Fondamenti di Elaborazione di Immagini Estrazione dei Bordi e Segmentazione

Raffaele Cappelli raffaele.cappelli@unibo.it



Contenuti

- Estrazione dei bordi
 - □ Calcolo del gradiente
 - Operatori di Roberts
 - Operatori di Prewitt e di Sobel
 - □ Canny edge detector
- Segmentazione
 - ☐ Binarizzazione con soglia globale
 - □ Binarizzazione con soglia locale
 - ☐ Altre tecniche di segmentazione



Estrazione dei bordi

- Bordo di un oggetto
 - □ La separazione tra l'oggetto e lo sfondo o tra l'oggetto e altri oggetti
 - □ In genere molto più stabile rispetto alle informazioni di colore e tessitura, rispetto a illuminazione, rumore, ...
 - □ È indispensabile per poterne interpretare forma geometrica
- Estrazione dei bordi (edge detection)
 - ☐ Si tratta di un'operazione molto importante, utilizzata in gran parte dei sistemi di visione/riconoscimento
 - □ È spesso il primo passo per l'individuazione dell'oggetto
- Algoritmi di edge detection
 - □ In genere l'individuazione dei bordi si avvale di filtri derivativi: il valore in ogni punto rappresenta una stima numerica del gradiente nel pixel corrispondente dell'immagine



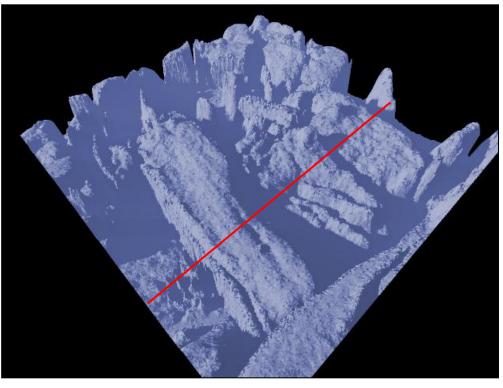
Derivate e gradiente di un'immagine

- Derivata di un segnale
 - □ La derivata di un segnale denota la sua variabilità:
 - a fronte di forti variazioni locali (i.e. contorni e altri bruschi cambiamenti di intensità) la derivata assume valori elevati.
 - se il segnale è costante la derivata è zero.
 - □ Nel caso di segnali bidimensionali (come le immagini), si devono considerare le derivate parziali.
 - □ Il gradiente è il vettore le cui componenti sono le derivate parziali nelle diverse direzioni (2 nel caso di immagini).

$$\nabla \mathbf{I}[\mathbf{x}, \mathbf{y}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{I}[\mathbf{x}, \mathbf{y}]}{\partial x}, \frac{\partial \mathbf{I}[\mathbf{x}, \mathbf{y}]}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Derivate e gradiente di un'immagine (2)







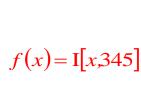


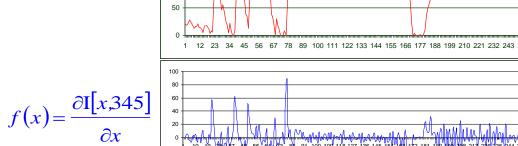
Derivate e gradiente di un'immagine (3)

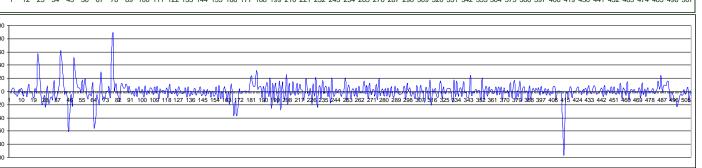
- Derivata di un'immagine in un punto
 - □ L'immagine è un segnale discreto
 - □ Dalla definizione di derivata come limite del rapporto incrementale:

$$\frac{\partial I[x,y]}{\partial x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{I[x + \Delta x,y] - I[x,y]}{\Delta x} \Rightarrow I[x + 1,y] - I[x,y]$$

$$\frac{\partial I[x,y]}{\partial y} = \lim_{\Delta y \to 0} \frac{I[x,y+\Delta y] - I[x,y]}{\Delta y} \Rightarrow I[x,y+1] - I[x,y]$$



