

# INF2310 – Digital bildebehandling

## FORELESNING 7

### FILTRERING I BILDEDOMENET – II

Andreas Kleppe

Høypassfiltrering: Bildeforbedring og kantdeteksjon  
Gradient-operatorer  
Laplace-operatoren og LoG-operatoren  
Cannys kantdetektor

G&W: 3.6 og 10.2-10.2.6

# Høypassfiltre

- Slipper gjennom høye frekvenser, og demper eller fjerner lave frekvenser.
  - Typisk fjernes den aller laveste frekvensen helt, d.v.s. at homogene områder får ut-verdi 0.
- Effekt:
  - Demper langsomme variasjoner, f.eks. bakgrunn.
  - Fremhever skarpe kanter, linjer og detaljer.
- Typiske mål: «Forbedre» skarpheten, detektere kanter.
- Q: Hva skjer med støy?

## Høypassfiltrering med konvolusjon

- Summen av vektene i konvolusjonsfilteret er typisk 0.
  - Q: Hvorfor er dette lurt når vi skal høypassfiltrere?
- Da blir også summen av ut-bildets pikselverdier bli 0.
  - Antar nullutvidelse og bruker alle posisjoner med overlapp.
- => Positive og negative pikselverdier til ut-bildet.
- Ikke alltid en god ide å bruke  $|g(x,y)|$ .
- For framvisning: Gjør  $g(x,y)$  positiv ved å addere med en konstant og skaler resultatet til ønsket intervall.

## Høypassfiltrering med konvolusjon (kursorisk)

- Når summen av vektene i konvolusjonsfilteret er 0, så blir også summen av ut-bildets pikselverdier 0.
  - Antar nullutvidelse og bruker alle posisjoner med overlapp.

$$\begin{aligned} \sum_{x=-a}^{M-1+a} \sum_{y=-b}^{N-1+b} (h * f)(x, y) &= \sum_{s=-at=-b}^a \sum_{x=-a}^b \sum_{y=-b}^{M-1+a} \sum_{y=-b}^{N-1+b} h(s, t) f(x-s, y-t) \\ &\stackrel{\text{antar nullutvidelse}}{=} \sum_{s=-at=-b}^a \sum_{x=s}^b \sum_{y=t}^{M-1+s} \sum_{y=t}^{N-1+t} h(s, t) f(x-s, y-t) \\ &= \sum_{s=-at=-b}^a \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} h(s, t) f(m, n) \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left( f(m, n) \sum_{s=-at=-b}^a \sum_{t=-b}^b h(s, t) \right) = 0 \end{aligned}$$

## Punkt-deteksjon

- Eksempel på et høypassfilter; Konvolusjonsfilteret: 
$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$
- Dette filteret kan bl.a. brukes til deteksjon av isolerte punkter:
  - Beregn konvolusjonen av filteret, betegnet  $h$ ,  $g(x, y) = \sum_{s=x-1}^{x+1} \sum_{t=y-1}^{y+1} h(x-s, y-t)f(s, t)$  og inn-bildet  $f$ :
  - Isolerte punkter vil skille seg ut med høy respons (i absoluttverdi).
  - For passende terskel  $T > 0$  er de detektert punktene:  $|g(x, y)| \geq T$
- Hva er responsen i homogene områder?
- Hva med en hellende gråtone-flate?

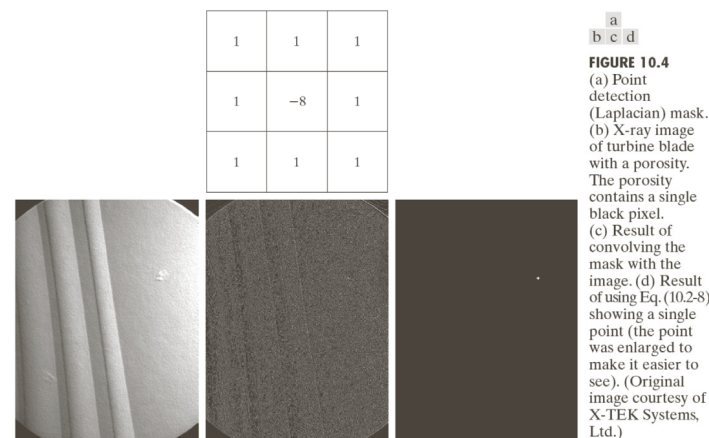
F7 05.03.13

INF2310

5

## Eksempel: Punkt-deteksjon

- Oppgave:** Deteksjon av pore i turbinblad.



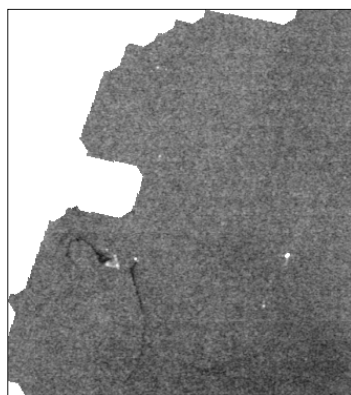
F7 05.03.13

INF2310

6

## Eksempel: Punkt-deteksjon

- Oppgave:** Deteksjon av skip i radar-bilde over sjø.



- De små lyse punktene er skipene.
- Filteret  $\longrightarrow$   $\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$  vil gi flere høye responser for hvert skip.
  - Og nesten like høy respons i kanter og spesielt hjørner.
- Bedre å bruke et større filter av samme «type»:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & 4 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & 8 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & 4 & 4 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

F7 05.03.13

INF2310

7

## Bildeforbedring ved høypassfiltrering

- Konvolusjonsfilteret  $\longrightarrow$   $\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$  kan også brukes til bildeforbedring.
- Grunntanke:
  - Filtreringen detekterer starten og slutten av kanter.
  - Andre områder blir omtrent 0.
  - Derfor: Ved å **addere filtreringen til originalen** får vi sterkere kanter  $\rightarrow$  bildet virker skarpere.

