

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

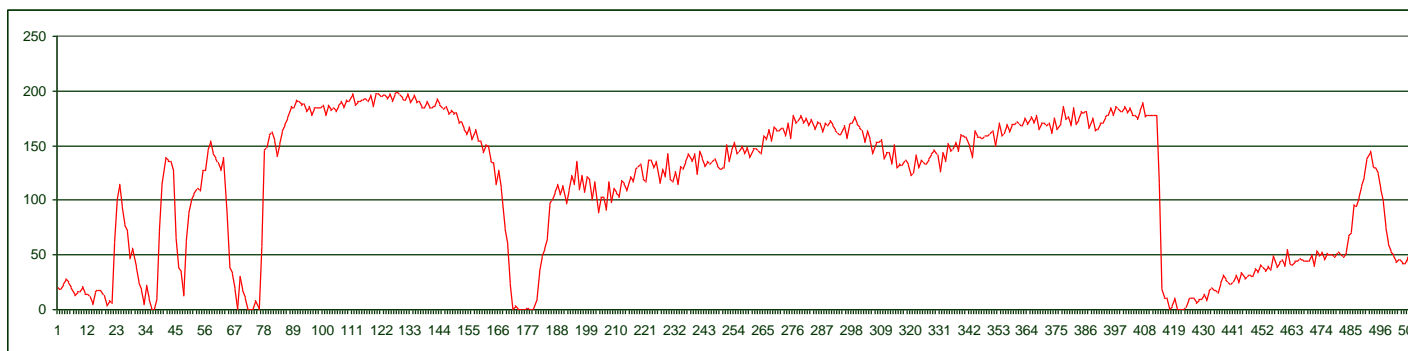
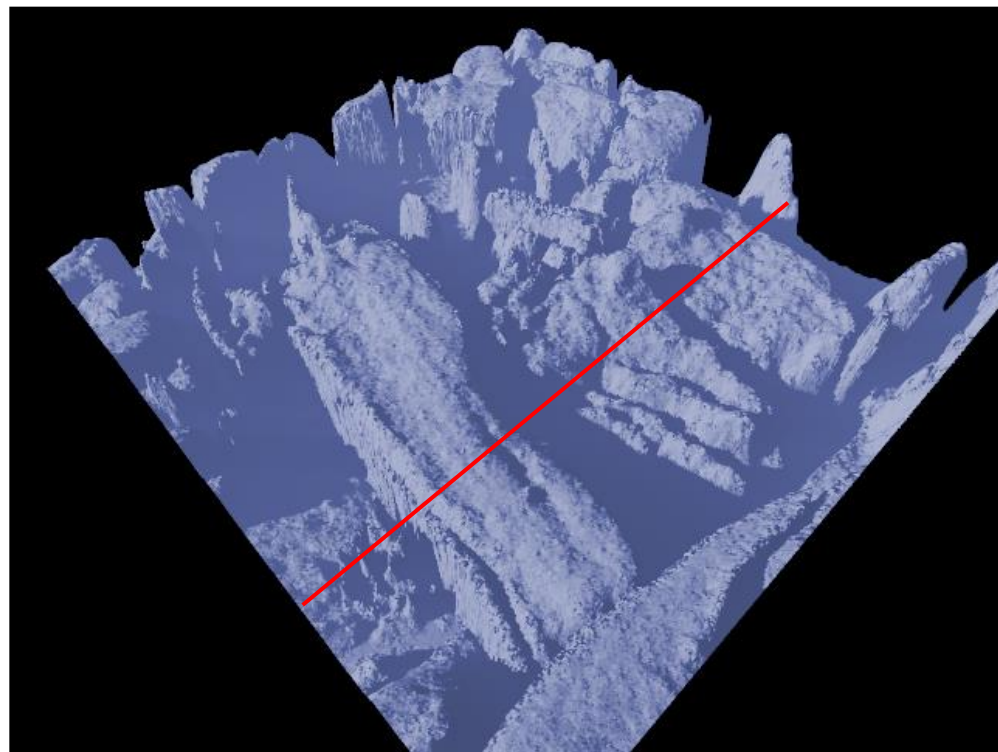
Derivate e gradiente di un'immagine

■ 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).

$$\nabla \mathbf{I}[x, y] = \left[\frac{\partial \mathbf{I}[x, y]}{\partial x}, \frac{\partial \mathbf{I}[x, y]}{\partial y} \right]$$

Derivate e gradiente di un'immagine (2)



Derivate e gradiente di un'immagine (3)

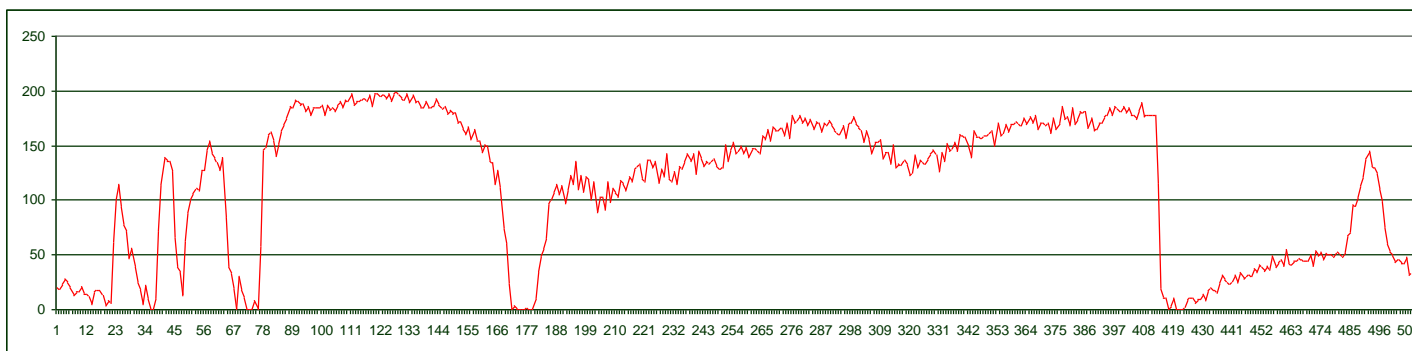
- Derivata di un'immagine in un punto

- L'immagine è un segnale discreto
- Dalla definizione di derivata come **limite del rapporto incrementale**:

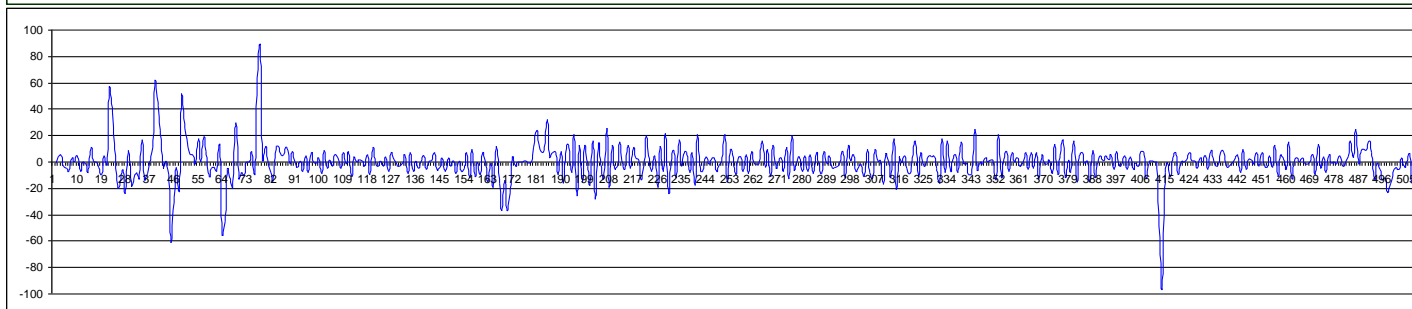
$$\frac{\partial I[x,y]}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I[x + \Delta x, y] - I[x, y]}{\Delta x} \Rightarrow I[x + 1, y] - I[x, y]$$

