro al scuro e la "velocità" con cui avviene il cambiamento lungo questa direzione.

Il risultato ottenuto fornisce una misura di quanto rapidamente o gradualmente l'immagine cambia in ogni punto e, quindi, della probabilità che quella parte d'immagine rappresenti un contorno, fornendone anche, un'indicazione del probabile orientamento.

L'operatore applica due matrici di convoluzione  $3 \times 3$  all'immagine originaria per calcolare valori approssimati delle derivate, una in direzione orizzontale ed una in direzione verticale [Koschan, 1995]. Se si definisce  $A$  l'immagine sorgente, e  $G_x$  e  $G_y$  le due immagini i cui punti rappresentano rispettivamente i valori approssimati delle derivate in orizzontale ed in verticale, l'operazione è descritta da:

$$G_x = \begin{bmatrix} +1 & 0 & -1 \\ +2 & 0 & -2 \\ +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * A \qquad G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \qquad [1, 2]$$

dove  $*$  indica l'operazione di convoluzione bi-dimensionale.

In ogni punto dell'immagine i valori del gradiente possono essere gestiti per calcolarne il valore totale  $G$  :

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \qquad [3]$$

Dalle matrici di convoluzione si calcola la direzione del gradiente:

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \qquad [4]$$

Sono state scelte immagini con illuminazione diversa (figura 2), "mosaiccate" in un unico file realizzato con il comando *Overlay* in Photoshop.

Con i diversi livelli, così gestiti, si ottiene quindi un'immagine nella quale le ombre derivano dal contributo di quattro differenti posizioni di illuminazione (figura 3).



Figura 2 – Immagini del lacerto musivo acquisite con differenti posizioni di illuminazione.

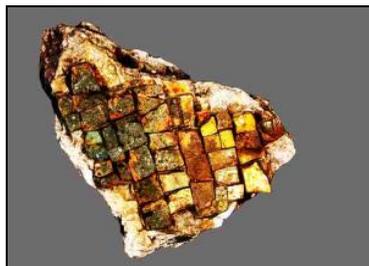


Figura 3 – Immagine del lacerto mosaicato in verticale.

L'immagine è stata successivamente convertita in scala di grigi e si è esasperato il contrasto e la luminosità per garantire una lettura finale più definita dei contorni (figura 4):

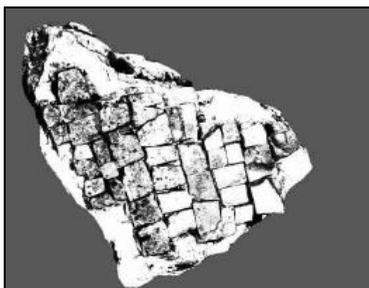


Figura 4 – Immagine del lacerto con luminosità e contrasto esasperati.

Infine, è stato applicato il filtro di *Sobel*: nelle zone in cui la luminosità è costante l'operatore di *Sobel* ha valore zero e corrisponde al bianco; sui contorni, è un vettore orientato che punta nella direzione in cui si passa da valori di scuro a valori di chiaro (figura 5).

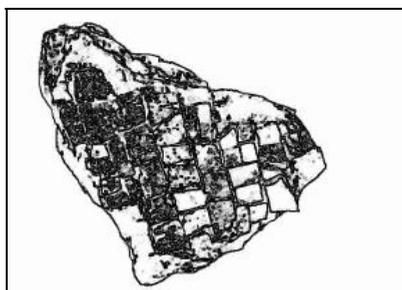


Figura 5 – Edge detection con filtro Sobel del lacerto musivo.

### Acquisizioni panoramiche

Con fotografia panoramica, o *panoramic mosaic*, si identifica la tecnica che permette di creare un'immagine che copre un angolo visivo, tra 180° e 360°, realizzata tramite la composizione di un mosaico di foto adiacenti, per creare un'immagine ad altissima risoluzione, composta con software automatici, che riconoscono elementi corrispondenti nelle zone di sovrapposizione, calcolando funzioni di omotetia.

Per questo caso, sono stati utilizzati tre diversi ambienti software per la creazione di foto panoramiche su un lacerto musivo di ridotte dimensioni (circa 15 × 10 cm): *Autostich*, *Hugin* e *PTGui*.