F7 05.03.13

INF2310

8

## Eksempel: Bildeforbedring ved høypassfiltrering

- **Oppgave:**  
Øk skarpheten i følgende bilde av Nordpolen:



F7 05.03.13

- **Løsning:**

1. Filtrer med
2. Summer filtreringen og originalen.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

G&W fig. 3.38:

←(a) Original  
(e) Resultat →



INF2310

9

## Bildeforbedring ved høypassfiltrering

- Konvolusjonsfilteret vi har sett på kan uttrykkes slik:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

høypass = original - lavpass

Husk:  
Konvolusjon er distributiv:  
 $f^*(g+h) = (f^*g) + (f^*h)$

- Bildeforbedringen vil har sett på tilsvarer altså:

1. Lavpassfiltrer med 3x3-middelverdifilter.
2. Subtraher resultatet fra originalen.
3. Adder 9\*differansen til originalen.

Husk: Konvolusjon er assosiativ ved skalar multiplikasjon:  
 $a(f^*g) = f^*(ag)$

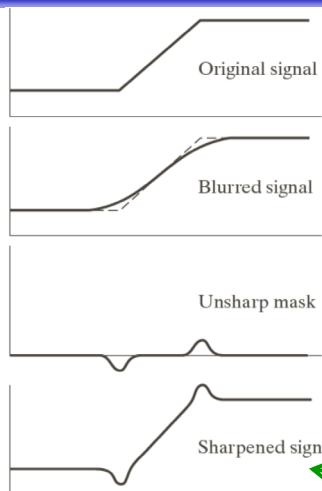
- Dette er én form for **highboost-filtrering**.

F7 05.03.13

INF2310

10

## Unsharp masking og highboost-filtrering



G&W fig. 3.39

F7 05.03.13

- Gitt et bilde (original):  
(til venstre: et 1D-bilde av en rampe)

1. Lavpassfiltrer.  
(til høyre er originalen stiplet)

2. Beregn differansen:  
*original - filtrering*

3. Resultatet er:  
*original + k • differansen*
  - $k$  er en positiv konstant.
  - **Unsharp masking:**  $k = 1$  (brukt til høyre)
  - **Highboost-filtrering:**  $k > 1$

INF2310

11

## Eksempel: Unsharp masking

1. Lavpassfiltrering => uskarpt bilde.  
- Bruk f.eks. et middelverdifilter.
2. Subtraher uskarpt bilde fra originalen.  
- Original - Lavpass = Høypass
3. Adder differansen til originalen.  
- Forsterker kanter, resultatet er skarpere enn originalen.



F7 05.03.13


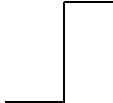
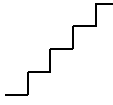

INF2310

12

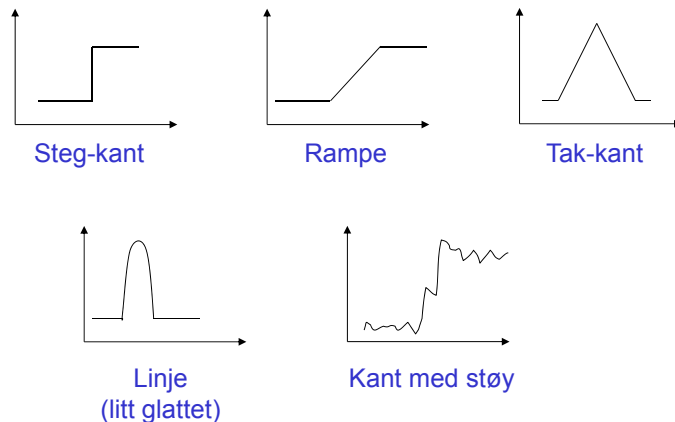
## Motivasjon for kant-deteksjon

- Det meste av **informasjonen** i et bilde finnes ved **kantene** til objektene/regionene i bildet.
  - Med «kanter» menes her intensitets-kanter, farge-kanter, tekstur-kanter o.s.v.
- Biologiske visuelle systemer er basert på kant-deteksjon.
- Slike systemer arbeider ofte både parallelt og sekvensielt:
  - Alle lokale omgivelser behandles uavhengig av hverandre.
  - Lokale resultat kan være avhengig av tidligere resultater.

## Intensitets-flater, -kanter og -linjer

- **Homogen flate:** Et område der alle pikselverdiene er like. 
- **Kant:** Overgangen mellom to områder med forskjellig middelvei.
  - **Steg-kant:** En-piksels overgang. 
  - **Rampe:** Fler-piksels overgang med konstant intensitetsendring (d.v.s. konstant gradient). 
- «Kant» brukes også om skillepunktet mellom de to områdene.
  - Forskjellige måter å modellere hvor skiller er.
  - For steg-kanter:
    - Et alternativ er midt mellom nabo-piksler som tilhører forskjellig områder.
    - I segmentering ønsker man typisk å finne første piksel på siden som tilhører objektet.
- Merk at en **linje** består av **to** kanter. 
- Idealstrukturer er nyttig for modellering, men i praksis finner vi oftest strukturer som bare ligner.
  - Hver kan f.eks. være steg-kant eller rampe.

## Kant-typer



## Digital derivasjon

- En kant kjennetegnes ved **endring i intensitetsverdi**.
  - Siden en intensitetskant er overgangen mellom to områder med forskjellig middelvei, så må intensiteten endres i kanten.
- Den **deriverte** av en funksjon  $f(x)$  er definert som:
 
$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$
 og angir stigningstallet til  $f$  i punktet  $x$ , så  $|f'(x)|$  angir hvor mye  $f$  endrer seg i punktet  $x$ .
- Den deriverte er **ikke definert** for diskrete funksjoner, men vi kan **tilnærme** den ved å la  $h \geq 1$  i definisjonen.
  - Tilnærme v.b.a. **differanser mellom nærliggende piksler**.