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

$$f(x) = I[x, 345]$$

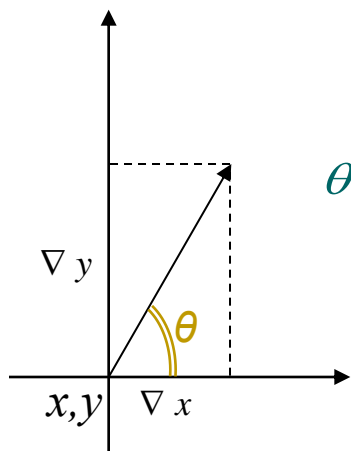


$$f(x) = \frac{\partial I[x, 345]}{\partial x}$$



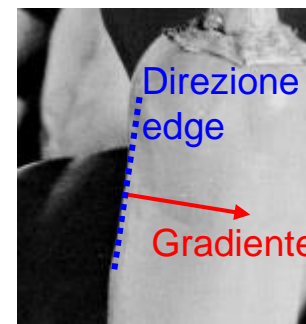
Modulo e orientazione del gradiente

- 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



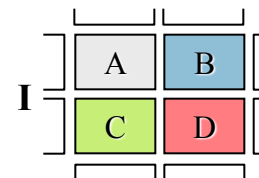
$$\theta(x, y) = \arctan_q(\nabla y, \nabla x)$$

$\arctan_q(b,a)$ restituisce l'angolo del vettore da $(0,0)$ a (a,b)
 [Math.Atan2() in C#]



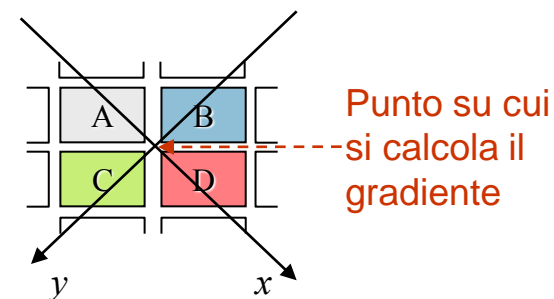
Calcolo del gradiente – Operatori di Roberts

- 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°)



$$F_x \begin{matrix} +1 & 0 \\ 0 & -1 \end{matrix} \rightarrow \nabla_x = D - A$$

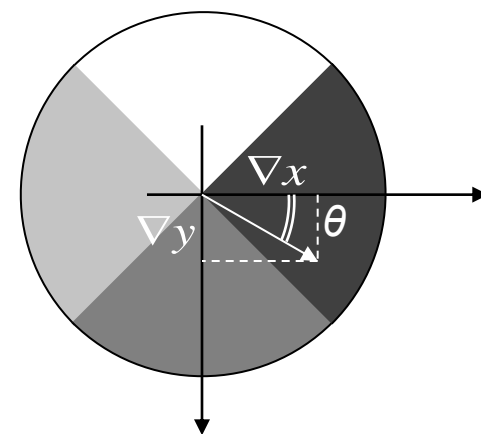
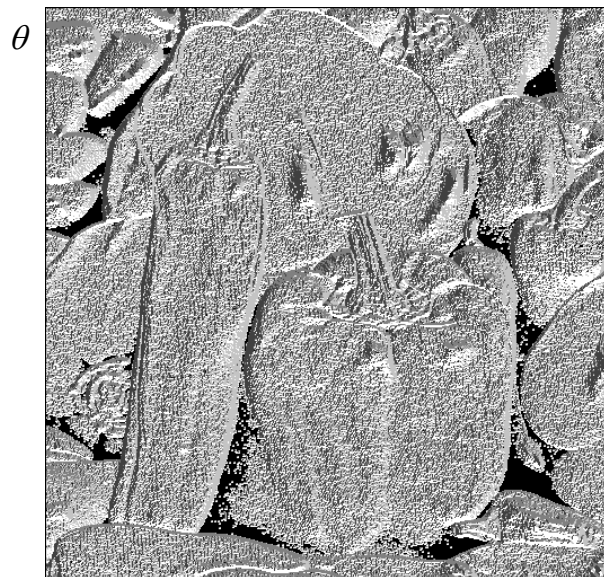
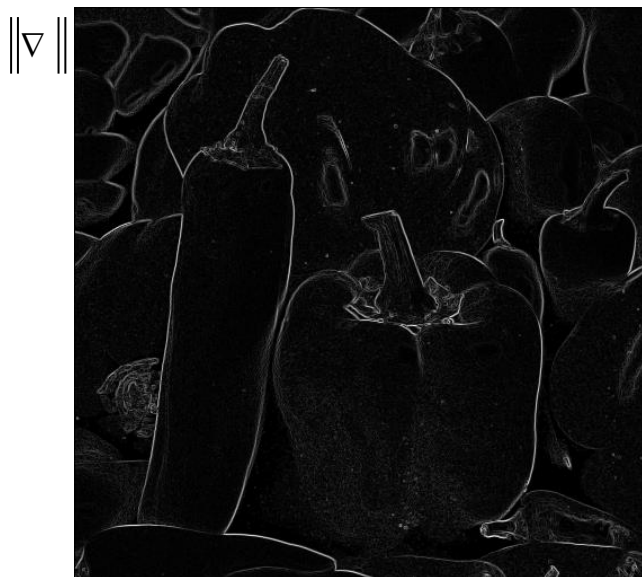
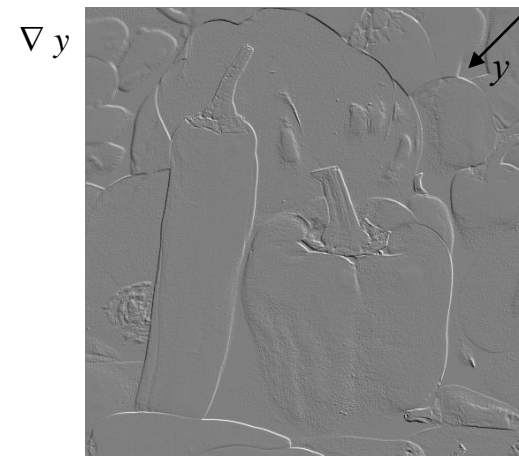
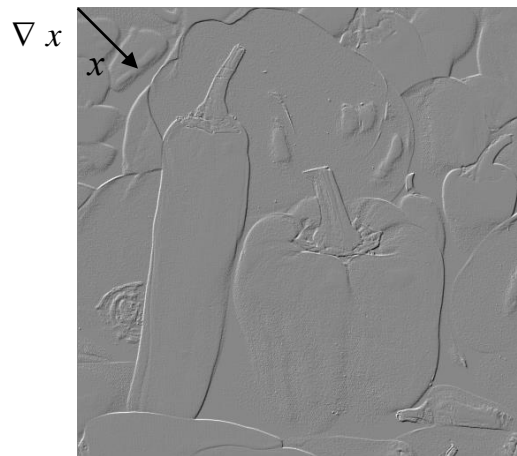
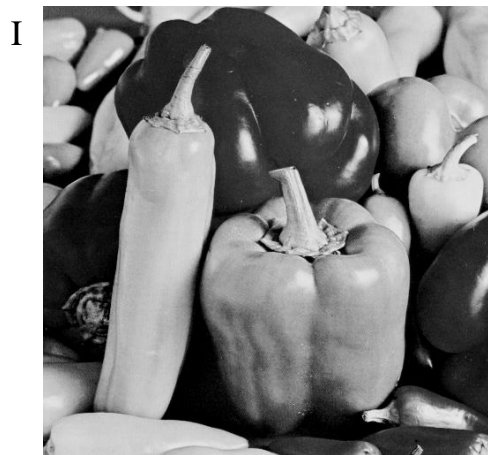
$$F_y \begin{matrix} 0 & +1 \\ -1 & 0 \end{matrix} \rightarrow \nabla_y = C - B$$



$$\|\nabla\| = \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2} \cong |\nabla_x| + |\nabla_y|$$

