Számítógépes képfeldolgozás

Éldetektálás

Tófalvi Tamás

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Informatikai Kar
tofi@inf.elte.hu

Tartalom

1. Alapvető képi jellemzők
2. Az éldetektálás alapelvei
3. Gradiens alapú élszűrők
4. Nullátmenetes éldetektor

Tartalom

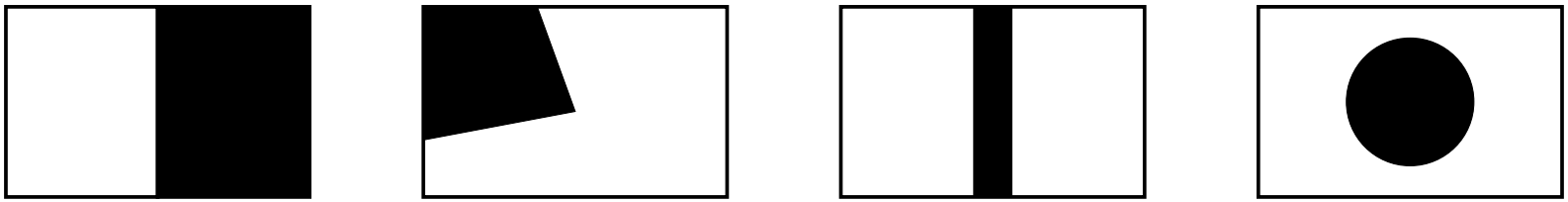
1 Alapvető képi jellemzők

2 Az éldetektálás alapelvei

3 Gradiens alapú élszűrők

4 Nullátmenetes éldetektor

Alapvető képi jellemzők



él sarok vonal folt

- **Él**: az intenzitás hirtelen, nagymértékű változása az objektum kontúrján keresztül
  - $\Rightarrow$ ez az előadás
- **Sarok**: a kontúr éles fordulója
  - $\Rightarrow$ következő előadás
- **Vonal**: keskeny, elnyúlt, közel állandó szélességű és intenzitású tartomány
- **Folt**: közel állandó intenzitású, kompakt képtartomány