## Derivasjon av bilder

- Et digitalt bilde er en to-variabel, diskret funksjon.
- En kontinuerlig funksjon  $f(x, y)$  kan deriveres m.h.p.  $x$  og  $y$ .
  - Kalles å partiell-derivere m.h.p.  $x$  og  $y$ .
  - Betegnes henholdsvis  $\partial f(x, y) / \partial x$  og  $\partial f(x, y) / \partial y$
- Vektoren av de to partiell-deriverte kalles **gradienten** og betegnes  $\nabla f$ :

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$$

F7 05.03.13

INF2310

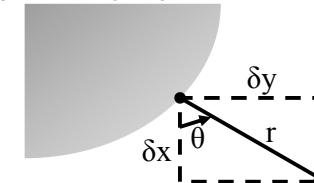
17

## Gradient i et kontinuerlig bilde

- Gradienten peker i retningen der funksjonen øker mest:

- Den retningsderiverte til  $f$  i retning  $\theta$  (d.v.s. langs  $r$ ) er:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial r} &= \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} \\ &= \frac{\partial f}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial f}{\partial y} \sin \theta \end{aligned}$$



- Når den retningsderiverte er størst er:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\partial f}{\partial r} \right) = 0$$

- D.v.s. vinkelen  $\theta_g$  der den retningsderiverte er størst oppfyller:

$$-\frac{\partial f}{\partial x} \sin \theta_g + \frac{\partial f}{\partial y} \cos \theta_g = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial f}{\partial y} \cos \theta_g = \frac{\partial f}{\partial x} \sin \theta_g$$

F7 05.03.13

INF2310

18

## Gradient i et kontinuerlig bilde

- Gjentar: Når den retningsderiverte er størst er vinkelen  $\theta_g$ :

$$\frac{\partial f}{\partial y} \cos \theta_g = \frac{\partial f}{\partial x} \sin \theta_g \Rightarrow \frac{\sin \theta_g}{\cos \theta_g} = \frac{\partial f / \partial y}{\partial f / \partial x} \Rightarrow \tan \theta_g = \frac{g_y}{g_x}$$

- Derfor: Gradienten peker i **retningen** der funksjonen **øker mest**:

$$\theta_g = \tan^{-1} \left( \frac{g_y}{g_x} \right)$$

$\theta_g$  angir bare en linje som er parallell med gradienten, men ved å dobbeltderivere  $f$  kan man vise at funksjonen øker mest med gradientretningen og avtar mest mot gradientretning.

og økningen her, som kalles **gradient-magnituden**, er:

$$\frac{\partial f}{\partial r_g} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}$$

$\partial f / \partial r_g$  er den retningsderiverte i gradientretningen.

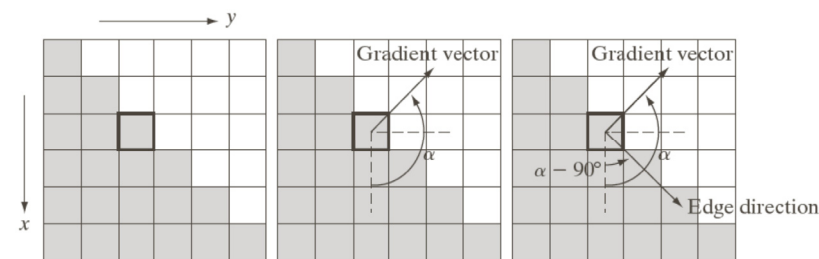
F7 05.03.13

INF2310

19

## Gradient $\perp$ Kant

- **Gradienten** peker i retningen der funksjonen **øker mest** og **kanten** går **vinkelrett på gradienten**.



a b c

**FIGURE 10.12** Using the gradient to determine edge strength and direction at a point. Note that the edge is perpendicular to the direction of the gradient vector at the point where the gradient is computed. Each square in the figure represents one pixel.

F7 05.03.13

INF2310

20

## Digitale gradient-tilnærminger

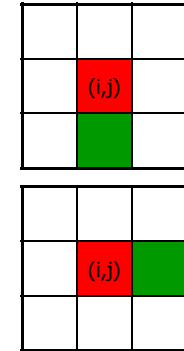
- Vi ønsker å tilnærme gradienten med **differanser mellom nærliggende piksler**.
- Til dette kan vi bruke to konvolusjonsfiltre som tilnærmer hver sin gradient-komponent.
  - To slike konvolusjonsfiltre kalles en **gradient-operator**.
  - Konvolusjonsfiltrene betegnes ofte som  $h_x$  og  $h_y$
  - F.eks.  $h_x$  tilnærmer den partiell-derivert i  $x$ -retning ved å beregne differansen i vertikal retning av nærliggende piksler.
- Mange muligheter!

## Digitale gradient-tilnærminger

- **Asymmetrisk 1D-operator:**

$$g_x(i,j) = f(i+1,j) - f(i,j)$$

$$g_y(i,j) = f(i, j+1) - f(i,j)$$
- Definisjonene er gitt slik at gradient-komponentene er positive for en kant der intensiteten øker nedover og fra venstre mot høyre i bildet.
- Problemer med denne operatoren:
  - Hver av gradient-estimatene refererer til et punkt midt mellom to piksler.
  - $x$ - og  $y$ -estimatet refererer ikke til samme punkt i bildet.



