

ALCUNE CONSIDERAZIONI SULL'USO DELLE IMMAGINI DIGITALI PER IL CONFRONTO DI REPERTI ARCHEOLOGICI

1. PREMESSA

Il CILEA (Consorzio Interuniversitario Lombardo per l'Elaborazione Automatica) ha da molti anni avviato un programma di ricerca sul trattamento delle immagini, acquisendo un buon livello di preparazione e di utilizzo di una serie di sistemi, oltre che una specializzazione in diversi campi applicativi. Di particolare interesse sono alcuni progetti di applicazione delle tecniche di trattamento delle immagini nel campo della ricerca sui beni culturali ed in particolare sui reperti archeologici, grazie anche ad una stretta e duratura collaborazione con la cattedra di Etruscologia ed Archeologia dell'Italia Antica dell'Università Statale di Milano.

Vogliamo ribadire innanzitutto che i criteri informativi alla base delle sperimentazioni in corso sono soprattutto quelli di porsi a fianco del singolo studioso senza cambiare il tradizionale metodo di ricerca, fornendo uno strumento di supporto capace di rendere oggettiva ma soprattutto di potenziare l'analisi autoptica degli oggetti oltre che di ampliare e rafforzare le tecniche di riconoscimento delle tipologie e quindi di datazione e di confronto.

2. I METODI

Le tecniche di elaborazione digitale delle immagini si rivelano particolarmente utili nel fornire criteri di confronto quantitativi, laddove tradizionalmente le operazioni si svolgono per semplici giustapposizioni visive, senza possibilità di cambiamenti di scala e/o di compensazioni anamorfiche per sopperire alle distorsioni dell'ottica fotografica e delle condizioni di ripresa, nonché alle deformazioni che il materiale del reperto ha subito nel corso del tempo. Dei vari filoni dell'*Image Processing* (IP) digitale, sicuramente quello dell'elaborazione della geometria fornisce i risultati più sorprendenti, anche se gli stessi fondamenti matematici e statistici dei vari algoritmi usati suggeriscono da una parte una grande cautela e, dall'altra, un'attenta valutazione degli elementi su cui poggiano le deduzioni finali dello studioso, che certamente non possono prescindere da considerazioni storico-culturali difficilmente trattabili con un *computer*.

Tutte le applicazioni sperimentate meriterebbero alcune considerazioni sul rapporto costi/benefici e sulla efficacia delle specifiche tecniche della elaborazione digitale delle immagini usate di volta in volta, nonché sulla qualità del materiale pittorico (fotografie, diapositive etc.) usato, dove l'esperienza

ha comprovato la necessità di disporre, ove possibile, di materiale realizzato *ad hoc* per le elaborazioni digitali. L'importanza di disporre di materiale visivo specifico, per esempio, si può facilmente dedurre ove l'analisi sia relativa a immagini di oggetti tridimensionali, come manufatti, bassorilievi, altorilievi etc.

Nel caso di analisi di immagini di opere bidimensionali, come dipinti, affreschi, o comunque di tipo pittorico, l'"immagine" riassume il contenuto informativo dell'opera nella sua interezza, mentre nel caso opposto degli oggetti tridimensionali essa rappresenta solo una delle molteplici angolazioni visive sotto cui può essere riguardata l'opera. Ciò pone dei problemi non indifferenti di ripresa fotografica (angolo di ripresa, illuminazione etc.) e, a parità di condizioni di ripresa, la necessità di usare praticamente solo il gioco delle luci e delle ombre per indagare la forma e la natura geometrica del reperto, specialmente nei casi dove il colore, che pure potrebbe essere di per sé oggetto di indagine, è del tutto assente.

Si precisa che per la realizzazione di questo intervento non sono state utilizzate volutamente foto realizzate *ad hoc* da fotografi professionisti poiché si è voluto provare il metodo applicato a materiale fotografico di studio.

Alcune applicazioni, tuttavia, sono risultate esemplari, sia per la precisione senza alternative dei metodi numerici, sia per la "naturalzza" dei trattamenti, naturalzza che ha contribuito non poco alla comprensione e al gradimento di queste tecniche da parte di operatori di contesti disciplinari apparentemente molto lontani dal mondo informatico e matematico.