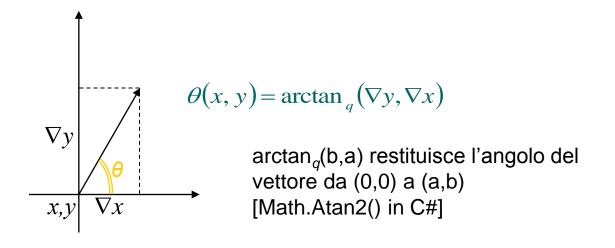


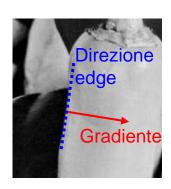




Modulo e orientazione del gradiente

- Orientazione del vettore gradiente in un punto
 - Indica la direzione di maggior variazione d'intensità in quel punto dell'immagine
 - ☐ Attenzione al verso dell'asse *y*:
 - In figura l'origine degli assi è in basso a sinistra (coordinate cartesiane), ma spesso nelle immagini al computer il pixel (0,0) è in alto a sinistra: il segno della componente y e dell'angolo θ va quindi aggiustato di conseguenza
- Direzione dell'edge
 - □ È ortogonale all'orientazione del gradiente

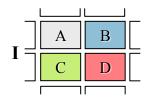


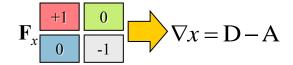


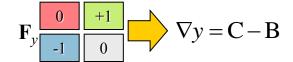


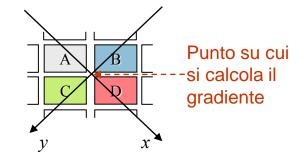
Calcolo del gradiente – Operatori di Roberts

- Convoluzione con una coppia di filtri 2x2
 - □ Misurano il gradiente lungo assi ruotati di 45° rispetto agli assi dell'immagine (con origine in alto a sinistra)
 - Questo consente di calcolare le due componenti del gradiente nel medesimo punto (esattamente al centro di quattro pixel adiacenti)
- Caratteristiche
 - Pro: possono essere calcolati in modo rapido ed efficiente
 - □ Contro: sono molto sensibili al rumore
- Calcolo del gradiente
 - □ Per maggiore efficienza il modulo è spesso approssimato come somma dei moduli delle due componenti
 - ☐ L'orientazione va riportata alle coordinate canoniche (ruotando di 45°)







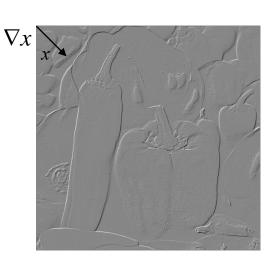


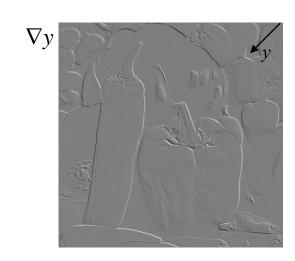
$$\|\nabla\| = \sqrt{\nabla x^2 + \nabla y^2} \cong |\nabla x| + |\nabla y|$$

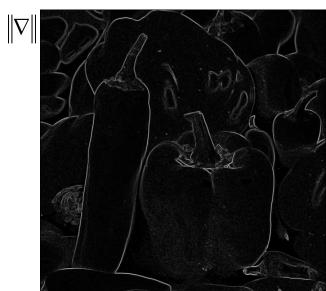
$$\theta = \arctan_{q} (\nabla y, \nabla x) + \frac{\pi}{4}$$