## Digitale gradient-tilnærminger

- **Symmetrisk 1D-operator:**

$$g_x(i,j) = f(i+1,j) - f(i-1,j)$$

$$g_y(i,j) = f(i,j+1) - f(i,j-1)$$
- **Gradient-estimatene refererer nå til (i,j).**
- Problem: Operatoren er veldig følsom for støy.
  - Støy kan bli detektert som kanter.
- Løsning: Gjør det samme for tre symmetriske par:
  - **Gradient-estimatene blir mer robuste mot støy i bildet.**



## Digitale gradient-tilnærminger

- Vi gjorde 1D-operatoren symmetrisk for at gradient-estimatene skal referere til samme piksel.
- En positiv bieffekt er at vi innfører en mild glatting i retningen for gradient-tilnærmingen:
 
$$[1 \ 1] * [1 \ -1] = [1 \ 0 \ -1]$$
- For å gjøre operatoren mer støy-robust innfører vi deretter en glatting vinkelrett på denne retningen.

# Gradient-operatorer

- Asymmetrisk 1D-operator:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

– Også kalt «pixel difference»-operatoren.

- Symmetrisk 1D-operator:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

– Også kalt «separated pixel difference»-operatoren.

- Roberts-operatoren (også kalt Roberts kryssgradient-operator):

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

NB: Vi angir konvolusjonsfiltre i den tanke at de skal brukes til konvolusjon.

G&W angir filtermasker som skal brukes til korrelasjon.

Filtrene vil derfor avvike med en 180 graders rotasjon.

# Gradient-operatorer

- Prewitt-operatoren:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

NB: Vi angir konvolusjonsfiltre i den tanke at de skal brukes til konvolusjon.

G&W angir filtermasker som skal brukes til korrelasjon.

Filtrene vil derfor avvike med en 180 graders rotasjon.

- Sobel-operatoren:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

- Frei-Chen-operatoren:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix} \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

## Separasjon av symmetriske gradient-operatorer

- Separasjon av Prewitt-operatoren:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} * [1 \ 1 \ 1] \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ -1] * \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Separasjon av Sobel-operatoren:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} * [1 \ 2 \ 1] \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ -1] * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Separasjon av Frei-Chen-operatoren:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} * [1 \ \sqrt{2} \ 1] \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ -1] * \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ 1 \end{bmatrix}$$

## Symmetriske gradient-operatorer

- Operatoren gjøres mindre følsom for støy ved å lavpassfiltrere i en retning og derivere i den ortogonale retningen.

– Sees tydelig fra separasjonene.

Prewitt

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

- Eksempler: Prewitt, Sobel, Frei-Chen.

Sobel

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

- Prewitt er mer følsom for horisontale og vertikale enn for diagonale kanter.

- Det motsatte er tilfelle for Sobel.

- Frei-Chen gir samme gradient-magnitudo om kanten ligger langs aksene eller diagonalt.

Frei-Chen

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

# Gradient-beregning

- Vi finner de vertikale kantene:
  - Beregn:  $g_x(i,j) = h_x * f(i,j)$
- Vi finner de horisontale kantene:
  - Beregn:  $g_y(i,j) = h_y * f(i,j)$

- Beregn gradient-magnitude og -retning:

$$M(i,j) = \sqrt{g_x^2(i,j) + g_y^2(i,j)} \quad \text{Gradient-magnitude}$$

$$\theta(i,j) = \tan^{-1} \left( \frac{g_y(i,j)}{g_x(i,j)} \right) \quad \text{Gradient-retning}$$

## Eksempel: Gradient-beregning med Sobel-operatoren

Inn-bilde f

$g_x = f * h_x$

$g_x^2$

$g_y = f * h_y$

$g_y^2$

$(g_x^2 + g_y^2)^{1/2}$

Merk: Hvert bilde er skalert ved å dele på sitt maksimum. De negative verdiene i  $g_x$  og  $g_y$  er satt til 0.

F7 05.03.13

INF2310

30

# Større gradient-operatorer

- De symmetriske gradient-operatorene kan gjøres mer støy-robuste ved å bygge inn mer lavpassfiltrering.
- Eksempel: Følgende 5x5-Sobel-operator:

$$h_x(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 2 & 8 & 12 & 8 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -8 & -12 & -8 & -2 \\ -1 & -4 & -6 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad h_y(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \\ 4 & 8 & 0 & -8 & -4 \\ 6 & 12 & 0 & -12 & -6 \\ 4 & 8 & 0 & -8 & -4 \\ 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

er resultatet av konvolusjonene:

$$h_x(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad h_y(i,j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

## Implementasjoner av gradient-operatorer

- Som vanlig lurt å utnytte separabilitet.
- For 5x5-Sobel-operatoren på forrige foil:
  - Med 5x5-filtrene kreves 50 multiplikasjoner.
  - Ved bruk av de fire 3x3-filtrene kreves 36 multiplikasjoner.
  - Finnes mange måter man dele opp på, men det raskeste blir å separere 5x5-filtrene direkte:

$$h_x(i,j) = [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1] * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ -2 \\ -1 \end{bmatrix} \quad h_y(i,j) = [1 \ 2 \ 0 \ -2 \ -1] * \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \\ 6 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Disse krever bare 20 multiplikasjoner.



# Gradient til kant-deteksjon

- Gradient-magnituden indikerer **styrken av kanten** i et piksel.
- Kantene i gradient-magnituden blir typisk brede / tykke.
  - Kan være uønsket.
  - Bredden avhenger av størrelsen på filtrene og bredden på kanten i bildet.
- Mulige fremgangsmåter for å finne eksakt, tynn kant:
  - Terske grad.mag. og tynne.
  - Finne maksimum i grad.mag. / bruke den andrederiverte.