#### *Autostich*

*Autostich* è un software di *image stitching* per la creazione di panorami, sviluppato da Matthew Brown e David G. Lowe della University of British Columbia.

*Autostich* usa metodi conosciuti come SIFT (Scale Invariant Feature Transform) e RANSAC (RANDOM Sample Consensus): i *keypoints* (punti chiave) SIFT di oggetti, vengono estratti da un insieme di immagini di riferimento e immagazzinati in un database. Un oggetto viene riconosciuto in una nuova immagine confrontando individualmente ogni *feature* della nuova immagine con il database precedentemente ottenuto e cercando *feature* tramite la distanza euclidea dei loro vettori. Dall'insieme completo di corrispondenze, nella nuova immagine, vengono identificati sottoinsiemi di *keypoints* che concordano con l'oggetto per posizione, scala ed orientazione.

Ogni cluster di 3 o più *feature* concordanti su un oggetto è soggetta ad ulteriore dettagliata verifica del modello ed infine viene calcolata la probabilità che un particolare insieme di *features* indichi la presenza di un oggetto, data l'accuratezza del *fit* ed un numero massimo di possibili false corrispondenze [Brow, Lowe, 2003].

Il procedimento per la realizzazione della foto panoramica con *Autostich* è quasi completamente automatico; l'unico requisito è che tutte le fotografie siano acquisite da un unico punto di presa.

La foto panoramica (figura 6) è stata ottenuta mosaicando otto foto ma, nei punti evidenziati, il software non è riuscito a trovare le *feature* corrispondenti fornendo in output un'immagine prospetticamente errata.



Figura 6 – Foto panoramica del lacerto musivo realizzata con *Autostich*.

### **Hugin**

*Hugin* è un software libero multiplatforma sviluppato da Pablo d'Angelo, della University of Bielefeld, che necessita di un notevole lavoro manuale per la creazione dei punti di controllo che permettono di collegare le immagini una all'altra. La foto panoramica (figura 7) è stata realizzata individuando 145 punti di controllo. Il risultato, anche in questo caso, è prospetticamente errato.



*Figura 7 – Foto panoramica del lacerto musivo ottenuta con Hugin.*

### **PTGui**

Originariamente, è stato creato per *Graphical User Interface for Panorama Tools* (da qui il nome). Questo ambiente software può creare panorami cilindrici a 360°, panorami parzialmente piani e panorami sferici di 360° × 180° [Mazzoleni et al, 2006]. Inoltre, non vi è la necessità di mantenere un punto fisso di camera ed è possibile unire immagini ruotate ed inclinate. PTGui può realizzare panorami in output dell'ordine dei Gigapixel da centinaia di foto; l'anteprima fornita è modificabile con appositi strumenti. Il risultato è una foto panoramica prospetticamente corretta e senza alcun errore nella mosaicatura (figura8).



*Figura 8 – Foto panoramica del lacerto musivo ottenuta con PTGui.*

### Texture polinomiali

Il PTM (*Polynomial Texture Mapping*) è un formato di file che può essere prodotto da fotografie digitali standard sottoposte a tecnologie di *image processing* per migliorare i dettagli della superficie e identificare le condizioni ottimali di illuminazione. Questa tecnica fin dalla sua prima applicazione, per lo studio di una tavoletta sumera del 2000 a. C., ha dimostrato essere importante nello studio del patrimonio dei Beni Culturali consentendo di decifrare le componenti illustrative [Malzbender et al, 2000].

Considerati i vantaggi che questo metodo offre, il suo utilizzo nel campo dei Beni Culturali si è diffuso in vari settori: dall'epigrafia alla numismatica, dagli studi litici a quelli su sarcofagi e frammenti architettonici.

Al fine di "riaccendere" virtualmente le tessere musive ed ottenere una maggiore percezione dei dettagli superficiali, quali il colore o i possibili danneggiamenti, non visibili durante l'osservazione fisica, il lacerto musivo è stato indagato con questa tecnica che, inoltre, può rappresentare un ottimo complemento alle tecniche di acquisizione 3D [Goesele, 2004].

Le caratteristiche visive della superficie di un oggetto variano in condizioni di luce diversa [Earl et al, 2010]; per un oggetto statico, le caratteristiche di riflettanza per ciascun pixel possono essere facilmente catturate e modellate da questa tecnica, semplice ma efficace, proposta da Malzbender [Malzbender et al, 2001].