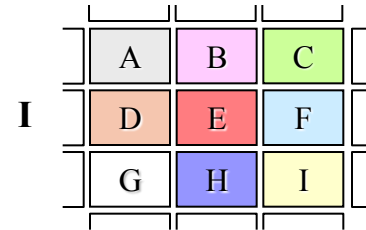
$$\theta = \arctan_q(\nabla_y, \nabla_x) + \frac{\pi}{4}$$

Operatori di Roberts – Esempi



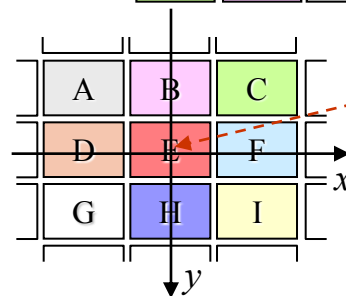
Operatori di Prewitt e di Sobel

- 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)



$$F_x = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \rightarrow \nabla_x = \frac{1}{3} [(C + F + I) - (A + D + G)]$$

$$F_y = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \rightarrow \nabla_y = \frac{1}{3} [(G + H + I) - (A + B + C)]$$



Punto su cui si calcola il gradiente

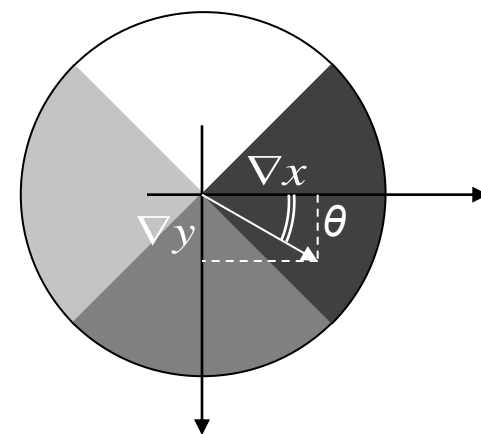
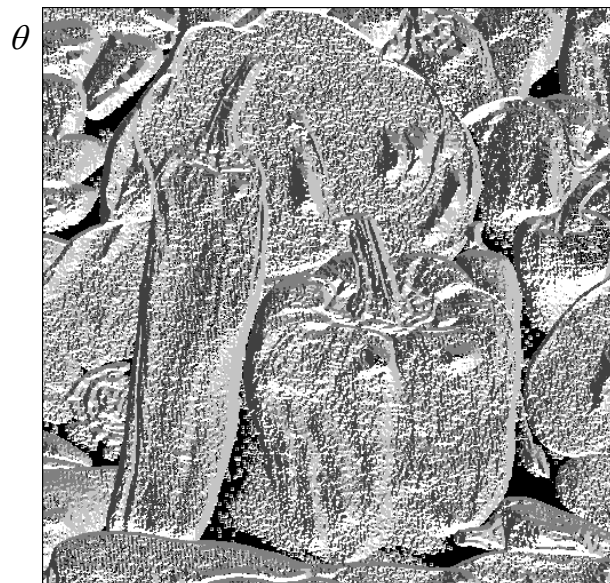
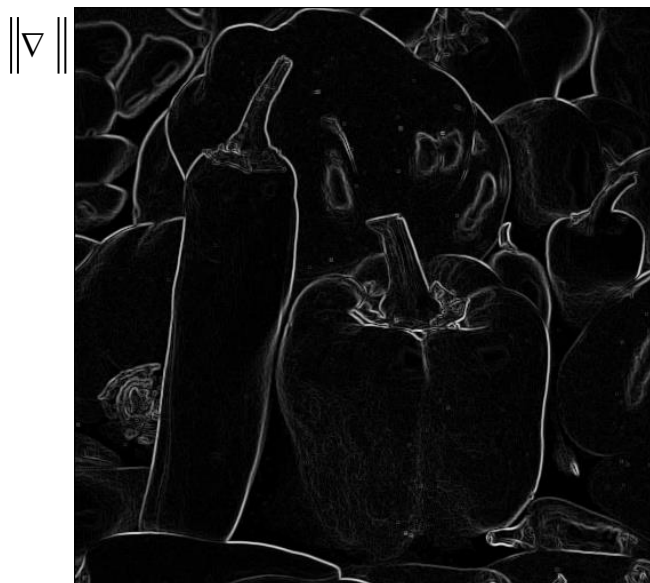
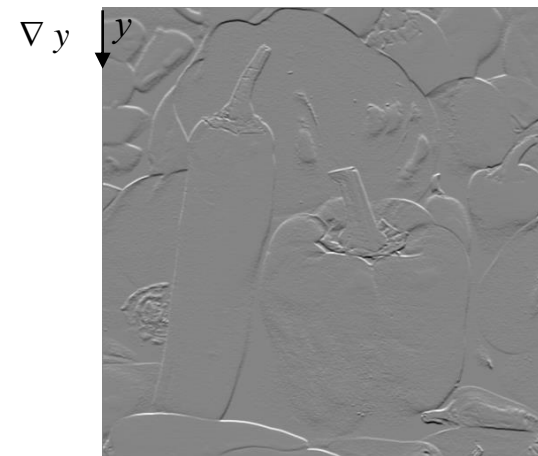
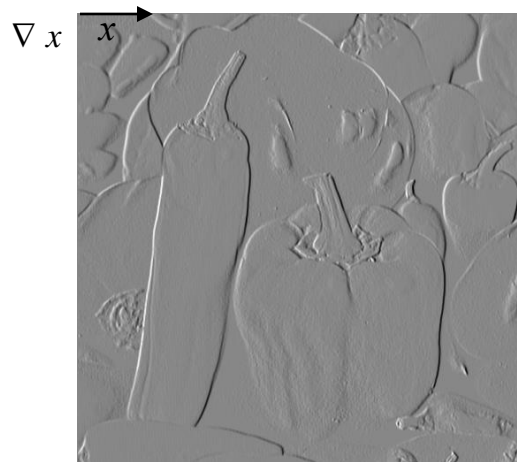
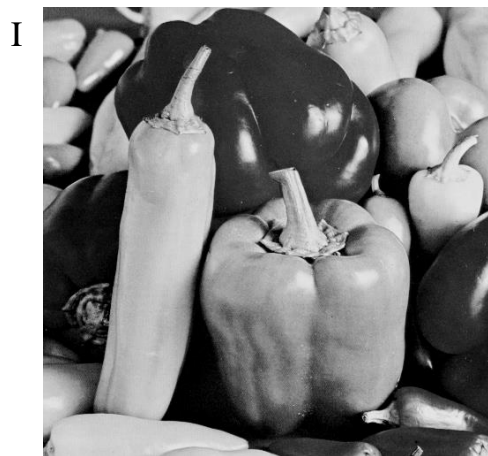
$$\|\nabla\| = \sqrt{\nabla_x^2 + \nabla_y^2}$$