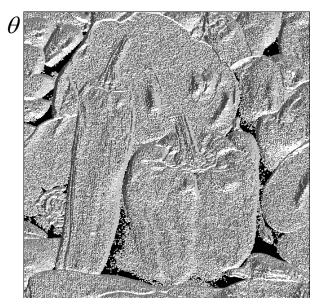
Operatori di Roberts – Esempi

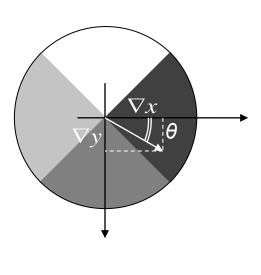








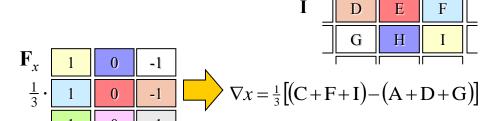


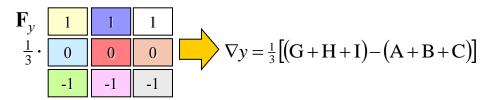


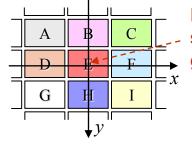


Operatori di Prewitt e di Sobel

- Prewitt: due filtri 3x3
 - Meno sensibili a variazioni di luce e rumore
 - Calcolo del gradiente lungo una direzione e media locale (smooth) lungo la direzione ortogonale
 - Simmetrici rispetto al punto di applicazione
 - □ Assi x e y orientati in modo tradizionale
 - Origine in alto a sinistra (se si lavora con l'origine in basso è sufficiente invertire il filtro y)
- Sobel: due filtri 3x3
 - □ Peso maggiore al pixel centrale





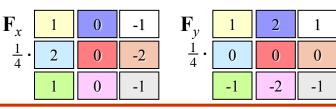


Punto su cui si calcola il gradiente

$$\left\|\nabla\right\| = \sqrt{\nabla x^2 + \nabla y^2}$$

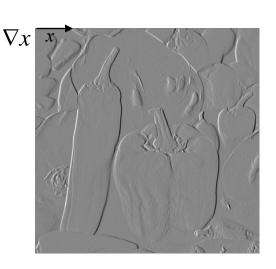
В

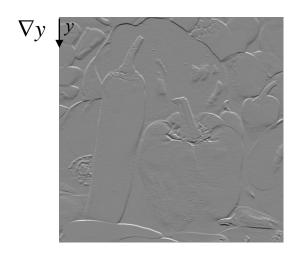
$$\theta = \arctan_q (\nabla y, \nabla x)$$

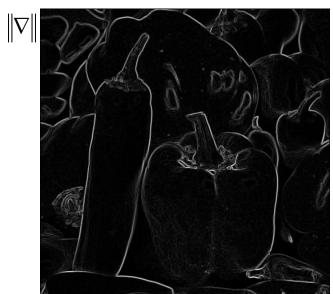


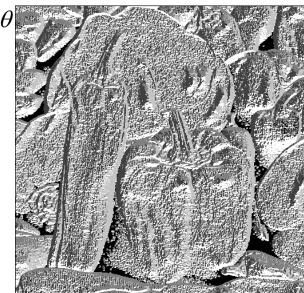
Operatori di Prewitt - Esempio

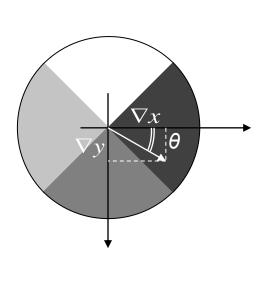








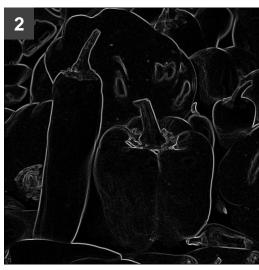


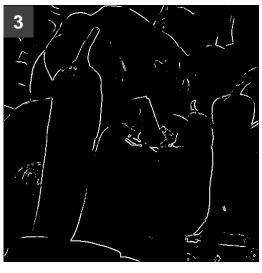




- Immagine originale
- Calcolo del modulo del gradiente con gli operatori di Sobel
- Binarizzazione con soglia determinata sperimentalmente
- Edge trovati (sovrapposti all'immagine originale)
- Problemi principali:
 - Frammenti di edge non connessi
 - Punti e segmenti "spuri" a causa di rumore o piccole variazioni locali