Per ogni pixel, la funzione di riflessione è approssimata da un polinomio biquadratico nel modo seguente:

$$L(u, v, l_u, l_v) = a_0(u, v) l_u^2 + a_1(u, v) l_v^2 + a_2(u, v) l_u l_v + a_3(u, v) l_u + a_4(u, v) l_v + a_5(u, v) \quad [5]$$

dove  $l_u$  e  $l_v$  sono la direzione della luce incidente e  $u$  e  $v$  sono le coordinate dei pixel.

Ogni pixel di un'immagine PTM è composto dai valori RGB e dai sei coefficienti della funzione [Wenger, 2005].

I coefficienti sono calcolati da una serie di immagini acquisite da un punto di vista fisso con posizioni di luce diversa (figura 9) e, per stimare i coefficienti, le posizioni di luce devono essere note [Georghiadis, Belhumeur, 1999].

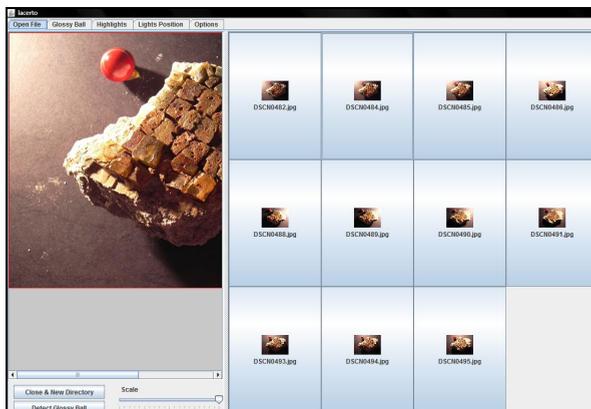


Figura 9 – Immagini del lacerto acquisite da un punto di vista fisso con posizioni di luci differenti.

Selezionare il corretto punto di illuminazione è un passo importante nell'acquisizione PTM e la luce deve essere posizionata in diversi punti formando una cupola virtuale di illuminazione.

Le immagini sono state acquisite posizionando una sfera di calibrazione vicino al lacerto, per consentire al modulo LPtracker di calcolare la posizione della fonte di luce (figura 10).



Figura 10 – Differenti posizioni della fonte di luce riflessa dalla sfera di calibrazione.

Il dataset PTM può essere gestito con differenti algoritmi di elaborazione delle immagini per evidenziare forme ed informazioni di particolare interesse.

L'algoritmo *Specular Enhancement* (figura 11) utilizza le normali alla superficie e permette la fusione del colore e delle proprietà di riflessione. È un metodo di ombreggiatura speculare per rendere l'oggetto registrato artificialmente lucido.

La rappresentazione *Diffuse Gain* (figura 12) è la variazione artificiale delle proprietà di riflettanza diffusa di ogni pixel. Ciò consente di variare il contrasto tra pixel adiacenti aumentando il valore di tonalità ed il contrasto chiaro/scuro nell'immagine.



Figura 11 – PTM in *Specular Enhancement*.

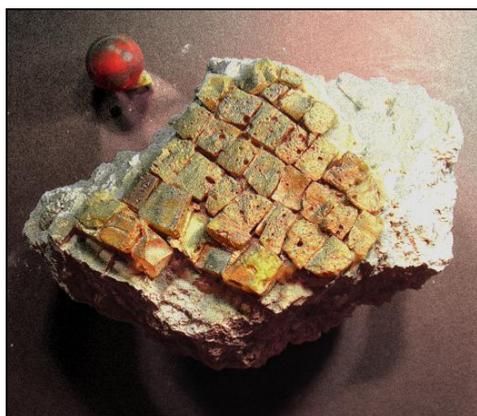


Figura 12 – PTM in *Diffuse Gain*.

Variando la direzione d'illuminazione cambiano le luci e le ombre e risaltano le sfumature dei colori delle tessere (figura 13). È possibile, inoltre, confrontare in un'unica immagine il dataset PTM con la *texture mapping* (figura 14); ciò risulta utile per “educare” l'occhio al maggior contrasto. La rappresentazione in *Display Normal Crosshair* (figura 15) fornisce una stima della normali alla superficie e viene visualizzata in falsi colori.



Figura 13 – Illuminazione virtuale da destra.