Tra gli algoritmi più importanti di tipo geometrico dell'*Image Processing* sono stati sperimentati quelli che producono deformazioni geometriche, dai più semplici, come ad esempio la rotazione, ai più complessi, come le deformazioni polinomiali, tramite corrispondenze fra punti notevoli di controllo, allo scopo di registrare le immagini e renderle sovrapponibili in modo da oggettivare e enfatizzare il confronto. Oltre a questa categoria di elaborazioni, naturalmente sono state impiegate quasi tutte le tecniche di calcolo pittorico di cui è normalmente dotato ogni buon sistema di *Image Processing*.

Ci si riferisce, in particolare, a tutta quella serie di trattamenti intesi soprattutto a preparare un'immagine alle successive elaborazioni, come l'ottimizzazione del contrasto, l'utilizzo di filtri di smussamento e/o di enfaticizzazione dei dettagli, la progettazione di *palette* di livelli di grigio opportune, gli scontornamenti per risolvere un oggetto dal suo sfondo e così via. L'obiettivo, sia delle elaborazioni geometriche che di quelle di pretrattamento, infine, è stato quello di preparare il materiale digitale per le vere e proprie elaborazioni di riconoscimento di forme (*Pattern Recognition*), o comunque per elaborazioni che evidenziassero in maniera più o meno automatica le "forme simili", fra cui si deve senz'altro sottolineare l'importanza delle procedure di correlazione dei livelli di grigio di due immagini registrate.

Riportiamo una breve descrizione di alcune tecniche usate, mentre rimandiamo all'appendice la descrizione dettagliata degli algoritmi:

1. **Contrasto:** è una riproposizione in termini di calcolo numerico delle normali tecniche fotografiche, soprattutto in fase di sviluppo e stampa. Vengono aumentate, o diminuite, le distanze reciproche fra livelli di grigio adiacenti, in maniera tale che l'occhio colga maggiori dinamiche di luminosità che permettano una migliore lettura dell'immagine.
2. **Equalizzazione dell'istogramma:** consiste in un contrasto ottimizzato, dove viene minimizzato il rischio che un gran numero di livello di grigio sia appiattito verso il basso (nero) o verso l'alto (bianco: in questo caso si parla di solarizzazione).
3. **Scontornamento (problema figura/sfondo):** al contrario delle apparenze si tratta di un problema tutt'altro che banale. Si va dal semplice scontornamento manuale tramite *mouse* a quelli più sofisticati che seguono automaticamente i contorni (*line followers*) o estraggono regioni statisticamente.
4. **Filtri:**
 - 4.1. di eliminazione dei disturbi (smussamento): provocano una certa sfocatura dell'immagine, come il filtro a media mobile.
 - 4.2. di evidenziazione delle zone di transizione delle luminosità (zone di contorno): filtro di *Sobel*, filtro laplaciano etc., eventualmente seguiti da procedimenti di assottigliamento delle linee rivelate (*thinning*).
 - 4.3. di esaltazione dei dettagli (*sharpening*): da usare con cautela perché di valenza quasi esclusivamente visiva.
5. **Operatori locali per l'analisi della struttura locale dei grigi:** operatori molto sofisticati (non lineari) che fanno ricorso anche a concetti di geometria non euclidea, come quella degli oggetti frattali, di cui si può sfruttare il concetto di dimensione frazionaria locale dei livelli di grigio dell'immagine, che consentono di valutare alcune caratteristiche interessanti, come il grado di levigatezza dell'oggetto rappresentato o, viceversa, quello di rugosità.
6. **Correlazioni locali:** si è usato il coefficiente di correlazione di *Pearson*, ben noto a chi si interessa di statistica. Il valore di tale coefficiente varia fra -1 (livelli di grigio delle due immagini confrontate che variano in maniera inversa) e 1 (quando i due livelli di grigio concordano nella variazione), passando per 0 (completa scorrelazione).
7. **Combinazione di più immagini in un'immagine a colori:** si usa principalmente per confrontare su una scala cromatica le varie immagini.
8. **Elaborazioni geometriche:**
 - 8.1. *rescaling* di un'immagine: si alterano le dimensioni dell'immagine conservando o meno i rapporti fra i lati.
 - 8.2. *warping*: si tratta di alterare la geometria dell'immagine secondo una regola qualunque. Si è usata principalmente la deformazione per punti di controllo (punti corrispondenti su due immagini) che consente la registrazione, ovvero la sovrapposibilità, di due immagini da confrontare.