Canny edge detector

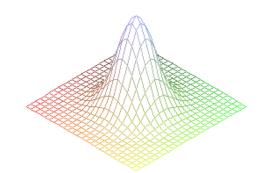
- Il metodo di Canny produce edge connessi che possono essere efficacemente utilizzati per le successive fasi di elaborazione.
- L'approccio prevede le seguenti fasi:
 - 1) Smoothing gaussiano dell'immagine
 - 2) Calcolo del gradiente
 - □ 3) Soppressione dei non-massimi in direzione ortogonale all'edge
 - □ 4) Selezione degli edge significativi mediante isteresi
- I risultati dipendono da alcuni parametri:
 - \Box σ ampiezza della gaussiana nella prima fase
 - Dimensione del filtro nella prima fase
 - □ T1 e T2 soglie per l'isteresi nell'ultima fase



Canny – 1) Smoothing Gaussiano

- Gli elementi sono pesati secondo una funzione gaussiana.
 - Il parametro σ controlla l'ampiezza della gaussiana e quindi l'entità della regolarizzazione.
 - ☐ Il filtro è separabile: conviene effettuare la convoluzione con due filtri 1D (identici fra loro)
- Approssimazione con valori interi (per maggiore efficienza)
 - □ Il termine (1/sqrt(...)) può essere trascurato, in quanto dopo il calcolo è comunque necessario normalizzare gli elementi rispetto alla somma dei pesi
 - □ Esempio (σ =1) di una possibile soluzione:

$$G_{2D}(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$



$$G_{1D}(t,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$$

$$G_{2D}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{\sigma}) = G_{1D}(\mathbf{x}, \mathbf{\sigma}) \cdot G_{1D}(\mathbf{y}, \mathbf{\sigma})$$

Filtro 1D (ignorando termine moltiplicativo)



$$\frac{1}{17}$$
. $\boxed{1}$ $\boxed{4}$ $\boxed{7}$ $\boxed{4}$ $\boxed{1}$ Approssimazione intera e normalizzazione

Canny - 1) Smoothing Gaussiano - Esempi









 σ = 4, Filtro 9x9



 σ = 5, Filtro 15x15



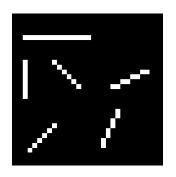


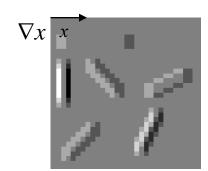


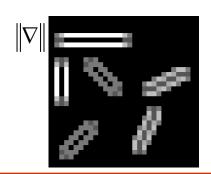


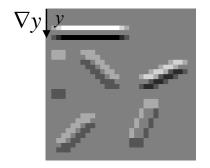


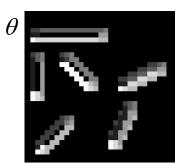
- Operatori da utilizzare
 - □ Dato che lo smoothing dovrebbe aver rimosso la maggior parte del rumore, l'implementazione più efficiente si avvale degli operatori di Roberts
 - □ Risultano tuttavia di più semplice applicazione gli operatori di Prewitt, in quanto non ci si deve preoccupare della rotazione degli assi di 45°
- Esempio del risultato della fase 2 utilizzando gli operatori di Prewitt:

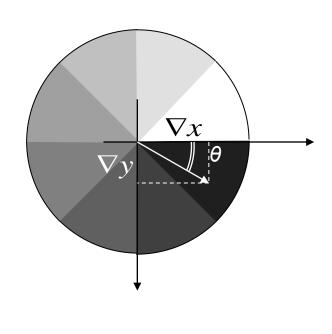






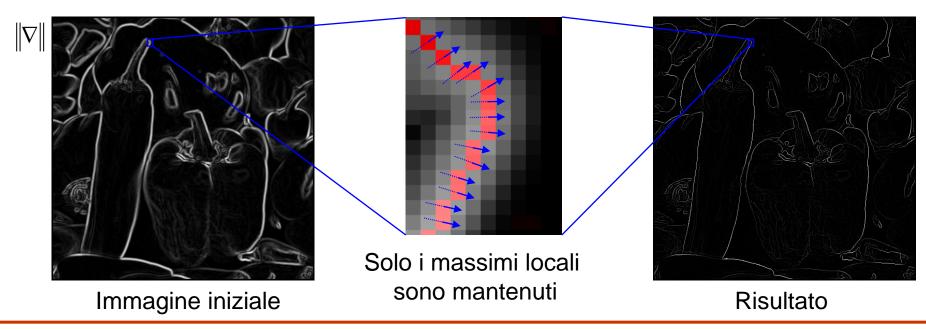






Canny – 3) Soppressione dei non-massimi

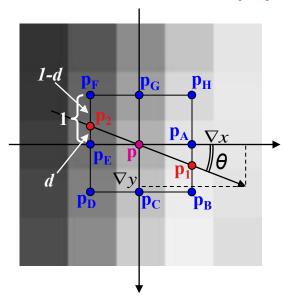
- Obiettivo
 - Eliminare dall'immagine modulo-gradiente i pixel che non sono massimi locali rispetto all'orientazione del gradiente
- Diversi approcci possibili
 - □ Il più semplice consiste nell'analizzare l'intorno 3x3 di ogni pixel, eliminando i pixel che non rispettano la condizione di massimo locale lungo la direzione del gradiente (ortogonale all'edge)





Canny – 3) Soppressione dei non-massimi (2)

- Verifica della condizione di massimo locale nell'intorno 3x3
 - □ Si stima il modulo del gradiente nei punti p₁ e p₂ mediante interpolazione lineare
 - La figura mostra l'interpolazione nel caso l'orientazione del gradiente appartenga al primo ottante; gli altri casi sono analoghi
 - □ II pixel p viene conservato solo se $\|\nabla[\mathbf{p}]\| \ge \|\nabla[\mathbf{p}_1]\| \wedge \|\nabla[\mathbf{p}]\| \ge \|\nabla[\mathbf{p}_2]\|$
 - Questo approccio non garantisce edge di spessore unitario (benché in genere lo siano)
 - A tale fine può essere utilizzata una procedura di thinning al termine dell'intero algoritmo



$$\|\nabla[\mathbf{p}_1]\| \cong d \cdot \|\nabla[\mathbf{p}_B]\| + (1 - d)\|\nabla[\mathbf{p}_A]\|$$

$$\|\nabla[\mathbf{p}_2]\| \cong d \cdot \|\nabla[\mathbf{p}_F]\| + (1 - d)\|\nabla[\mathbf{p}_E]\|$$

