

# Tecniche numeriche di estrazione dei contorni

Edge detection digital techniques

R. CARLÀ, C. CONESE, E. DEL RE (\*)

**Riassunto** - Le tecniche di estrazione dei contorni risultano di notevole interesse in molti campi applicativi dell'elaborazione numerica delle immagini, come la biomedicina, il telerilevamento, la robotica, ecc. In questo articolo vengono brevemente passati in rassegna alcuni tra i più noti algoritmi di estrazione dei contorni (Roberts, Sobel, Kirsch, ecc.). Vengono quindi presentati i risultati sperimentali ottenuti dall'applicazione di alcuni di essi e viene effettuato un confronto di efficienza in base alla precisione delle linee rilevate ed al tempo di elaborazione.

**Abstract** - Edge detection techniques are of high interest in many digital image processing areas as biomedicine, remote sensing, robotics, etc. In this paper some of the best known algorithms of edge detection (Roberts, Sobel, Kirsch, etc) are briefly reviewed. Experimental results obtained by application of some of them are then presented and a test on efficiency is done regarding line thickness and time processing.

## 1. Introduzione

In molti campi (telerilevamento, robotica, ecc.) spesso l'informazione più interessante contenuta in una immagine è costituita dai contorni dei vari oggetti raffigurati; a questo è dovuto quindi l'alto interesse, nell'elaborazione numerica delle immagini, per gli algoritmi di rivelazione ed estrazione dei contorni. Molte sono le tecniche e le soluzioni già sperimentate, dal semplice operatore del gradiente, all'impiego di maschere ed ai vari algoritmi non lineari che impiegano operatori  $2 \times 2$  e  $3 \times 3$ , fino ai ben più complessi processi di filtraggio numerico passa-alto e passa-banda.

In questo articolo vengono passati in rassegna alcuni tra i più noti algoritmi per l'estrazione dei contorni e viene effettuato un confronto tra i risultati ottenuti da alcuni di essi (Sobel, Roberts, ecc.) e da due algoritmi del tipo euristico messi a punto presso l'Istituto di Elettronica della Facoltà di Ingegneria di Firenze.

di segnalare il contorno, localizzandolo esattamente nel punto medio con una linea di 1 pixel di spessore.

Il metodo più comunemente impiegato è quello schematizzato in fig. 1, in cui l'immagine originale  $F(i, j)$  viene sottoposta ad un processo lineare o non lineare di elaborazione per produrre una nuova immagine  $G(i, j)$  nella quale risultano accentuate le variazioni di luminosità; il risultato viene infine sottoposto ad una opportuna esaltazione che evidenzia i contorni rilevati.

La letteratura esistente riporta un'ampia varietà di algoritmi per l'estrazione dei contorni in un'immagine digitale ed ogni ricercatore ha i suoi schemi e procedimenti preferiti, ma non è in generale possibile classificare un metodo come il migliore in assoluto. Infatti, ciascun algoritmo possiede un suo grado di efficienza in rapporto alla qualità dell'immagine considerata ed al tipo di linee che si desidera porre in evidenza; è da notare che l'algoritmo che per ipotesi

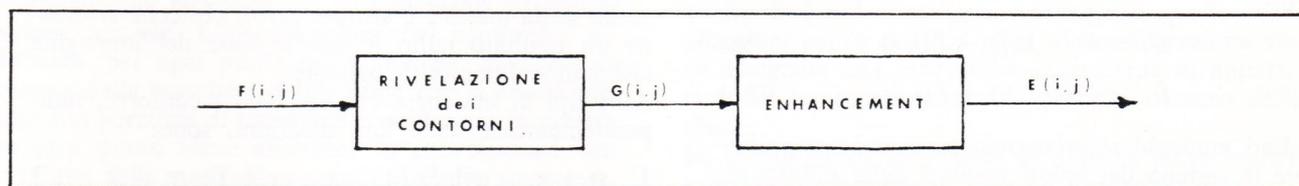


Fig. 1 - Elaborazione dell'immagine per estrazione dei contorni.

## 2. Algoritmi di estrazione dei contorni

Ciò che l'occhio umano vede come contorno o limite tra due oggetti può essere definito come una discontinuità o brusca variazione di luminosità dell'immagine tra due regioni sufficientemente omogenee. L'algoritmo ideale di rivelazione è quindi quello in grado

riuscisse a rilevare « tutte » le linee di un'immagine non risulta in genere il migliore.