Come detto prima questo intervento vuol focalizzare l'attenzione sulla possibilità di individuazione di un metodo oggettivo e preciso di ausilio al tradizionale metodo di confronto attuato, soggettivamente dai singoli studiosi, utilizzando la propria memoria sui particolari degli oggetti visti o, più spesso, la documentazione messa a disposizione su supporto cartaceo sia esso pubblicata o proveniente da fototeche di musei o archivi fotografici in genere.

I tipi di confronto archeologico possono essere divisi in due grandi e generiche categorie: le uguaglianze e le somiglianze. La ricerca di un'uguaglianza si applica, in campo archeologico, su tipologie (BONGHI JOVINO 1990, 19-59) di oggetti o decorazioni prodotte con tecniche a stampo, come gli stampi per le terrecotte votive ed architettoniche, le monete, le decorazione a punzone o a cilindretto e quant'altro ancora.

La somiglianza, o similitudine o ascendenza o tradizione, si ricerca invece su quei manufatti che possono proporre delle somiglianze di stile, di tecnica, di tratto, eccetera.

Abbiamo applicato le procedure prima illustrate su numerosi confronti archeologici sia alla ricerca di uguaglianza sia di similitudine.

3. LE UGUAGLIANZE

Esaminiamo in primo luogo le procedure ed i risultati raggiunti su materiali a stampo, improntati su criteri di uguaglianza. Tra le procedure sopra mostrate alcune consentono di stabilire corrispondenze fra punti, permettendo la sovrapposizione di immagini di reperti, evidenziando così le uguaglianze o le differenze anche ricorrendo a sofisticati indici statistici di correlazione.

È stato così possibile ottenere il riconoscimento del prototipo o l'evidenziazione delle varianti, sia dove la frammentarietà del pezzo impediva una lettura certa, sia dove la presenza del ritocco ne comprometteva il confronto oggettivo.

Nel caso delle due teste votive capuane (Fig. 1) l'obiettivo è stato quello di verificare la generazione dei due esemplari dal medesimo stampo e l'individuazione di eventuali ritocchi prodotti a mano dopo la realizzazione del positivo o sulla matrice (per la scheda tecnica del prototipo, datazione e confronti cfr. BONGHI JOVINO 1965, 60-64, tav. XXIV, 3; BEDELLO 1975, 42-44, tav. VII, 2 e 81, tav. XXIV, 4).

Descriviamo brevemente la sequenza degli algoritmi applicati.

In prima istanza le immagini digitalizzate vengono trattate al fine di rendere una miglior visualizzazione dell'immagine stessa con trattamenti migliorativi sufficientemente modesti da non compromettere le informazioni contenute che entrano in gioco per la correlazione¹.

¹ A tal fine, per mantenere una base di confronto, anche lo scanner è stato calibrato allo stesso modo nell'acquisizione delle due immagini.



Fig.1 – Teste votive capuane (prototipo HXII) (BONGHI JOVINO 1965).

In secondo luogo si applica l'algoritmo di *Warping* fissando i punti di corrispondenza (punti di controllo) (Tav. XXI, a). Tengo a precisare che la scelta dei punti è uno dei momenti più delicati del procedimento dove è indispensabile la collaborazione tra informatico ed archeologo. L'archeologo infatti intuisce quali sono i punti più significativi, vale a dire i punti di maggior uguaglianza tra i due esemplari esaminati.