$$\theta = \arctan_q(\nabla_y, \nabla_x)$$

- Sobel: due filtri 3x3
 - Peso maggiore al pixel centrale

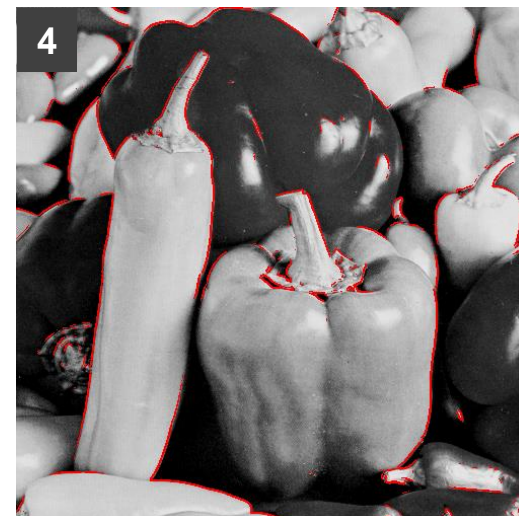
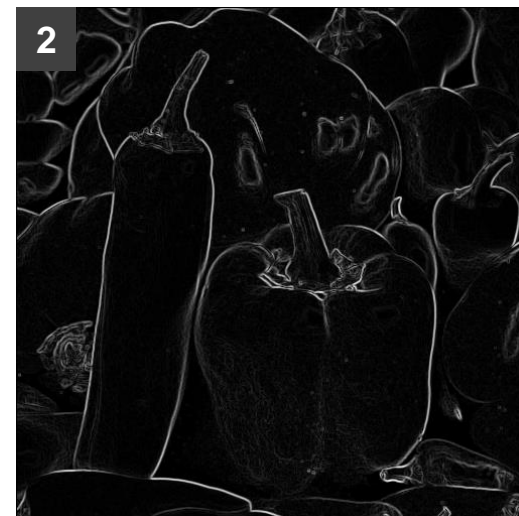
$$F_x = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad F_y = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Operatori di Prewitt - Esempio



Esempio di estrazione dei contorni

1. Immagine originale
 2. Calcolo del modulo del gradiente con gli operatori di Sobel
 3. Binarizzazione con soglia determinata sperimentalmente
 4. 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



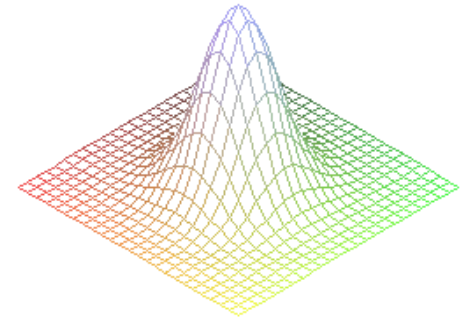
Canny edge detector

- 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:
 - 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 $(1/\sqrt{\dots})$ può essere trascurato, in quanto dopo il calcolo è comunque necessario normalizzare gli elementi rispetto alla somma dei pesi
 - Esempio ($\sigma=1$) di una possibile soluzione:

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

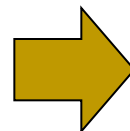


$$G_{1D}(t, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)$$

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

0.135	0.607	1	0.607	0.135
-------	-------	---	-------	-------

 Filtro 1D (ignorando termine moltiplicativo)



$\frac{1}{17} \cdot$

1	4	7	4	1
---	---	---	---	---

 Approssimazione intera e normalizzazione

Canny – 1) Smoothing Gaussiano – Esempi



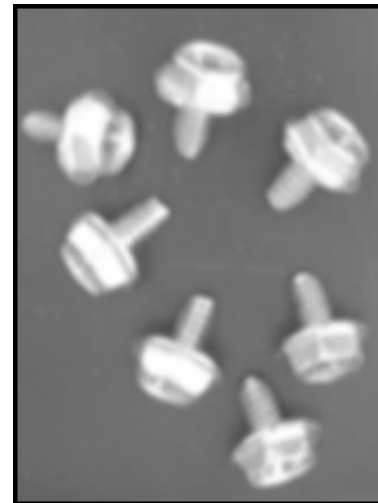
$\sigma = 2$, Filtro 5x5



$\sigma = 4$, Filtro 9x9

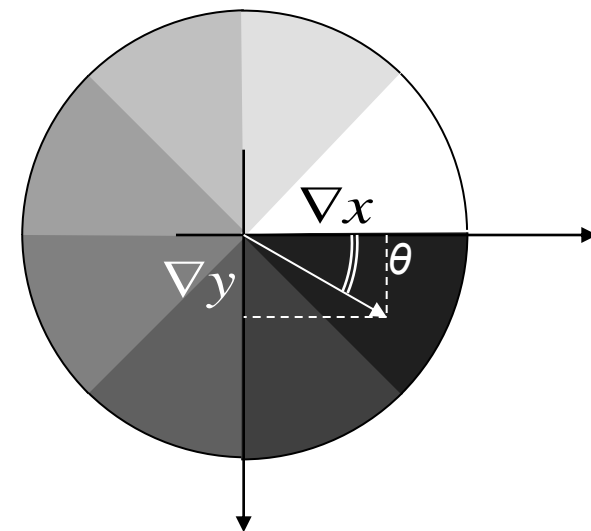
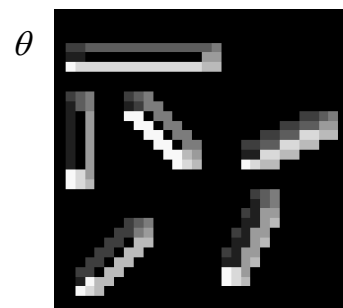
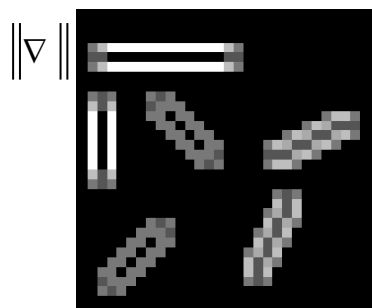
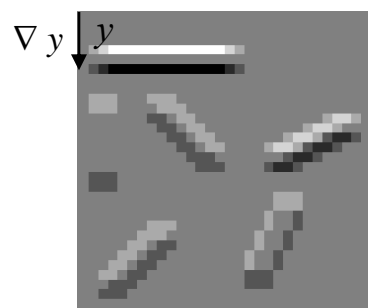
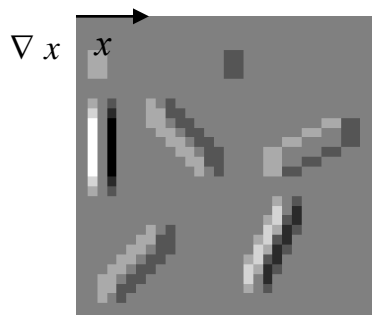
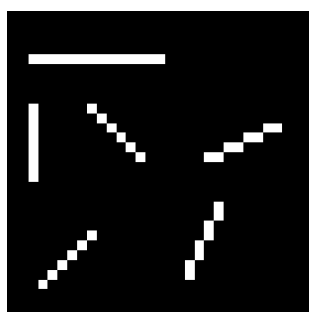