Generalmente, le tecniche ed i relativi algoritmi di estrazione dei contorni vengono suddivisi in tre classi principali:

- a) filtraggio numerico;
- b) elaborazioni basate sulla scala dei grigi;
- c) operatori locali basati su metodi euristici.

Tralasciamo le tecniche di filtraggio numerico, che richiedono complessità e tempi di elaborazione note-

(\*) Prof. ing. Roberto Carlà, prof. ing. Claudio Conese, prof. ing. Enrico Del Re, Istituto di Elettronica, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Firenze.

voli, ed anche la seconda classe delle elaborazioni basate sulla scala dei grigi, utilmente efficienti solo in particolari casi; consideriamo invece la classe degli operatori locali che rilevano i contorni mediante operazioni effettuate sul punto in considerazione e quelli adiacenti.

Una delle tecniche più semplici è costituita dalla differenziazione discreta (analoga a quella continua) che permette di ottenere i contorni orizzontali (differenziazione per colonne):

$$G(i, j) = |F(i, j) - F(i, j+1)| \quad (1a)$$

e quelli verticali (differenz. per righe):

$$G(i, j) = |F(i, j) - F(i+1, j)| \quad (1b)$$

Un'accentuazione delle linee verticali può essere ottenuta con il seguente algoritmo:

$$G(i, j) = F(i, j) - F(i, j-1) + F(i, j) - F(i, j+1) \quad (2)$$

Espressioni simili sono ovviamente valide per linee di contorno orizzontali ed oblique. In conclusione, è possibile rivelare solo linee di contorno in una particolare direzione, eseguendo una differenziazione in direzione ortogonale a quella scelta.

In molti casi è utile ottenere i contorni indipendentemente dall'orientazione; ciò può essere ottenuto con il metodo comunemente detto del « gradiente » che in ogni punto calcola la funzione contorno  $G$  come radice quadrata della somma dei quadrati delle derivate in qualunque coppia di direzioni ortogonali:

$$G(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

Per un'immagine digitale, la precedente espressione viene approssimata da:

$$G(i, j) = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (4)$$

in cui:

$$D_x = F(i+1, j) - F(i, j) \quad (5a)$$

$$D_y = F(i, j+1) - F(i, j) \quad (5b)$$

Risultati analoghi si ottengono eseguendo semplicemente la somma dei valori assoluti delle differenze, conformemente a:

$$G(i, j) = |D_x| + |D_y| \quad (6)$$

Quest'ultima forma del metodo del gradiente è quella più comunemente impiegata nell'elaborazione digitale per mezzo dell'elaboratore elettronico, a causa del tempo di calcolo necessario notevolmente inferiore.

In generale, un qualunque tipo di differenziazione discreta può essere effettuato con il metodo cosiddetto delle « maschere », che valuta in ogni punto la convoluzione dell'immagine originale con particolari maschere (pesi per cui deve essere moltiplicato il va-

lore del singolo pixel), in genere di dimensioni  $2 \times 2$  o  $3 \times 3$ . Per evidenziare ad esempio le linee di contorno orizzontali è possibile impiegare l'operatore  $3 \times 3$ :

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

che fornisce un valore massimo per variazioni di luminosità orizzontali da sinistra a destra. Per contorni verticali viene invece impiegata la seguente maschera:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Anche le formule (1a) ed (1b), precedentemente descritte, possono essere calcolate con il metodo delle maschere impiegando rispettivamente gli operatori  $2 \times 2$ :

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9a)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (9b)$$

Similmente il risultato della (2) può essere ottenuto mediante l'applicazione di:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Anche il gradiente può essere ottenuto equivalentemente con il metodo delle maschere, impiegando per  $D_x$  e  $D_y$  rispettivamente l'operatore (9a) e (9b) ed effettuando la somma dei valori assoluti ottenuti dalle due convoluzioni.

È opportuno notare che in ogni maschera il « peso » complessivo è uguale a zero (la somma dei singoli elementi della matrice è sempre zero), cosicché si ottiene un risultato nullo in quelle zone dell'immagine che hanno luminosità costante.

Altri tipi di maschere che rivelano i contorni, indipendentemente dalle loro direzioni, sono:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Alla classe delle maschere di convoluzione appartiene anche l'algoritmo di tipo euristico ideato presso il nostro Istituto:

$$G(i, j) = \frac{1}{2} \sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} |F(i, j) - F(m, n)| \quad (12)$$

che estende l'operazione di differenziazione alle otto possibili direzioni, pesandola per il fattore  $1/2$ . Que-

sto operatore fornisce ottimi risultati con immagini poco rumorose.