Date due immagini A e B, opportunamente corredate con i relativi punti di controllo, la procedura di *warping* ha come obiettivo quella di deformare geometricamente B (immagine di input) in modo tale che la sua deformata B' possa essere ragionevolmente sovrapposta ad A (immagine di riferimento). Tale operazione si dice registrazione di B su A, dove i punti di controllo di B, riportati su B', coincidono entro un margine d'errore accettabile con i corrispondenti su A. Per quanto detto sulla delicatezza della scelta della "nuvola" dei punti di controllo, nella deformata B' si considererà correttamente come regione di analisi e confronto solo la parte più ricca di punti di controllo, ovvero la parte in cui i punti di controllo sono stati scelti in maniera più uniforme e ben distribuita.

Applicando l'algoritmo di correlazione (vedi appendice tecnica) fra A e B' – ora confrontabili geometricamente per lo meno nella regione "densa" di punti di controllo – otteniamo una terza immagine (Fig. 2) che è una funzione complessa delle due immagini da confrontare. Il livello di grigio di questa immagine, rappresenta, *pixel per pixel*, una stima del grado di somiglianza delle due immagini confrontate in un piccolo intorno (areola) del *pixel* stesso, secondo una scala che va teoricamente da -1 a 1, ma che in pratica si riduce al solito *range* da 0 (nero) a 255 (bianco). In questa scala, i *pixel* con correlazione negativa (modi di variazione opposti dei livelli di grigio di A e



Fig. 2 – Risultato dell'applicazione della correlazione alle due immagini A e B'.

B') hanno un livello di grigio compreso tra 0 e 127, quelli completamente scorrelati hanno un valore 128 e quelli con correlazione positiva (modi di variazione concordanti dei livelli di grigio di A e B') via via crescente da 129 a 255. A livello di interpretazione visiva, quindi le parti dell'immagine risultato corrispondenti a correlazioni positive appariranno più chiare delle parti che non presentano alcuna correlazione significativa.

Va sottolineato, infine, che la scelta delle dimensioni (in *pixel*) dell'areola su cui eseguire la correlazione locale dipende fortemente dal grado di dettaglio in cui va "letta" l'immagine risultato. La scelta di un'areola troppo piccola, infatti, carica eccessivamente di dettagli il risultato ed inoltre rende instabile e a volte poco significativo il *sample* di correlazione, mentre, di converso, una troppo ampia "lima" dettagli altrimenti preziosi.

4. LE SIMILITUDINI

Passiamo ora ad esaminare un confronto tra materiale prodotto non a stampo al fine di mettere a punto un criterio che ci permetta di evidenziare ed enfatizzare le somiglianze.

Come abbiamo descritto sopra, di non minore rilevanza sono gli algoritmi che permettono di ricercare gli indici di somiglianza. Queste procedure permettono di verificare oggettivamente quanto due immagini sono sovrapponibili e valutarne il grado.

Qui, a differenza del precedente caso delle uguaglianze, non è lecito

registrare le due immagini da confrontare in quanto non si tratta di stabilire delle concordanze fra gli stampi originali. Si preferirà piuttosto uniformare le scale delle due immagini in maniera simile per le dimensioni lungo le colonne (X) e lungo le righe (Y). Una volta rese uguali le due scale geometriche si potrà applicare il già visto algoritmo della correlazione, con le stesse modalità di interpretazione dell'immagine risultato.

È chiaro comunque che per confrontare due immagini occorre prima pretrattarle variando la luminosità e il contrasto globale, smussando i disturbi e migliorando il rapporto figura /sfondo.

Sono state scelte tra le sperimentazioni effettuate alcune eseguite sulle lettere di un'epigrafe ed altre eseguite su iconografie decorative monumentali.

Non è infatti da sottovalutare che la possibilità di trarre indici di somiglianza tra lettere di diverse epigrafi può favorire il riconoscimento della mano dello *scriptor* o, nel caso di confronti tra iconografie decorative, il riconoscimento di modelli omogenei.

Nel primo caso abbiamo voluto confrontare le coppie di lettere tratte da due epigrafi di due altari gemelli conservati a Milano (REALE 1989, 211-212; si tratta di due are in marmo bianco provenienti da Brienno - CO).

Dai testi delle due epigrafi sono state scelte le M di MATRONIS e MAXIMO, oltre che le R e le A di ARCHIGENES, parola presente su tutte e due le epigrafi (Tav. XXI, b-d).

Per aiutare una visione più nitida abbiamo colorato le singole lettere con colori complementari.