$$\nabla_V[\mathbf{p}]$$

$$d = \frac{\nabla y[\mathbf{p}]}{\nabla x[\mathbf{p}]}$$

18

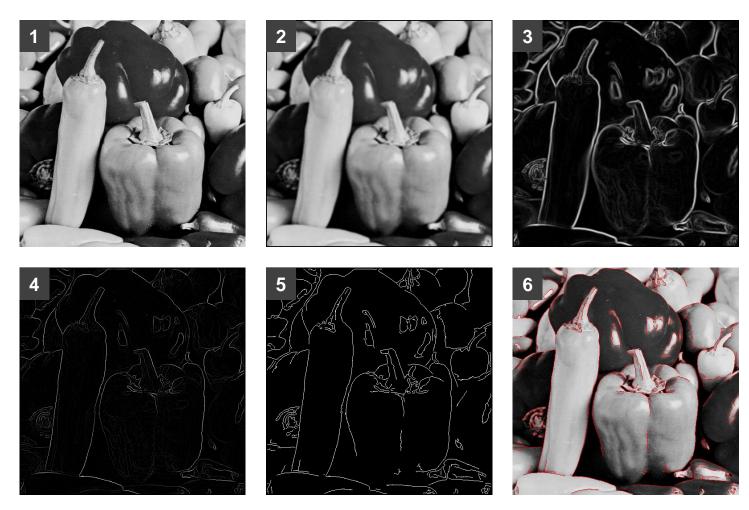


Canny – 4) Selezione finale degli edge

Isteresi

- □ Al fine di selezionare solo gli edge significativi (tralasciando edge "spuri"), ma evitando allo stesso tempo la frammentazione, si utilizza il concetto di isteresi: vengono impiegate due soglie T₁ e T₂, con T₁>T₂ per scremare ulteriormente i massimi locali ottenuti nella fase precedente:
 - Sono inizialmente considerati validi solo i pixel in cui il modulo del gradiente è superiore a T₁.
 - I pixel il cui modulo è inferiore a T₁ ma superiore a T₂ sono considerati validi solo se adiacenti a pixel validi.
- □ T₁ e T₂ sono tipicamente espresse come valori fra 0 e 1 (il modulo del gradiente va normalizzato nello stesso intervallo per permettere il confronto con le due soglie).
- □ Una corretta scelta di T₁ e T₂, così come un'adeguata scelta di σ nella prima fase, sono molto importanti per ottenere gli effetti desiderati.
 - La scelta dipende solitamente dall'applicazione e sono tipicamente necessari vari esperimenti per giungere ai valori ottimali dei parametri.

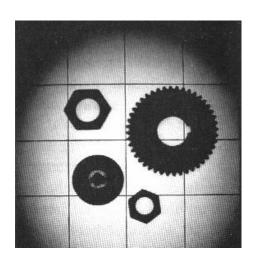
Canny edge detector – Esempi

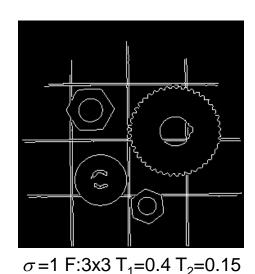


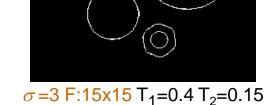
1) Immagine originale – 2) Smoothing gaussiano – 3) Modulo del gradiente

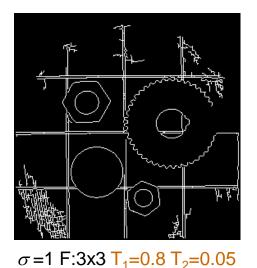
4) Soppressione non-massimi – 5) Selezione edge – 6) Edge sovrapposti a immagine originale

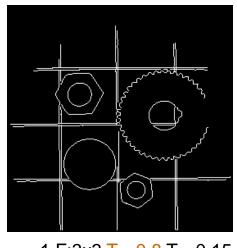


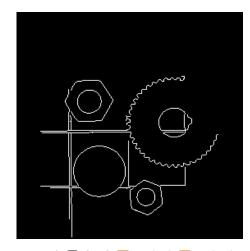












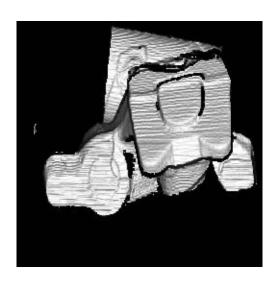
 σ =1 F:3x3 T₁=0.8 T₂=0.4

Canny edge detector – Esempi (3)

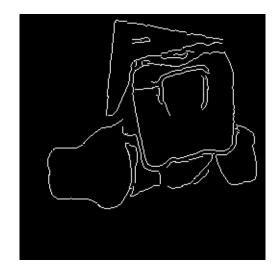


 σ =2 F:5x5 T₁=0.3 T₂=0.15



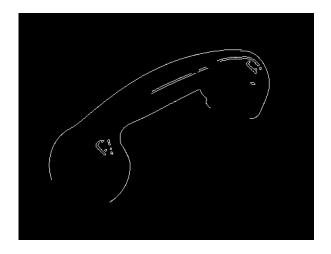


 σ = 2 F:5x5 T₁=0.4 T₂=0.2





 σ = 1 F:3x3 T₁=0.3 T₂=0.15





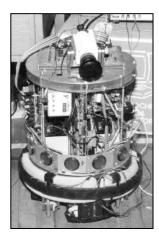
Segmentazione

Obiettivo

- □ Separazione di uno o più oggetti di interesse dallo sfondo (background)
- □ A volte può essere un compito semplice ma in alcuni casi è molto complesso