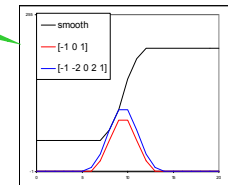
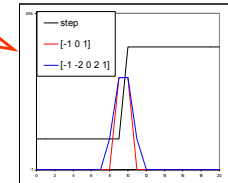
F7 05.03.13

INF2310

33

# Gradient til kant-deteksjon

- Gradient-magnituden har «bred respons», men vi ønsker eksakt, tynn kant.
- For en steg-kant:
  - Bredden på responsen er avhengig av størrelsen på filteret.
- For en bred kant (glattet med [1 2 3 2 1]):
  - Bredden på responsen er avhengig av bredden på kanten.
- **Maksimumet er likt og fornuftig lokalisert!**
  - Bruke den andrederiverte til å finne maksimumene?



F7 05.03.13

INF2310

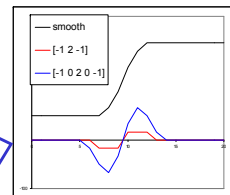
34

# Laplace-operatoren

- Laplace-operatoren er gitt ved:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

- Den endrer fortegn der  $f$  et vendepunkt.
- $\nabla^2 f = 0$  markerer kant-posisjon.
- $|\nabla^2 f|$  har to ekstremverdier per kant; på starten og på slutten av kanten.
  - Derfor brukte vi den tidligere til å forbedre bildeskarpheiten!



- Kantens eksakte posisjon er **nullgjennomgangen**.
- Dette gir tynne kanter.
- Vi finner bare kant-posisjoner, ikke kant-retninger.

F7 05.03.13

INF2310

35

# 1D-Laplace-operator

**Kontinuerlig**      **Digitalt**

$f(x)$

$f(i)$

$f'(x)$

$f(i+1)-f(i)$

$f''(x) = \nabla^2 f$

$f'(i+1)-f'(i)$   
 $= [f(i+2)-f(i+1)]$   
 $- [f(i+1)-f(i)]$   
 $= f(i+2)-2f(i+1)+f(i)$

- I 1D er  $\nabla^2 f$  ekvivalent med den andrederiverte.
- Av symmetri-hensyn sentrerer vi om  $i$ .
- Dessuten bytter vi fortegn av konvensjon.
- Altså får vi:  
 $\nabla^2 f = -f(i-1) + 2f(i) - f(i+1)$

F7 05.03.13

INF2310

36

## 2D-Laplace-operator

- Anvend 1D-Laplace-tilnærmingen i begge retninger:

$$\begin{aligned}\nabla^2 f &= \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \\ &\approx -f(i-1, j) + 2f(i, j) - f(i+1, j) \\ &\quad - f(i, j-1) + 2f(i, j) - f(i, j+1)\end{aligned}$$

- Dette kan beregnes ved å konvolvare  $f(i, j)$  med

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

## Full 3x3-Laplace-operator

- Hvis vi i tillegg anvender 1D-Laplace-tilnærmingen langs begge diagonaler, får vi det som kan beregnes med:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

- Dette konvolusjonsfilteret kjenner vi igjen.
  - Punkt-deteksjon.
  - Øke bildeskarpheiten.

## Laplace på andregradspolynom

- La de lokale intensitetene omkring  $(x, y)$  være modellert ved andregradspolynomet  $((m, n)$  er koordinater relativt til  $(x, y)$ ):  
 $f(m, n) = k_1 + k_2 m + k_3 n + k_4 m^2 + k_5 mn + k_6 n^2$

- I et 3x3-naboskap rundt  $(x, y)$  har vi da intensitetene:

$k_1 - k_2 - k_3 + k_4 + k_5 + k_6$	$k_1 - k_3 + k_6$	$k_1 + k_2 - k_3 + k_4 - k_5 + k_6$
$k_1 - k_2 + k_4$	$k_1$	$k_1 + k_2 + k_4$
$k_1 - k_2 + k_3 + k_4 - k_5 + k_6$	$k_1 + k_3 + k_6$	$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6$

- Den korrekte Laplace-verdien er gitt ved:

$$-\nabla^2 f(x, y) = -\left(\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2}\right) = -2(k_4 + k_6)$$

- Både 4-nabo- og 8-nabo-Laplace-operatoren (høyre) gir korrekt estimat!

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

## Sobel vs Laplace



Sobel-filtrering  
=> bred kant



Laplace-filtrering  
=> dobbelt-kant

## Steg-kanter og steg-kantede linjer

- Merk:

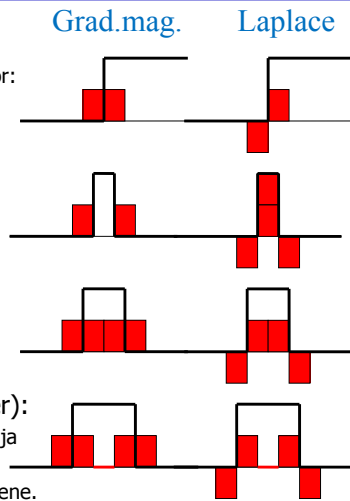
- «Grad.mag.» bruker symmetrisk 1D-operator:  
 $f(i+1) - f(i-1)$
- «Laplace» er 1D-Laplace-operatoren:  
 $-f(i-1) + 2f(i) - f(i+1)$

- For steg-kanter:

- Gradientmagnituden gir samme respons i første piksel utenfor og første piksel innenfor kanten.
- Laplace gir responser med motsatt fortegn, og riktig kant i nullgjennomgang.

- På tvers av en linje (med to steg-kanter):

- 1-pikselns linje gir respons på hver side av linja med gradientmagnituden – ingen respons i.
- Laplace gir riktige kanter i nullgjennomgangene.