$\sigma = 5$, Filtro 15x15



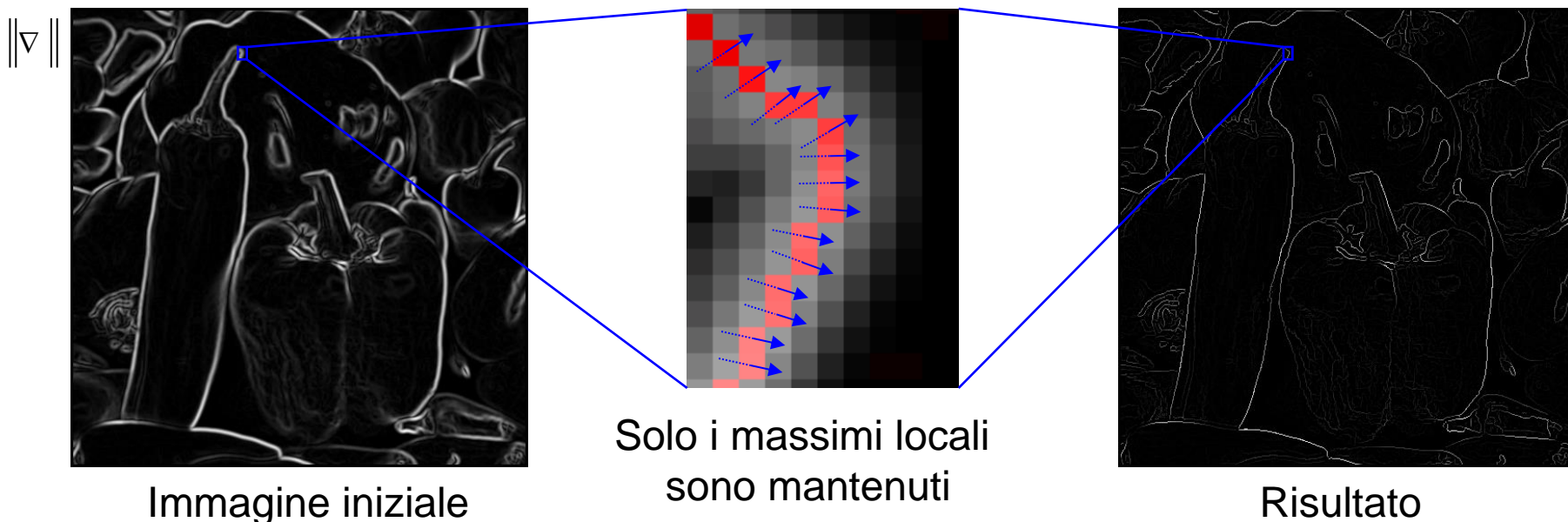
Canny – 2) Calcolo del gradiente

- 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

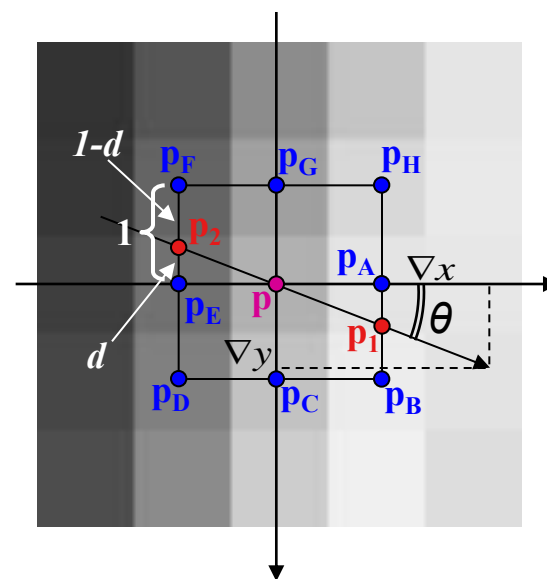
- Obiettivo
 - Eliminare dall'immagine modulo-gradiente i pixel che non sono massimi locali rispetto all'orientazione del gradiente
- Diversi approcci possibili
 - Il più semplice consiste nell'analizzare l'intorno 3x3 di ogni pixel, eliminando i pixel che non rispettano la condizione di massimo locale 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 \mathbf{p}_1 e \mathbf{p}_2 mediante **interpolazione lineare**
 - La figura mostra l'interpolazione nel caso l'orientazione del gradiente appartenga al primo ottante; gli altri casi sono analoghi
 - Il pixel \mathbf{p} viene conservato solo se

$$\|\nabla[\mathbf{p}]\| \geq \|\nabla[\mathbf{p}_1]\| \wedge \|\nabla[\mathbf{p}]\| \geq \|\nabla[\mathbf{p}_2]\|$$
 - 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



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

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

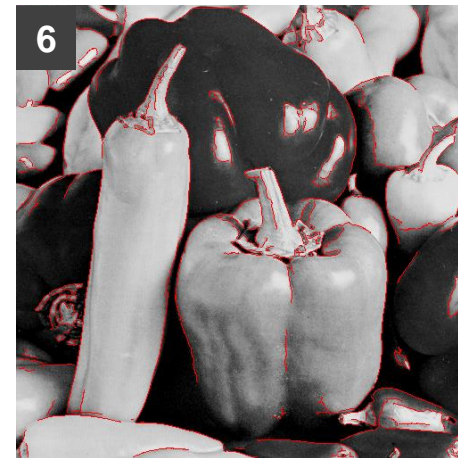
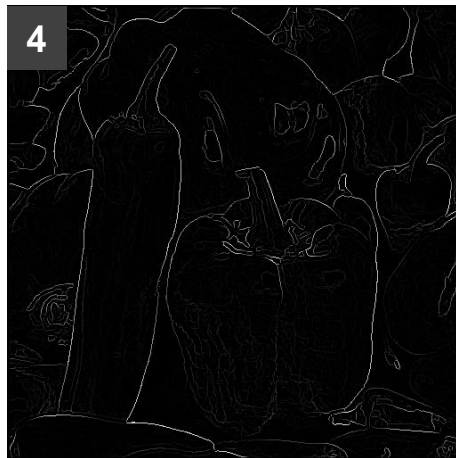
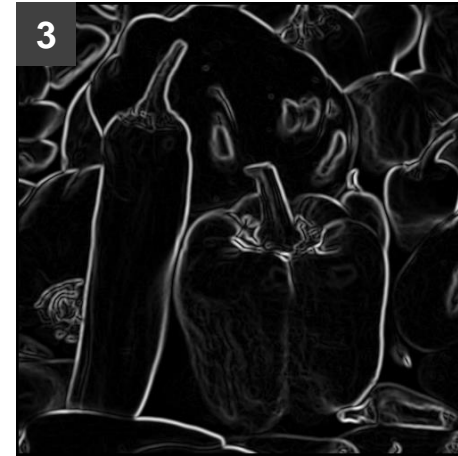
$$d = \frac{\nabla y[\mathbf{p}]}{\nabla x[\mathbf{p}]}$$