Un limite comune ai metodi precedentemente descritti è costituito dall'amplificazione delle alte frequenze spaziali di rumore, come risultato delle operazioni di differenziazione.

Uno dei più noti algoritmi del tipo non lineare è dovuto a Sobel, per cui:

$$G(i, j) = \sqrt{D_x^2 + D_y^2} \quad (13)$$

dove:

$$D_x = (B_2 + 2B_3 + B_4) - (B_0 + 2B_7 + B_6)$$

$$D_y = (B_0 + 2B_1 + B_2) - (B_6 + 2B_5 + B_4)$$

ed i  $B_i$  sono riferiti alla matrice:

$$\begin{bmatrix} B_0 & B_1 & B_2 \\ B_7 & F(i, j) & B_3 \\ B_6 & B_5 & B_4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

L'algoritmo di Roberts impiega invece un operatore 2 x 2 secondo la relazione:

$$G(i, j) = \{ [F(i, j) - F(i+1, j+1)]^2 + [F(i+1, j) - F(i, j+1)]^2 \}^{1/2} \quad (15)$$

Lo stesso metodo viene impiegato efficacemente e con un tempo di calcolo notevolmente minore anche nella forma semplificata:

$$G_1(i, j) = |F(i, j) - F(i+1, j+1)| + |F(i+1, j) - F(i, j+1)| \quad (16)$$

Si può dimostrare che:

$$G(i, j) \leq G_1(i, j) \leq \sqrt{2} G(i, j) \quad (17)$$

Un altro tipo di algoritmo per l'estrazione dei contorni è basato sull'impiego di un insieme di 8 maschere 3 x 3, ciascuna delle quali è ottenuta dalla precedente mediante una rotazione dei suoi elementi attorno al valore centrale. L'identificazione dei contorni è effettuata, per ogni punto dell'immagine, mediante la ricerca della maschera dell'insieme che si adatta meglio alla porzione di immagine considerata; in pratica in ogni punto viene effettuata la convoluzione con ciascuna delle maschere e quindi al punto viene assegnato il valore più alto ottenuto.

Uno dei più noti algoritmi di questo tipo è dovuto a Kirsch, che definisce la funzione del contorno  $G$  secondo la relazione:

$$G(i, j) = \max_{k=0}^7 [ |5 M_k - 3 N_k| ] \quad (18)$$

dove (cfr. 14):

$$M_k = B_k + B_{k+1} + B_{k+2} \quad (18a)$$

$$N_k = B_{k+3} + B_{k+4} + B_{k+5} + B_{k+6} + B_{k+7} \quad (18b)$$

e gli indici  $k$  sono modulo 8.

La corrispondente maschera dalla quale derivano per rotazione le altre sette è ovviamente:

$$\begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

L'algoritmo di Kirsch in pratica assegna l'ampiezza massima del gradiente in un punto dell'immagine ignorando il valore del pixel in considerazione. Questo algoritmo permette di rivelare i contorni delle figure più piccole anche se poco contrastate, a scapito però di un notevole aumento nel tempo di elaborazione.

Altri tipi di maschere per lo stesso metodo sono dovute a Prewitt:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

ed a Robinson:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (21a)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (21b)$$

Un altro metodo, catalogabile come euristico, proposto da Cappellini-Odorico, che impiega sempre un operatore 3 x 3, è basato su un'appropriata tavola di decisione. Agli 8 pixel attorno al pixel in considerazione viene fatto corrispondere un valore binario in base ad un criterio di soglia adattabile a differenti tipi di immagine. Le 256 possibili configurazioni degli 8 pixel vengono suddivise in 5 classi, di cui la prima contiene quelle configurazioni per cui il pixel centrale appartiene sicuramente ad una linea di contorno e viceversa per l'ultima; le classi intermedie da 2 a 4 contengono ovviamente quelle configurazioni per le quali al pixel in considerazione viene assegnata una probabilità decrescente di appartenere ad un contorno al crescere del numero della classe.

Le cinque classi sono state definite in parte euristicamente ed in parte in base ad una stima di massima verosimiglianza.

Il vantaggio principale di questo algoritmo è dato dalla velocità di esecuzione, dovuta al confronto diretto tra una possibile configurazione e la tavola di riferimento.

### 3. Risultati sperimentali

Alcuni degli algoritmi di estrazione dei contorni descritti sono stati realizzati in software presso l'Istituto di Elettronica della Facoltà di Ingegneria di Firenze; quindi è stato eseguito un confronto diretto fra i risultati ottenuti, relativamente agli aspetti principali della qualità (definizione dei contorni, reie-