F7 05.03.13

INF2310

41

## Andre Laplace-operatorer

- Kan bl.a. finnes ved å bruke gradient-operatorer.

- Eksempel: Bruker 3x3-Sobel-operatoren:

$$-\nabla_{5 \times 5}^2 = - \left( \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \right)$$

$$= - \left( \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -8 & -12 & -8 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 & 0 & 1 \\ 4 & 0 & -8 & 0 & 4 \\ 6 & 0 & -12 & 0 & 6 \\ 4 & 0 & -8 & 0 & 4 \\ 1 & 0 & -2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -4 & 8 & 24 & 8 & -4 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \end{bmatrix}$$

F7 05.03.13

INF2310

42

## Implementasjon av Laplace-operatorer

- Generelt **ikke separable**.
- Flere Laplace-operatorer kan likevel **deles opp i 1D-operasjoner**.
- Eksempel: Laplace-operatoren fra forrige foil:

$$-\nabla_{5 \times 5}^2 = \begin{bmatrix} -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -4 & 8 & 24 & 8 & -4 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \end{bmatrix}$$

er ikke separabel, men kan deles opp i 1D-operasjonene:

$$[1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1] * [-1 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1]^T + [-1 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1]^T * [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1]^T$$

Krever da 37 operasjoner i stedet for 49 (v.b.a. 5x5-filteret).

F7 05.03.13

INF2310

43

## Fra Laplace til LoG

- Vi gjorde gradient-operatorene støy-robuste ved å bygge inn en lavpassfiltrering.

- Eksempel: 3x3-Sobel-operatoren:

$$h_x(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} * [1 \ 2 \ 1] \quad h_y(i, j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ -1] * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Vi kan gjøre det samme med en Laplace-operator.
- Det er vanlig å bygge inn et Gauss-filter  $G$  med gitt  $\sigma$ :

$$\nabla^2 * (G * f) = (\nabla^2 * G) * f = LoG * f$$

- $\nabla^2$  er en Laplace-operator og

$LoG = \nabla^2 * G$  er en **Laplacian-of-Gaussian-operator**.

Husk:  
Konvolusjon er  
assosiativ:  
 $(f * g) * h = f * (g * h)$

F7 05.03.13

INF2310

44

## En 7x7-LoG-operator

- Konvolverer vi 3x3-Gauss-tilnærmingen:

$$G_{3 \times 3} = [1 \ 2 \ 1]^T * [1 \ 2 \ 1]^T$$

med Laplace-operatoren vil fikk ved å bruke 3x3-Sobel-operatoren:

$$-\nabla_{5 \times 5}^2 = [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1]^T * [-1 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1]^T + [-1 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1]^T * [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1]^T$$

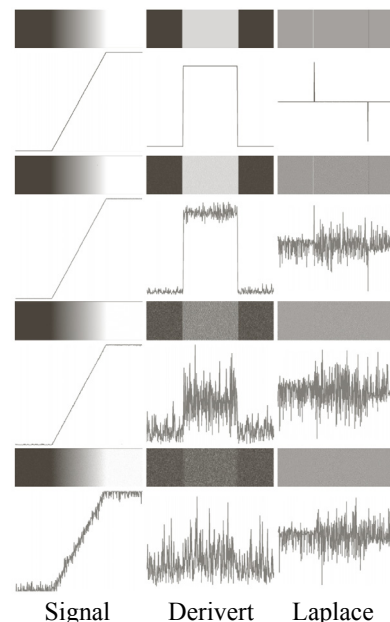
for å få følgende 7x7-LoG-operator:

$$LoG_{7 \times 7} = -\nabla_{5 \times 5}^2 * G_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} -2 & -8 & -14 & -16 & -14 & -8 & -2 \\ -8 & -24 & -24 & -16 & -24 & -24 & -8 \\ -14 & -24 & 30 & 80 & 30 & -24 & -14 \\ -16 & -16 & 80 & 160 & 80 & -16 & -16 \\ -14 & -24 & 30 & 80 & 30 & -24 & -14 \\ -8 & -24 & -24 & -16 & -24 & -24 & -8 \\ -2 & -8 & -14 & -16 & -14 & -8 & -2 \end{bmatrix}$$

F7 05.03.13

INF2310

45



## Også lavpassfiltrere?

FIGURE 10.11 First column: Images and intensity profiles of a ramp edge corrupted by random Gaussian noise of zero mean and standard deviations of 0.0, 0.1, 1.0, and 10.0 intensity levels, respectively. Second column: First-derivative images and intensity profiles. Third column: Second-derivative images and intensity profiles.

F7 05.03.13

INF2310

46

## To måter å lage LoG-operatorer

- Ofte lages og implementeres en LoG-operator som konvolusjonen av en Laplace-operator og et Gauss-filter.
- Ofte defineres en **LoG-operator** som en **sampling av LoG-funksjonen**, som er resultatet av å anvende Laplace-operatoren på Gauss-funksjonen i det **kontinuerlige domenet**.
- Disse fremgangsmåtene gir generelt ikke *helt* like filtre, men begge resulterer i filtre vi kaller LoG-operatorer.