Canny – 4) Selezione finale degli edge

■ Isteresi

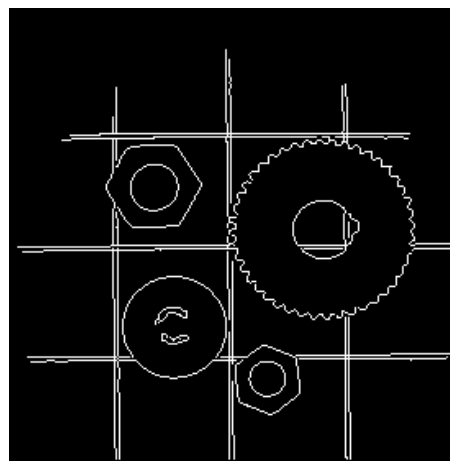
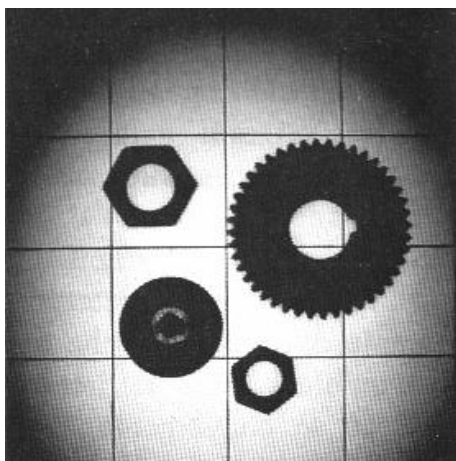
- Al fine di selezionare solo gli **edge significativi** (tralasciando edge “spuri”), ma **evitando** allo stesso tempo la **frammentazione**, si utilizza il concetto di **isteresi**: vengono impiegate **due soglie T_1 e T_2** , con $T_1 > T_2$ per scremare ulteriormente i massimi locali ottenuti nella fase precedente:
 - Sono inizialmente considerati validi solo i pixel in cui il modulo del gradiente è superiore a T_1 .
 - I pixel il cui modulo è inferiore a T_1 ma superiore a T_2 sono considerati validi **solo se adiacenti** a pixel validi.
- T_1 e T_2 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 T_1 e T_2 , 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

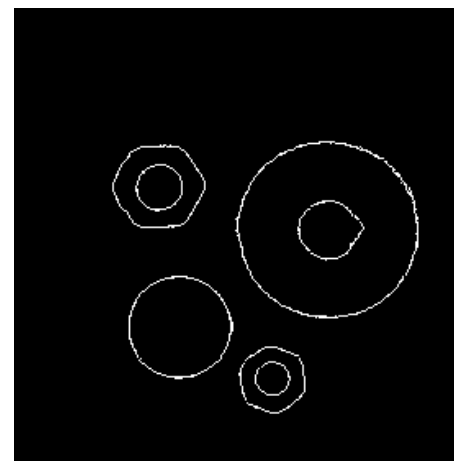


- 1) Immagine originale – 2) Smoothing gaussiano – 3) Modulo del gradiente
4) Soppressione non-massimi – 5) Selezione edge – 6) Edge sovrapposti a immagine originale

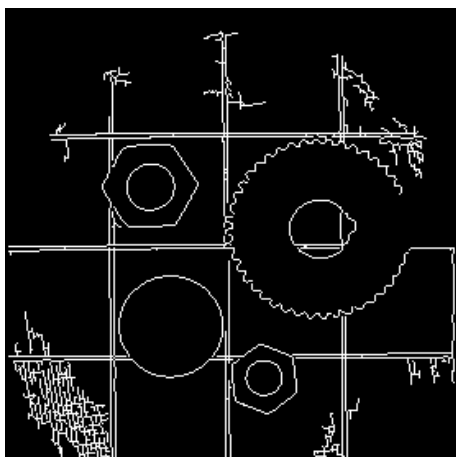
Canny edge detector – Esempi (2)



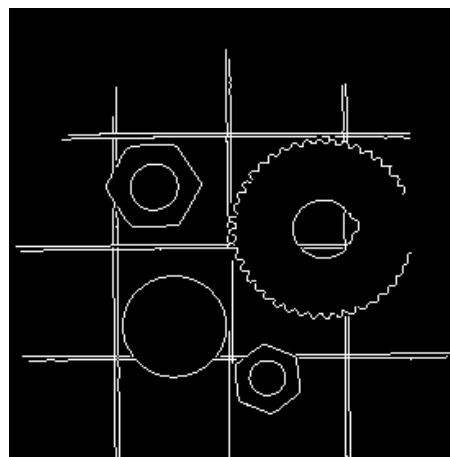
$\sigma=1$ $F:3 \times 3$ $T_1=0.4$ $T_2=0.15$



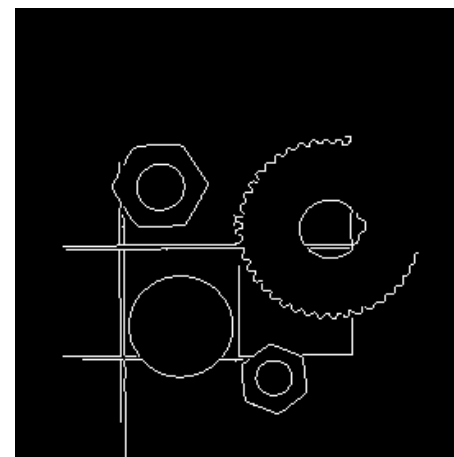
$\sigma=3$ $F:15 \times 15$ $T_1=0.4$ $T_2=0.15$



$\sigma=1$ $F:3 \times 3$ $T_1=0.8$ $T_2=0.05$



$\sigma=1$ $F:3 \times 3$ $T_1=0.8$ $T_2=0.15$

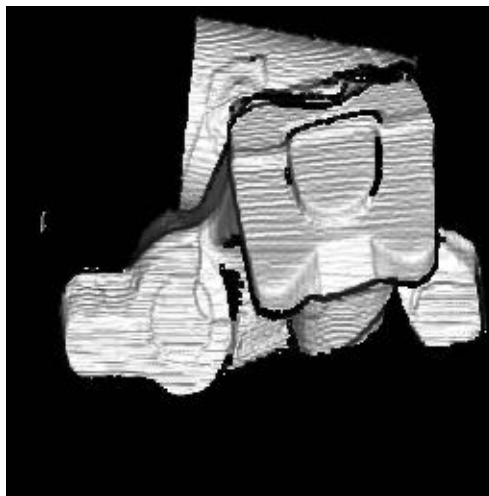


$\sigma=1$ $F:3 \times 3$ $T_1=0.8$ $T_2=0.4$

Canny edge detector – Esempi (3)



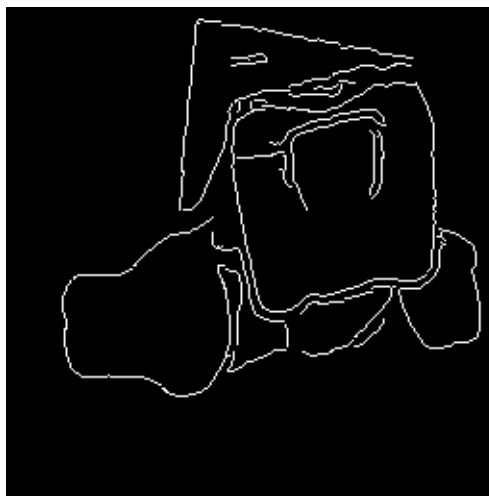
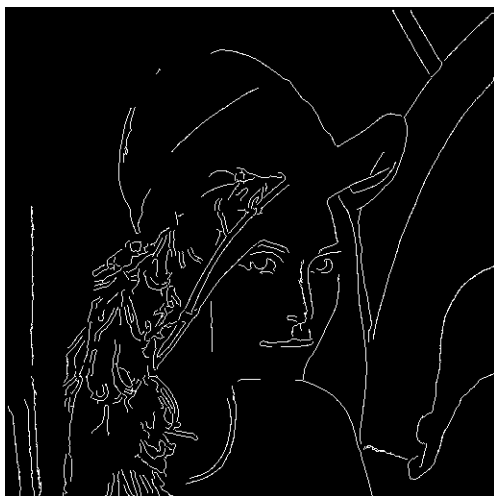
$\sigma=2$ F:5x5 $T_1=0.3$ $T_2=0.15$