Figura 14 – PTM vs Texture Mapping.

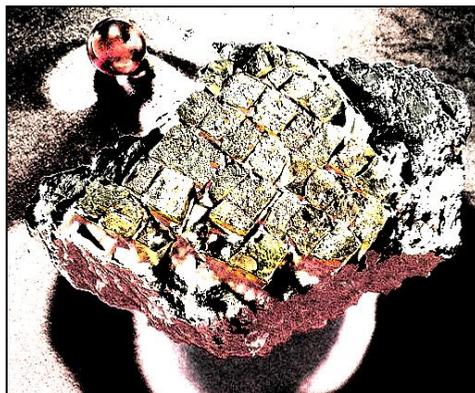


Figura 15 – PTM in Display Normal Crosshair.

## Conclusioni

Le tecniche di *image processing* e le *Polynomial Texture Mapping*, presentate in questo lavoro, sono complementari per lo studio dettagliato e la documentazione di un oggetto archeologico.

Con l'*edge detection*, applicata tramite il filtro di *Sobel*, è possibile estrapolare il contorno di un oggetto basandosi sul gradiente della luminosità dell'immagine. Nello studio del lacerto musivo è risultato utile per l'identificazione dei contorni delle singole tessere musive per caratterizzare il loro posizionamento nella malta di allettamento.

Le foto panoramiche permettono, invece, di creare un'immagine ad altissima risoluzione con dettagli altrimenti non visibili/apprezzabili in un unico "scatto" fotografico eseguito in modalità standard.

Le *Polynomial Texture Mapping* sono risultate utili nell'analisi delle caratteristiche della superficie in funzione dell'illuminazione; in particolare, i colori delle tessere musive possono essere visti in tutte le loro sfumature. L'uso del PTM ha permesso di produrre una visualizzazione interattiva dell'oggetto che, virtualmente, è stato riportato in vita dall'interazione della luce con i colori sulla superficie.

Inoltre, questa metodologia d'indagine, veloce nella produzione e semplice nell'archiviazione, può essere complementare, per la documentazione, alla scansione laser ed alla fotogrammetria, fornendo una migliore e più completa comprensione dell'oggetto nell'ambito dei Beni Culturali.

## Bibliografia

Brow M, Lowe DG. (2003), "Recognising Panorama", Proceedings Ninth IEEE International Conference on Networks, 1218-1225.

Earl G, Martinez K, Malzbender T. (2010), "Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation", Journal of Archaeological Science, 37, 2040-2050.

Georghiades A, Belhumeur P. (1999), "Illumination-Based Image Synthesis: Creating Novel Images of Human Faces Under Differing Pose and Lighting", IEEE Workshop on Multi-View Modeling and Analysis of Visual Scenes, 47-54.

Goesele M. (2004), *New acquisition techniques for real objects and light sources in computer graphics*. PhD thesis, Universität Saarbrücken.

Koschan A. (1995), "A comparative study on color edge detection" in proceeding of the 2<sup>nd</sup> Asian Conference on Computer Vision, December, Vol III, 574-578.

Ludeschi S. (2009), *Il mosaico paleocristiano della basilica di Santa Giustina: contesto storico e nuove metodologie*, Tesi di laurea in "Storia e tutela dei beni culturali", Facoltà di Lettere e Filosofia, Università degli Studi di Padova.

Malzbender T, Gelb D, Wolters H, Zuckerman B. (2000), "Enhancement of Shape Perception by Surface Reflectance Transformation", Hewlett-Packard Technical Report HPL-March 38,.

Malzbender T, Gelb D, Wolters H. (2001): "Polynomial texture maps.", in SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (New York, NY, USA), ACM Press, 519-528.

Mazzoleni P, Valtolina S, Franzoni S, Mussio P, Bertino E. (2006), "Toward a contextualized access to the cultural heritage world using 360 panoramic images", in Proceedings of the 18th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE 2006), San Francisco Bay, California, USA - July, 5-7.

Pepi R. (1966), *Santa Giustina a Padova: Storia e arte*, Edizioni Monaci Benedettini.

Wenger A, Gardner A, Tchou C, Unger J, Hawkinst T, Debevec P. (2005): "Performance Relighting and Reflectance Transformation with Time-Multiplexed illumination.", ACM Trans. Graph., 756-764.