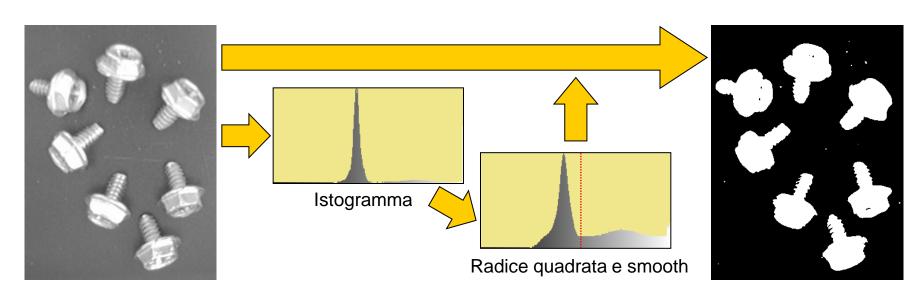
Caso Semplice



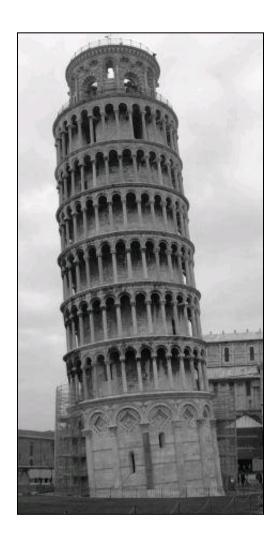
Caso complesso

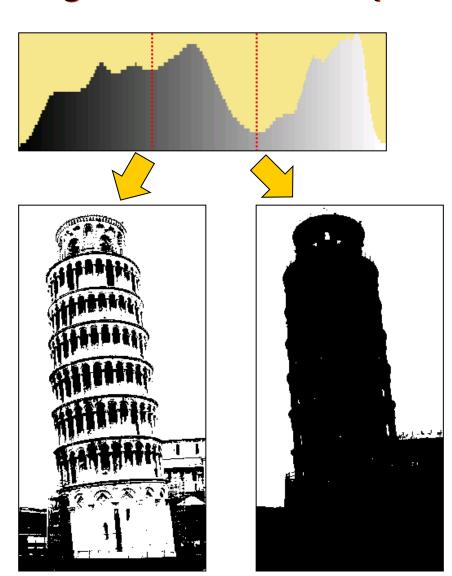
Segmentazione mediante binarizzazione

- Scelta automatica della soglia a partire dall'istogramma
 - □ La presenza due o più picchi nell'istogramma è spesso causata da oggetti con luminosità medie diverse
 - □ La soglia ottimale viene determinata come minimo locale tra i due picchi costituiti dallo sfondo (se omogeneo) e dagli oggetti.
 - □ Una regolarizzazione (smoothing) a priori dell'istogramma e la sua rappresentazione come radice quadrata può rendere più robusta e affidabile l'operazione di ricerca del/i minimo/i locale/i.



Binarizzazione e istogramma – Esempio

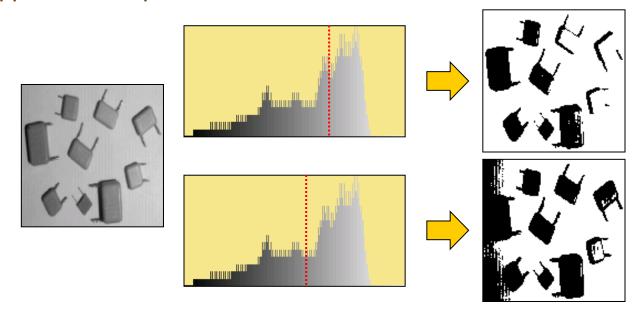






Segmentazione: binarizzazione con soglia locale

- Problemi con la soglia globale
 - Quando oggetti e sfondo non sono uniformi, la scelta della soglia globale è un'operazione molto critica
 - □ Ad esempio, se lo sfondo presenta un gradiente di illuminazione (ossia la luminosità varia gradualmente da una zona all'altra dell'immagine),
 l'approccio non può essere utilizzato con successo