$\sigma=2$ F:5x5 $T_1=0.4$ $T_2=0.2$



$\sigma=1$ F:3x3 $T_1=0.3$ $T_2=0.15$



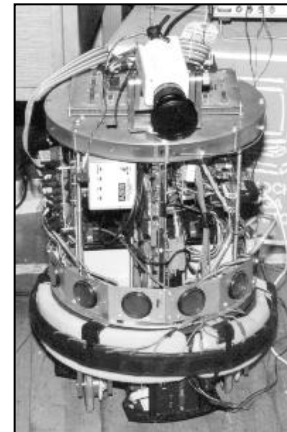
Segmentazione

■ 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



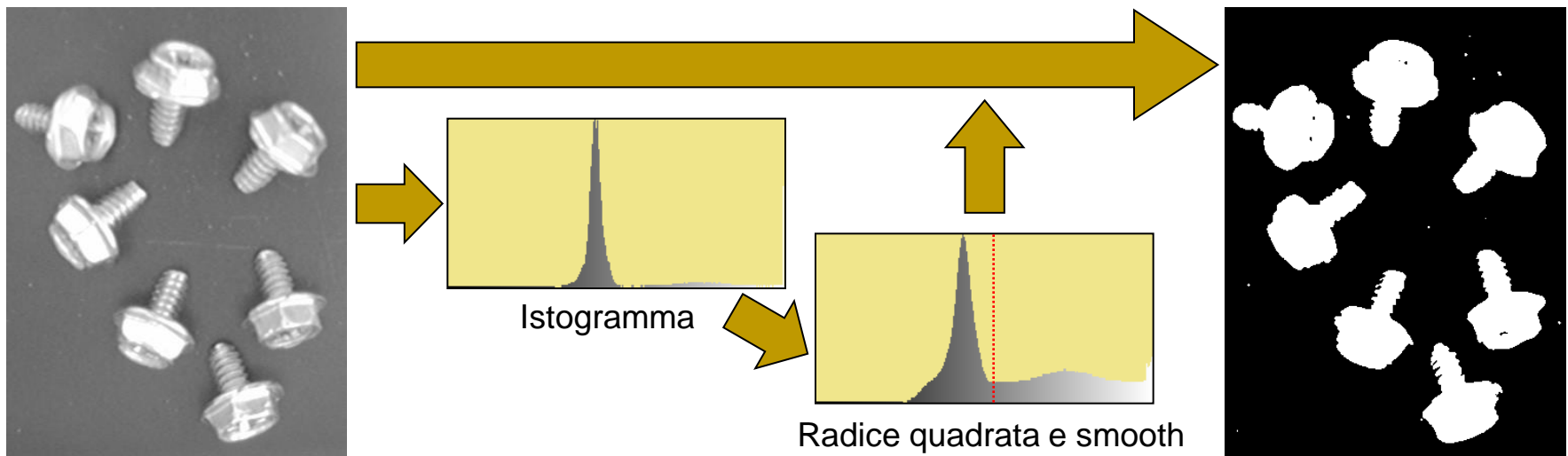
Caso Semplice



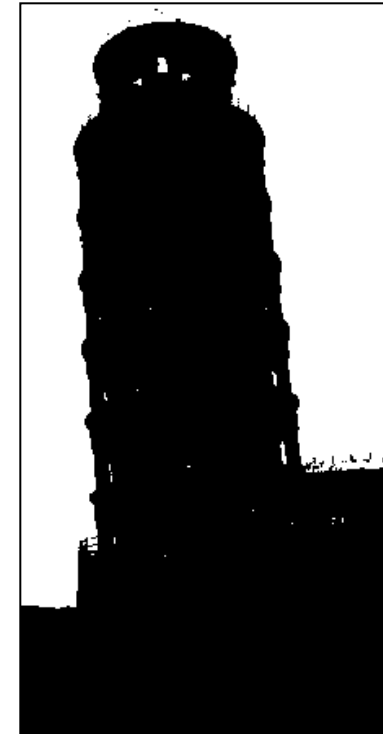
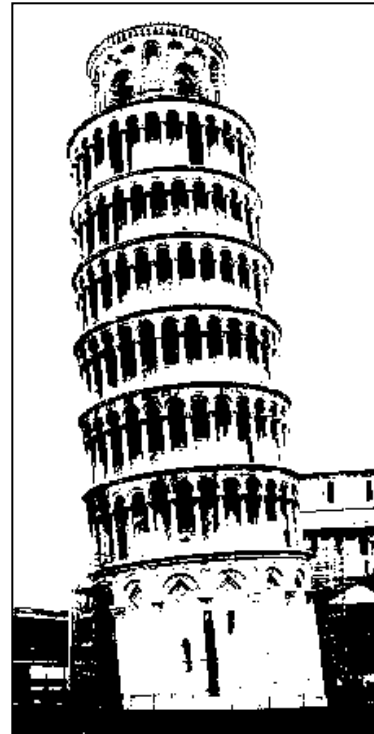
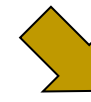
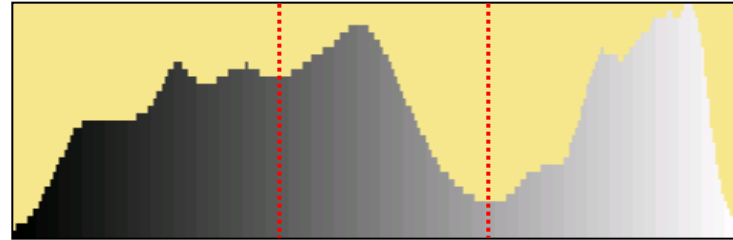
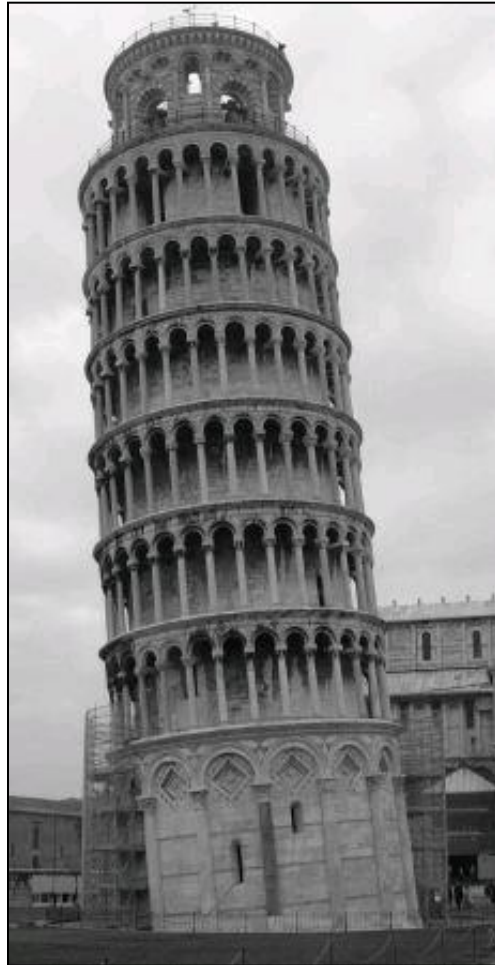
Caso complesso

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.