Tartalom

1 Alapvető képi jellemzők

2 Az éldetektálás alapelvei

3 Gradiens alapú élszűrők

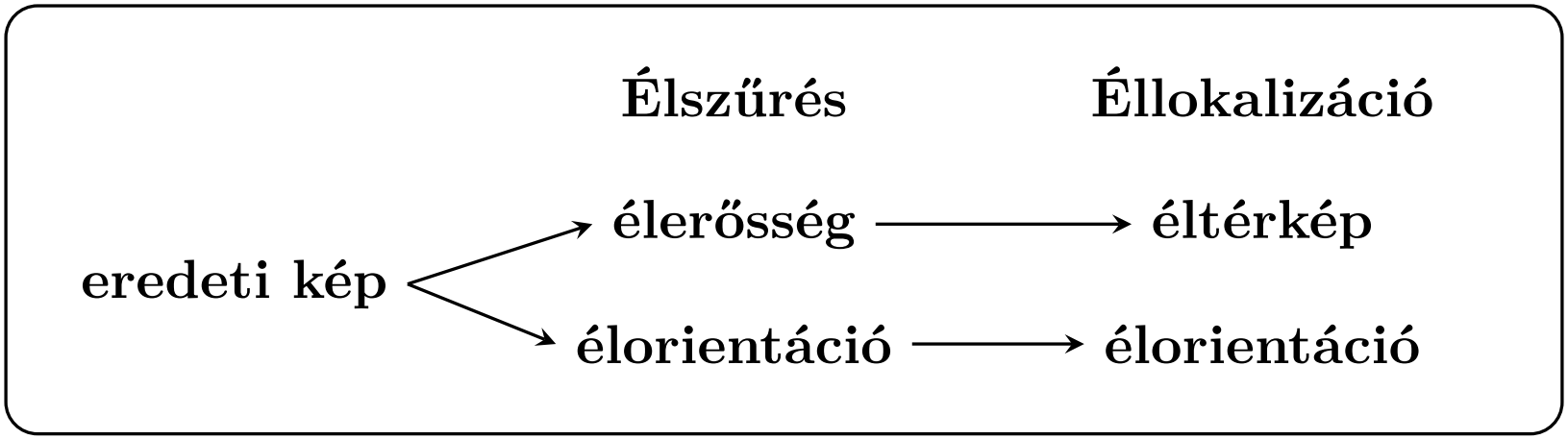
4 Nullátmenetes éldetektor

Képi élek

- A **képi élek** nem feltétlenül esnek egybe a **fizikai élekkel**
  - a képi élek az intenzitás szakadásai (diszkontinuitásai)
  - a fizikai élek a felszín fizikai szakadásai
  - $\Rightarrow$ az *árnyékok* élei nem felszíni szakadások
- Az intenzitásélek jelentősége
  - az emberi szem „hardveresen”, a vizuális feldolgozás legelső szintjén érzékeli őket
  - különbségeket látunk, nem abszolút értékeket $\Rightarrow$ adaptivitás

ideális él elmosott él

Az éldetektálás lépései



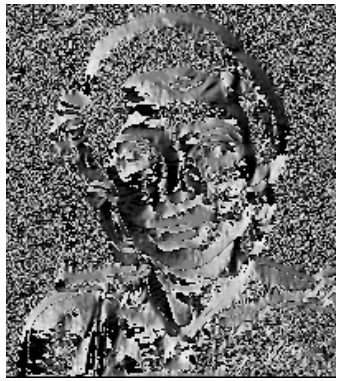
- Az **élszűrő** az élekre ad választ, kimenete
  - *élerősség*: az él erőssége, lokális kontraszt
  - *élorientáció*: körkörös (cirkuláris) adat, mod π
- **Éllokalizáció** (utófeldolgozás)
  - eltávolítja a zajos éleket
  - eltávolítja a „fantom” éleket, vékony kontúrokat ad
  - előállítja az *éltérképet*: bináris élkép

$\Rightarrow$ Az élszűrés előtt **zajsimítás** alkalmazható

Példa: éldetektálás 3×3-as Prewitt-operátorral

eredeti kép

élerősség


élorientáció

éltérkép

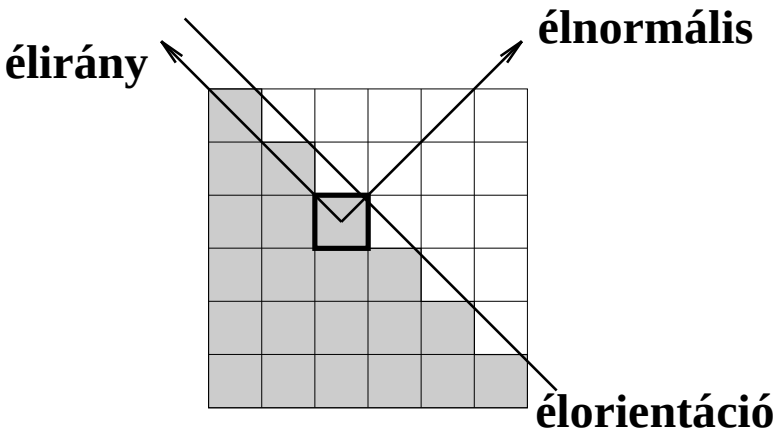
- Az élorientáció körkörös adat: 0-nál és π-nél átfordul

felső vonal

alsó vonal

Az eredeti kép intenzitásprofiljai két vonal mentén

Élnormális, élirány és élorientáció



- **Élnormális**: a legnagyobb intenzitásváltozás iránya az élpontban
  - az élre merőleges egységvektor
- **Élirány**: a kontúr érintőjének iránya
  - az éllel párhuzamos egységvektor
  - az egyértelmű definícióhoz konvenció kell

  $\Rightarrow$ „a sötét oldal balra esik”
- **Élorientáció**: mod π értelmezett körkörös adat