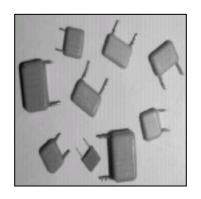


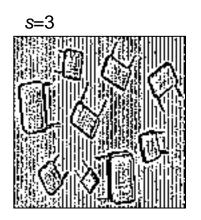
Una possibile soluzione: utilizzare soglie locali

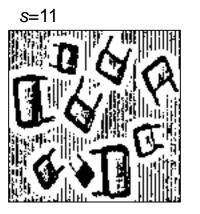
Binarizzazione con soglia locale

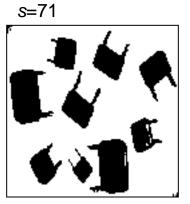
- Per ogni pixel la soglia è determinata considerando una porzione dell'immagine
- Diversi approcci sono possibili:
 - □ Dividere l'immagine in regioni (meglio se parzialmente sovrapposte) e su ognuna di esse calcolare la soglia mediante analisi dell'istogramma
 - □ Dividere ricorsivamente l'immagine in regioni finché il loro istogramma è chiaramente bimodale (due picchi ben separati)
 - □ Per ogni pixel dell'immagine determinare la soglia attraverso l'analisi dei pixel in un intorno
 - Nell'esempio in figura la soglia è semplicemente determinata come media dei pixel in un intorno quadrato di lato s

□ ...



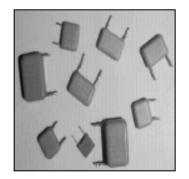


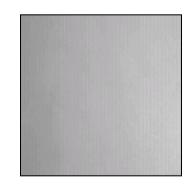


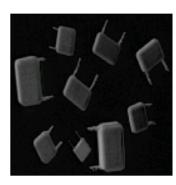


Segmentazione: sottrazione dello sfondo

- Utilizzo di conoscenze note a priori:
 - □ In determinate applicazioni la conoscenza di informazioni sull'oggetto da segmentare o sullo sfondo consentono di semplificare la segmentazione
 - □ Se lo sfondo e l'illuminazione sono costanti, la sottrazione dell'immagine dello sfondo (catturata in assenza dell'oggetto) da quella che si vuole segmentare è una tecnica generalmente molto efficace

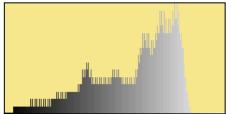










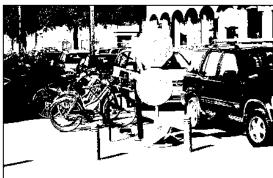




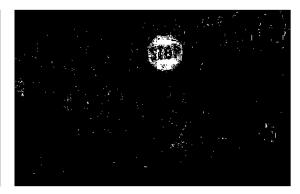
Segmentazione: utilizzo del colore

- Il colore può essere di grande aiuto per la segmentazione
- Esempio
 - □ Per segmentare il cartello di "stop" in figura, l'analisi della componente Hue permette di isolare facilmente la parte di interesse
 - □ Passi successivi di eliminazione del rumore e analisi della forma (per eliminare falsi positivi) possono poi portare al risultato finale desiderato
 - □ Difficilmente si sarebbe potuto ottenere un risultato analogo con una semplice binarizzazione dell'immagine grayscale





Tentativo di binarizzazione dall'immagine grayscale



I soli pixel con Hue = 0 ± 0.05 sono posti a 255



Altre tecniche di segmentazione

- Alcuni esempi di tecniche di segmentazione più avanzate:
 - □ Segmentazione con clustering dello spazio RGB o HSL [→VAR]
 - □ Tecniche basate su regioni
 - Region growing [→VAR]
 - Region splitting and merging
 - ☐ Utilizzo del movimento per segmentare oggetti in un filmato
 - □ Utilizzo della tessitura