Nel secondo caso l'obiettivo era quello di ricercare il riconoscimento di modelli omogenei in confronti tra iconografie decorative.

Abbiamo preso in esame decorazioni di timpani triangolari con Medusa di stele funerarie conservate nel nuovo lapidario delle Civiche Raccolte Archeologiche di Milano (SARTORI 1994, 38, 104, 124)(Figg. 3-4). Utilizzando gli operatori locali abbiamo estrapolato i contorni. Abbiamo sovrapposto infine le immagini ottenute a due a due per evitare esagerate sovrapposizioni (Tav. XXI, e).

5. UGUAGLIANZE VERSUS SOMIGLIANZE

Possiamo notare la differenza sostanziale tra la ricerca di un'uguaglianza, dove è lecita, e la ricerca di una somiglianza. Infatti dove si ricerca un'uguaglianza è lecito distorcere l'immagine per eliminare o smussare le differenze date dalle dimensioni differenti, o dalle abrasioni, o dai ritocchi od altro. Quando invece si ricerca più semplicemente un grado di similitudine si sovrappongono le due immagini, semplicemente riscalate, e si osservano le sovrapposizioni.

I risultati ci sono sembrati soddisfacenti tanto che il metodo è già stato applicato su materiale in studio a supporto della ricerca tradizionale. A lato

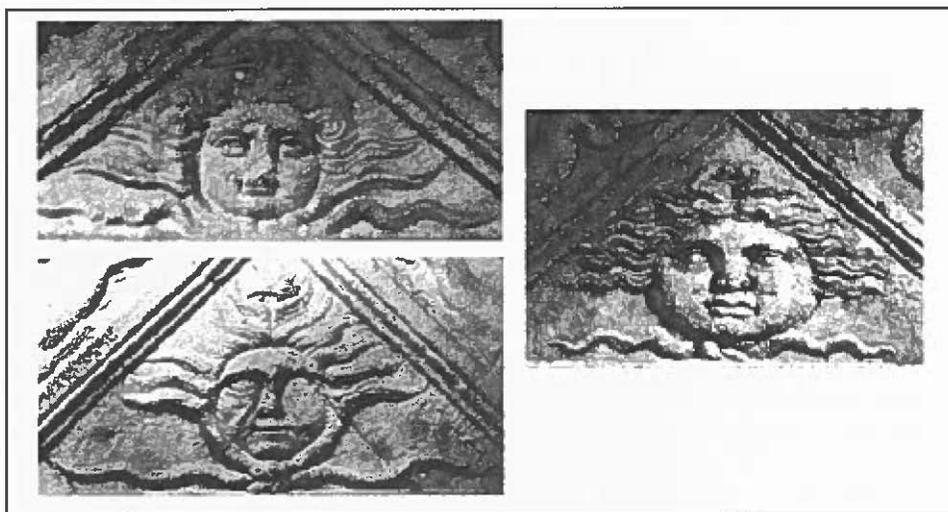


Fig. 3 – Timpani triangolari di stele funeraria con Medusa.