F7 05.03.13

INF2310

47

## Utledning av LoG-funksjonen

2D - Gauss - funksjon :

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

Deriverer m.h.p. x :

$$\frac{\partial G}{\partial x} = -\frac{x}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

Deriverer m.h.p. y :

$$\frac{\partial G}{\partial y} = -\frac{y}{2\pi\sigma^4} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

Andrederivert m.h.t. x :

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = -\frac{1}{2\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

Andrederivert m.h.t. y :

$$\frac{\partial^2 G}{\partial y^2} = -\frac{1}{2\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{y^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

Laplace er summen av disse :

$$-\nabla^2 G = \frac{1}{2\pi\sigma^4} \left(2 - \frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}$$

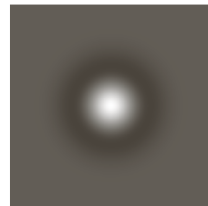
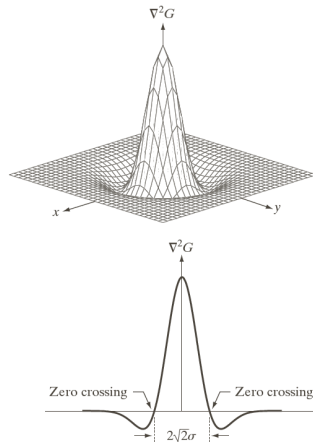
F7 05.03.13

INF2310

48

# LoG-funksjonen

- Kalles noen ganger «Mexican hat»-operatoren.



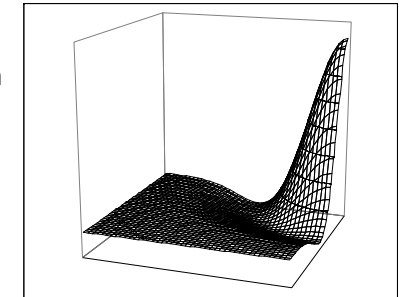
0	0	-1	0	0
0	-1	-2	-1	0
-1	-2	16	-2	-1
0	-1	-2	-1	0
0	0	-1	0	0

**FIGURE 10.21**  
 (a) Three-dimensional plot of the negative of the LoG. (b) Negative of the LoG displayed as an image. (c) Cross section of (a) showing zero crossings. (d)  $5 \times 5$  mask approximation to the shape in (a). The negative of this mask would be used in practice.

G & W definerer  $\nabla^2 G$  som LoG-funksjonen, men vi definerer den som  $-\nabla^2 G$

# LoG-operator fra LoG-funksjonen

- Får en LoG-operator ved å sample (en variant av) LoG-funksjonen  $\rightarrow -\nabla^2 G = \frac{1}{2\pi\sigma^4} \left( 2 - \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$  for heltallige  $x$  og  $y$ .
  - Vi bryr oss denne gangen ikke om implementasjonsdetaljene; justering slik at vektene summerer seg til 0 og eventuell heltallstilmærning av vektene.
- $\sigma$  er standard-avviket til Gauss-en og er en parameter.
- I de fleste tilfeller er størrelsen av operatoren  $\approx 3w \approx 8.5\sigma$ 
  - LoG-funksjonen omtrent 0 utenfor dette området.
  - Den positive toppen til minus LoG-funksjonen kalles *kjernen* og  $w = 2\sqrt{2}\sigma$  er bredden av denne.

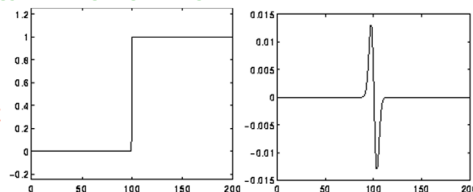


Et kvadrant av LoG-funksjonen

# Bruk av LoG-operatorer

- Laplace-operator detekterer kanter, men er følsomme for støy.
- Ofta må man lavpassfiltrere før Laplace-filtrering.
- En LoG-operator gjør begge disse operasjonene i ett.
- Fungerer ellers som en Laplace-operator:
  - I homogene områder vil en LoG-operator gi respons 0.
  - Den vil ha positiv respons på den ene siden av kanten, er ideelt sett 0 i kantskillet, og har negativ respons på den andre siden.
  - Nullgjennomganger angir kanter.**

Intensitetsprofil av en steg-kant

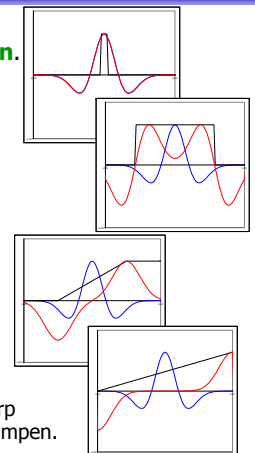


LoG-filtreringen av profilen  
 NB: Den anvendte LoG-operatoren har negativ verdi i senterposisjonen.

- PS: LoG-operatorer med varierende  $\sigma$  fungerer også godt som «blob»-detektorer.

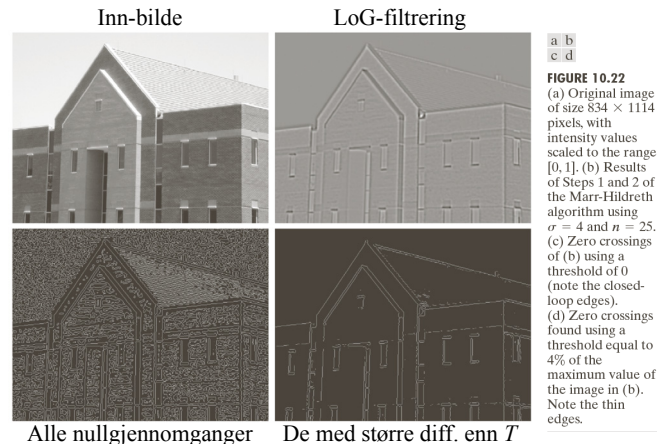
# Kantdeteksjon ved LoG-nullgjennomganger

- Tommelfingerregel for strukturer: **LoG-kjernen må være smalere enn strukturen.**
  - Strukturen er mindre enn halvparten av LoG-kjernen => Nullgjennomgangene er utenfor kantskille
  - Strukturen er større enn halvparten av LoG-filteret => Nullgjennomgangene er nøyaktig kantskille
  - Et sted i mellom: Avhenger av diskretiseringen og tilnærmingen av LoG-filteret.
- Tommelfingerregel for ramper: **LoG-filteret må være større enn rampen.**
  - Rampen er bredere enn LoG-filteret, => Ingen nullgjennomgang, bare et null-platå.
  - Ellers: Nullgjennomgang midt på rampen (kan få én 0-respons akkurat på midten), altså en fornuftig definisjon av kantskillet til rampen.
    - P.g.a. støy krever ofte at nullpasseringen er skarp => LoG-filteret må være betydelig større enn rampen.
- => **Velg kerne- og filterstørrelsen med omhu!**
  - Angis først og fremst av standardavviket til Gauss-funksjonen, som gir bredden av LoG-kjernen og antyder størrelsen av LoG-filteret.