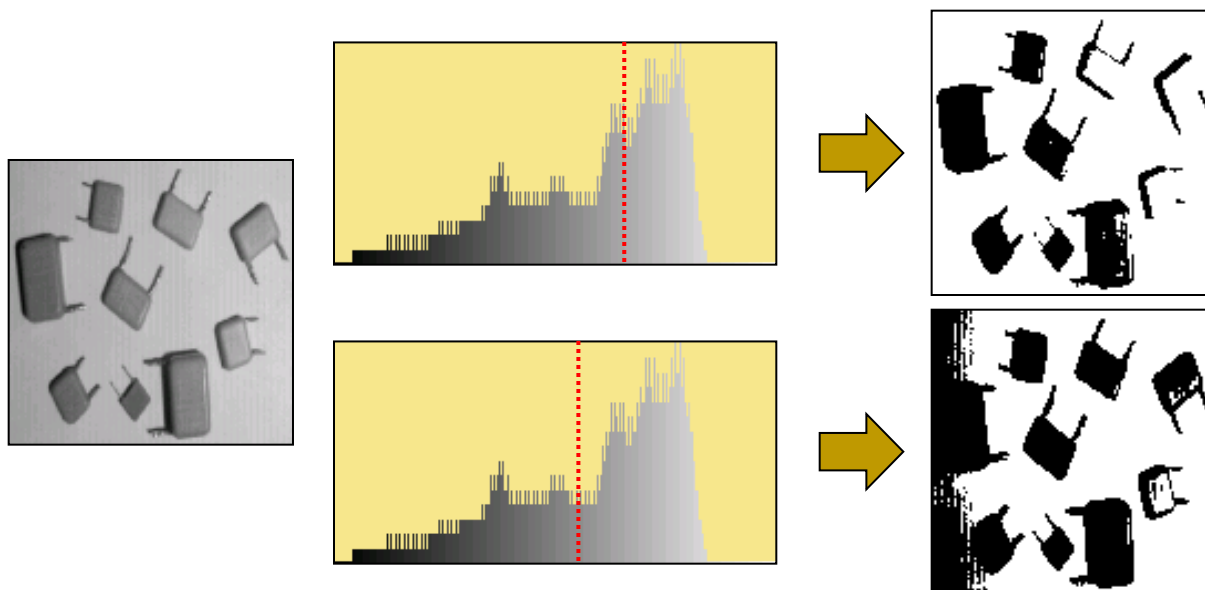


Binarizzazione e istogramma – Esempio



Segmentazione: binarizzazione con soglia locale

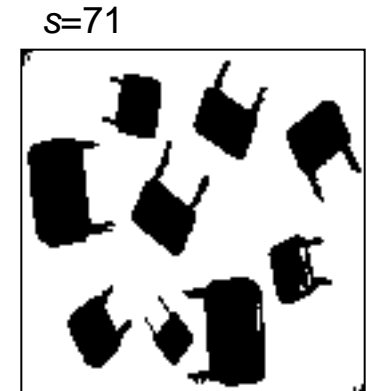
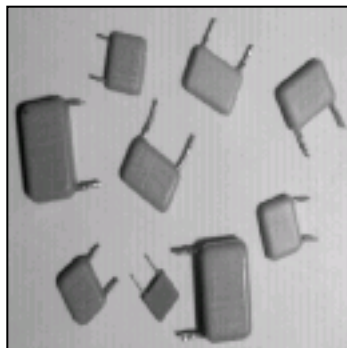
- Problemi con la soglia globale
 - Quando oggetti e sfondo non sono uniformi, la scelta della soglia globale è un'operazione molto critica
 - Ad esempio, se lo sfondo presenta un gradiente di illuminazione (ossia la luminosità varia gradualmente da una zona all'altra dell'immagine), l'approccio non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



- Una possibile soluzione: utilizzare soglie locali

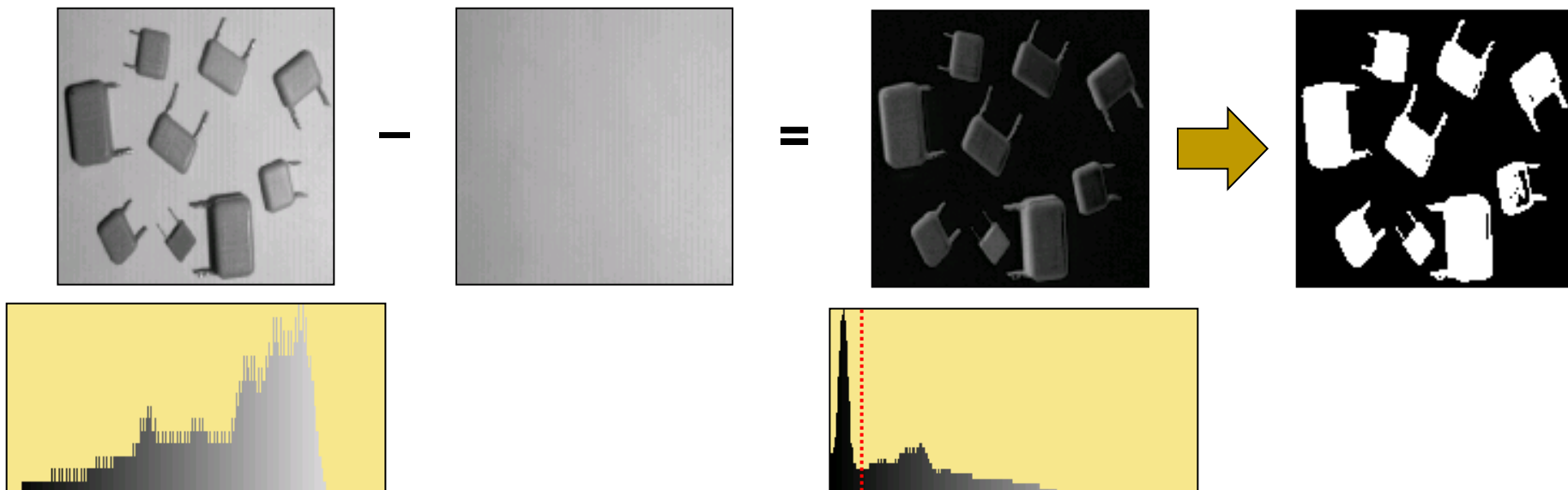
Binarizzazione con soglia locale

- 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
 - ...



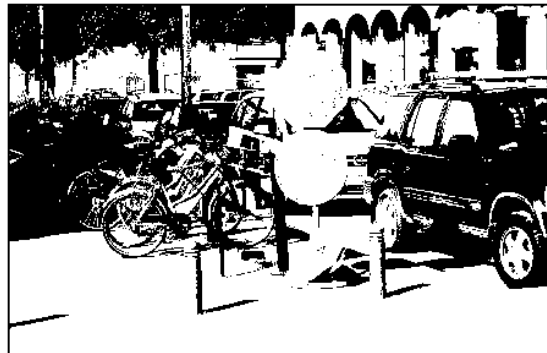
Segmentazione: sottrazione dello sfondo

- 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