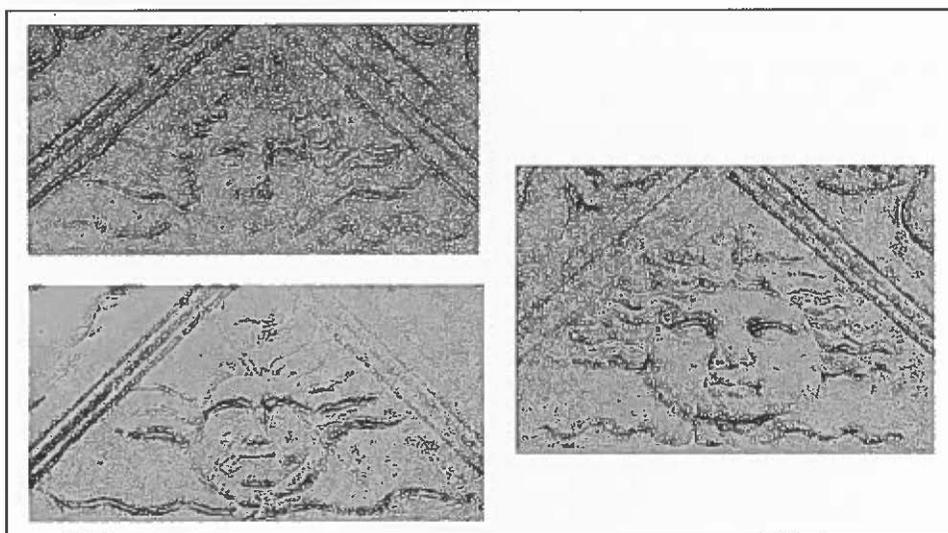


Fig. 4 – Risultato dopo l'utilizzo di operatori locali sui timpani triangolari con Meduse.

pratico la tecnica viene richiesta per lo più per fugare dubbi o nel tentativo di ricercare dati oggettivi di confronto. Inoltre tutte le tecniche di miglioramento vengono utilizzate per rendere al meglio le immagini e quindi per affrontare un confronto anche laddove non è stato possibile un esame autoptico dei reperti da confrontare.

Vogliamo sottolineare però che la complessità e la raffinatezza del metodo, oltre alla peculiarità delle caratteristiche di partenza del materiale pittorico utilizzabile, sminuisce l'applicabilità su larga scala. È infatti indubbio che per semplici confronti, l'occhio allenato dello studioso non può essere in nessun modo sostituito.

Non è inoltre da sottovalutare l'impossibilità di standardizzazione delle procedure; infatti le caratteristiche del reperto stesso e la qualità del materiale fotografico di volta in volta esaminato impone un'analisi univoca caso per caso.

Ed ancora, i modelli di studio sperimentati suggeriscono una stretta collaborazione tra esperti informatici ed archeologi. Abbiamo infatti constatato che solo il lavoro di équipe ha portato a buoni risultati. In altro modo gli esperimenti risultavano sbilanciati. Il metodo qui presentato infatti utilizza tecniche informatiche e matematiche assai complesse, non acquisibili in breve tempo dall'esperto archeologo. D'altro canto lo stesso esperto di *Image Processing* il più delle volte non è in grado di comprendere quali sono i reali obiettivi preposti alla ricerca archeologica e punta tutte le proprie energie su buone realizzazioni di ottima resa visiva, ma di scarsa pregnanza scientifica.

Quindi l'applicabilità del metodo mantiene un buon rapporto costi/benefici solo in casi particolari. Vale a dire quando l'oggettivazione di un confronto costituisce il perno fondamentale di una ricerca. Le applicazioni su reali percorsi di studio porteranno ad una valutazione complessiva del metodo, verificando in quali casi il trattamento delle immagini può divenire indispensabile ausilio di studio.

EMILIA GROPPA, CLAUDIA VAI
CILEA, Milano
CARLO JACOB
Informatica Applicata
Università per Stranieri di Perugia

APPENDICE

Algoritmo della correlazione

Date due immagini da correlare, si consideri per ogni *pixel* delle matrici immagini un insieme di *pixel* circostanti (es. l'insieme degli otto *pixel* circostanti) ossia si prenda in considerazione una sottomatrice locale (areola) di *pixel* 3x3 o superiore e si valuti:

$$\rho = \sigma_{xy} / \sigma_x \sigma_y$$

ove:

$$\sigma_{xy} = m_{xy} - m_x m_y$$

$$\sigma_x = \sqrt{m_{xx} - m_x^2}$$

$$\sigma_y = \sqrt{m_{yy} - m_y^2}$$

con m si indica il valore medio, mentre x e y rappresentano gli insiemi dei *pixel* (*samples*) contenuti nelle sottomatrici relative a *pixel* corrispondenti delle due immagini.

ρ risulterà appartenere all'intervallo $[-1, 1]$.

I valori di correlazione vanno poi distribuiti tra 0 e 255 in modo tale che:

-1 corrisponda a 0, 0 corrisponda a 128, 1 corrisponda a 255.

Modifica della luminosità e del contrasto dei toni di grigio

La modifica dei toni di grigio iniziale si rende necessaria per migliorare la visibilità di un'immagine. Essa è una combinazione di variazioni di luminosità e variazioni di contrasto. Le prime si ottengono attraverso il cosiddetto *histogram slide* e le seconde tramite l'*histogram stretching*.