## Eksempel: LoG-kantdeteksjon

- **Oppgave:** Finn fremtredende kanter.



F7 05.03.13

INF2310

53

## Robust kantdeteksjon

Vanligvis tre steg i robust kantdetektor:

1. **Støy-reduksjon:** Forsøker å fjerne så mye støy som mulig uten å glatte ut kantene for mye.
  - Lavpassfiltrering.
2. **Kant-filtrering:** Finner kantene.
  - Høypassfiltrering; anvender f.eks. gradient-operatorer.
3. **Kant-lokalisering:** Etterbehandler resultatet fra kant-filtreringen for å finne eksakte kantposisjoner.
  - Kantresponsen skal helst være ett piksel tykk og være lokalisert der kanten faktisk er i inn-bildet.

F7 05.03.13

INF2310

54

## Hva kjennetegner en god kantdetektor?

- Finner **alle** og **bare** de relevante kantene.
- Posisjonen til detektert kant samsvarer med der kanten faktisk finnes i inn-bildet.
- En kant gir én enkelt respons.
- Robust for støy.
  - Trade-off / kompromiss mellom støy-robusthet og kant-lokalisering.

F7 05.03.13

INF2310

55

## Ideen til Canny

- Lag en kantdetektor som er optimal i forhold til følgende tre kriterier:
  - Best mulig deteksjon (alle kanter og bare kanter)
  - God kant-lokalisering
  - Én enkelt respons
- Optimer ved bruk av et bilde med støy.
- Resultat: Følgende enkle algoritme oppnår nesten optimumet:

F7 05.03.13

INF2310

56

## Cannys algoritme

1. Lavpassfiltrer med Gauss-filter (med gitt  $\sigma$ ).
2. Finn gradient-magnituden og gradient-retningen.
3. Tynning av gradient-magnitudo ortogonalt på kant.
  - F.eks.: Hvis et piksel i gradient-magnitudo-bildet har en 8-nabo i eller mot gradient-retningen med høyere verdi, så settes pikselverdien til 0.
4. Hysterese-terskling (to terskler,  $T_h$  og  $T_l$ ):
  - a. Merk alle piksler der  $g(x,y) \geq T_h$
  - b. For alle piksler der  $g(x,y) \in [T_l, T_h)$ :
    - Hvis (4 eller 8)-nabo til et merket piksel, så merkes dette pikselet også.
  - c. Gjenta fra trinn b til konvergens.

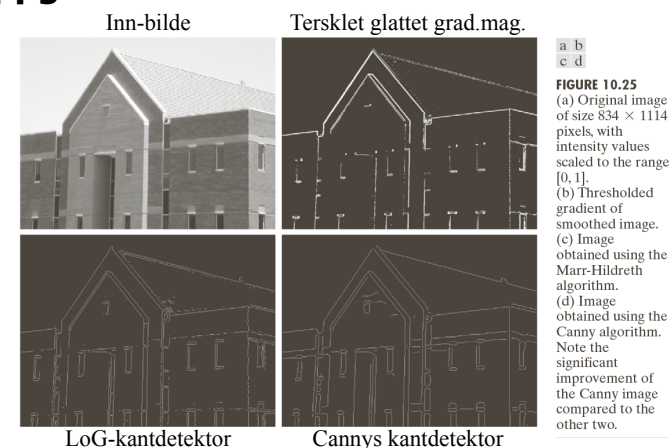
F7 05.03.13

INF2310

57

## Eksempel: Kantdeteksjon

- **Oppgave:** Finn fremtredende kanter.



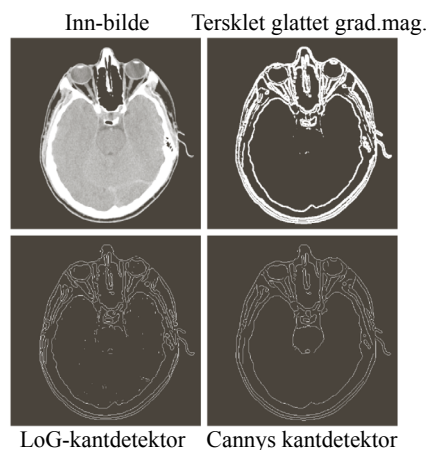
F7 05.03.13

INF2310

58

## Eksempel: Kantdeteksjon

- **Oppgave:** Finn fremtredende kanter.



F7 05.03.13

INF2310

59

## Oppsummering

- Vi har utledet enkle kant-deteksjonsoperatorer.
- Gradient-operatorene glatter i den ene retningen og gjør kantdeteksjon i den andre retningen.
- Gradient-operatorene gir både kant-styrke og retning.
- Laplace-operatorene gir presis lokalisering av kanten, men forsterker støy.
- LoG-operatoren er en mer robust versjon av Laplace som inkluderer Gauss-glatting.
  - Kjernens og filterets størrelse må passe til oppgaven!
- Cannys kantdetektor gir et kompromiss mellom støyreduksjon og kantlokalisering.

F7 05.03.13

INF2310

60