L'*histogram slide* consiste nel sottrarre o aggiungere una costante a tutti i *pixel* dell'immagine, l'effetto che si ottiene è un'immagine più luminosa o più scura di quella di partenza, il cui istogramma risulta spostato a destra o a sinistra rispetto l'istogramma originale.

L'*histogram stretching* consiste nella moltiplicazione o divisione di tutti i *pixel* dell'immagine per un valore costante. L'istogramma dell'immagine risultante risulta più concentrato o più distribuito rispetto all'istogramma iniziale.

Elaborazioni geometriche

Utilizzando operazioni geometriche è possibile ottenere una ridistribuzione spaziale dei *pixel*.

L'equazione generale che descrive una trasformazione geometrica è:

$$F(x,y) \rightarrow G(u,v)$$

ove (x,y) sono le coordinate iniziali del *pixel* e (u,v) sono le coordinate del *pixel* in seguito alla trasformazione geometrica che mappa l'immagine F (immagine di *input*) nell'immagine G (deformata), di sistemi di riferimento rispettivamente (X,Y) e (U,V) . Ogni operazione geometrica è definita da equazioni che definiscono le regole della mappatura. Lo *scaling* di una immagine, ad esempio, è definito mediante le due equazioni:

$$u = Sx$$

$$v = Sy$$

ove x e y sono le coordinate del *pixel* considerato in F , u e v le nuove coordinate del *pixel* in G , mentre S è il fattore di scala.

Equalizzazione dell'istogramma

L'equalizzazione dell'istogramma assicura la miglior ridistribuzione dei toni di grigio, nel senso che ottimizza sia il contrasto che la luminosità. Infatti, in molte immagini i *pixel* risultano distribuiti in maniera tale da non sfruttare appieno tutto l'intervallo 0-255 della scala dei grigi, con grande svantaggio nella "lettura" dell'immagine stessa.

Nell'equalizzazione dell'istogramma i valori dei *pixel* vengono ridistribuiti in modo da "popolare" uniformemente tutto l'intervallo 0-255.

Filtri

I filtri permettono di generare delle immagini in cui è possibile evidenziare solo le alte frequenze (rapide variazioni della luminosità) o le basse frequenze (piccole variazioni di luminosità) o le zone di transizione (zone di contorno) che portano alla individuazione o all'esaltazione dei contorni.

Le operazioni di filtraggio si basano sul metodo matematico della convoluzione.

Intuitivamente la convoluzione altro non è che la determinazione del nuovo valore di luminosità di un *pixel* in funzione del suo valore e di quelli dei *pixel* circostanti. Più precisamente si calcola il nuovo valore di luminosità di un *pixel*, come media pesata dei valori dei *pixel* circostanti e del *pixel* considerato. L'insieme dei pesi relativi al *pixel* considerato e ai suoi vicini è detto *kernel* (o maschera di convoluzione) e può essere considerato come una tabella di dimensioni, 2x2, 3x3 ecc. La media pesata differisce dalla media convenzionale per il fatto che i valori dei vari *pixel* vengono moltiplicati per i pesi corrispondenti nel *kernel* (coefficienti di convoluzione) i quali determinano la maggiore o minore influenza del *pixel* associato sul risultato finale.

Il *kernel* classico ha dimensioni 3x3 e i *pixel* circostanti il *pixel* centrale □ sono detti 8-vicini. Numerando i *pixel* circostanti da 0 a 7:

```
0 1 2
3 □ 4
5 6 7
```

la maschera di convoluzione:

```
w0 w1 w2
w3 w□ w4
w5 w6 w7
```

attribuisce il peso w0 al *pixel* numerato 0, w1 a quello numerato 1, e così via.

La maschera di convoluzione di un filtro di *sharpening*, che permette di accentuare le alte frequenze lasciando inalterate le basse frequenze, è costituita da un 9 centrale e da una serie di -1 intorno:

```
-1 -1 -1
-1 9 -1
-1 -1 -1
```

La maschera di convoluzione classica di un filtro passa basso, che riduce le alte frequenze producendo un'immagine più offuscata, è costituita da nove coefficienti di valore 1/9 (media mobile 3x3)

```
1/9 1/9 1/9
1/9 1/9 1/9
1/9 1/9 1/9
```

La classica maschera di convoluzione di un filtro di tipo Laplaciano modificato (passa alto) che permette di evidenziare tutti i contorni indipendentemente dal loro orientamento, è costituita da un 8 centrale e da una serie di -1 tutt'intorno.

```
-1 -1 -1
-1 8 -1
-1 -1 -1
```

Combinazione di immagini

La combinazione di due immagini può essere espressa matematicamente come:

$$R(x,y) = I_1(x,y) \& I_2(x,y)$$

ove $I_1(x,y)$ e $I_2(x,y)$ rappresentano le due immagini mentre $\&$ rappresenta la funzione di combinazione che corrisponde agli operatori matematici e logici +, -, x, /, AND, OR, OR esclusivo.

Operatori locali lineari e non lineari

In generale con il termine di operatore locale si intende ogni algoritmo matematico che opera su un intorno del *pixel* considerato, facendo concorrere al risultato tutti i *pixel* compresi nell'intorno stesso. Si distinguono operatori locali lineari in cui si ha:

$$\text{Op}(A+B) = \text{Op}(A) + \text{Op}(B)$$

con Op operatore generico e A e B immagini, come i familiari filtri passa alto, passa basso ecc. che operano tramite convoluzione, e operatori non lineari per cui si ha:

$$\text{Op}(A+B) \neq \text{Op}(A) + \text{Op}(B)$$

Di solito i risultati più interessanti si ottengono con quest'ultimi operatori tra cui possiamo citare il filtro mediano, il filtro min-max adattativo, il filtro di *coarseness* ecc.

Note tecniche

Le elaborazioni presentate sono state eseguite su *hardware* AST e PS/2 IBM, usando i seguenti *software*:

1. *Aldus Photostylor 2*, sistema operativo *MS Windows*
2. *Research Systems ENVI 2.0* e *IDL 3.6.1*, sistema operativo *MS Windows*
3. *software ad hoc*, sistema operativo *OS/2 WARP*

BIBLIOGRAFIA

- BAXES G.A. 1984, *Digital Image Processing. A Pratical Primer*, Denver, Cascade Press.
- BEDELLO M. 1975, *Capua Preromana. Terrecotte votive, III, Testine e Busti*, Firenze, Sansoni ed.
- BONGHI JOVINO M. 1965, *Capua Preromana. Terrecotte votive, I, Teste isolate e mezzeteste*, Firenze, Sansoni ed.
- BONGHI JOVINO M. 1990 (ed.), *Artigiani e botteghe nell'Italia Preromana*, Roma, L'Erma di Bretschneider.
- CAPPELLINI V. 1985, *Elaborazione numerica delle immagini*, Torino, Boringhieri.
- GONZALES R.C., WINTZ P. 1977, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley.
- REALE M. 1989, *Le iscrizioni latine del territorio comense settentrionale*, «Rivista Archeologica dell'Antica Provincia e diocesi di Como», 171, 207-297.
- ROSENFELD A., AVINASH C.K. 1982, *Digital Picture Processing*, London - New York, Academic Press.
- SARTORI A. 1994, *Guida alla sezione epigrafica delle Raccolte Archeologiche di Milano*, Milano, Comune di Milano.
- ZAMPERONI P. 1990, *Metodi dell'elaborazione digitale di immagini*, Milano, Masson.

ABSTRACT

The authors describe the use of digital image processing techniques aiming at achieving criteria of quantitative comparison. Usually these procedures are executed using visual superimposition of images and constrained by the lack of rescaling and anamorphic making up that could be used to cancel the optical distortions caused by lenses. The criteria used within the experimental activity are aimed at helping the archaeologists without changing their traditional research methods. These techniques can be seen as an interesting tool able not only to make impartial but also to enhance the autoptic analysis of the findings. The most important algorithms pertaining to Image Processing have been used for investigating the origin and the age of moulded and handmade objects.