Élszűrők

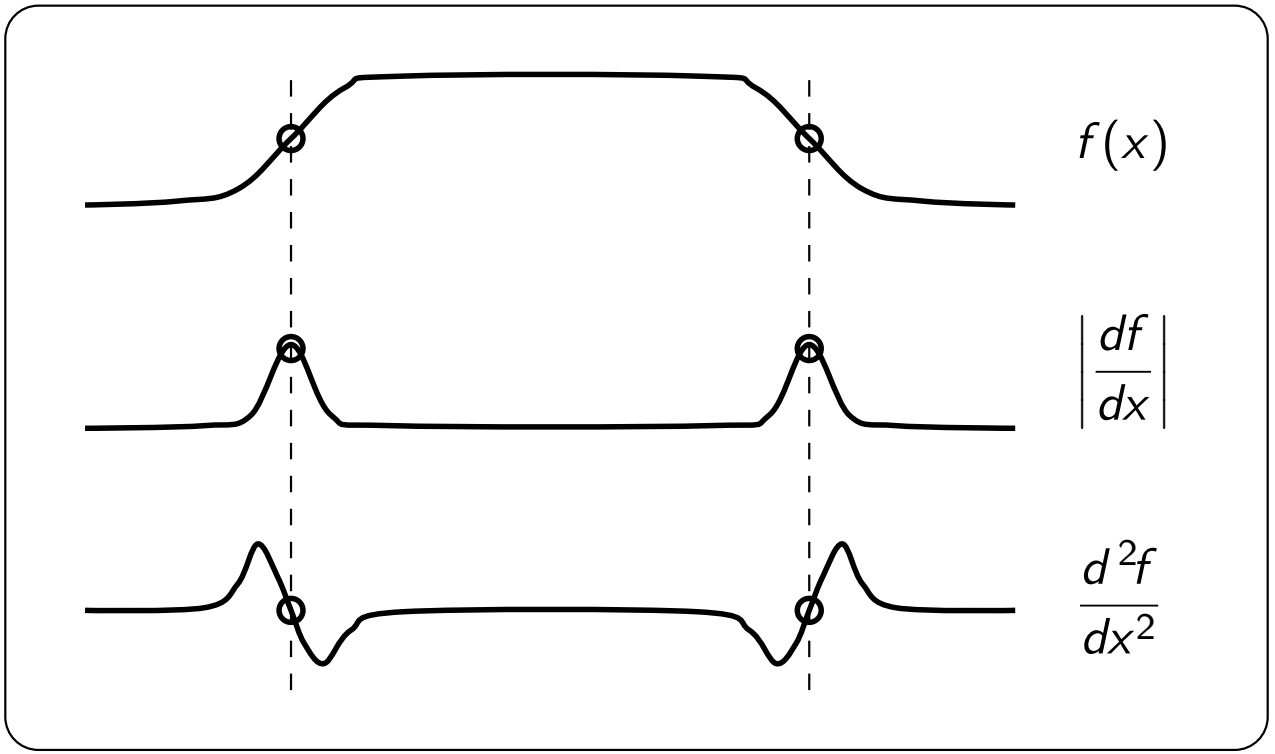
- Az élszűrők felüláteresztő szűrők, amelyek az intenzitásfüggvény térbeli deriváltjait használják, hogy
  - kiemelják az élen keresztüli intenzitásváltozást
  - elnyomják az állandó intenzitású tartományokat
- Az élszűrésben használt operátorok
  - az intenzitás **gradiense** az elsőrendű parciális deriváltakból álló **vektor**:

$$\nabla f(x,y) \doteq \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}\right)$$

  - a **Laplace-operátor** a másodrendű parciális deriváltakból álló **skalár**:

$$\Delta f(x,y) \doteq \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

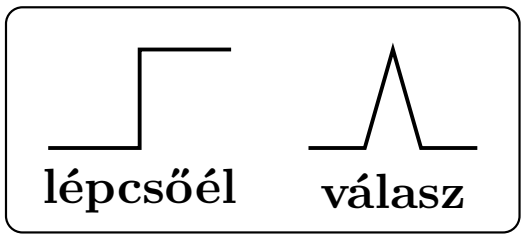
A jel, valamint első és második deriváltja

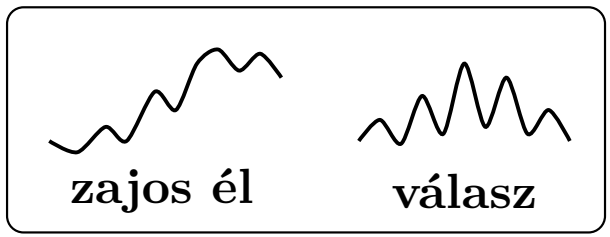


- Az élek helye
  - az első derivált abszolút értékének maximumai
  - a második derivált **nullátmenetei**

A jó élszűrő kritériumai

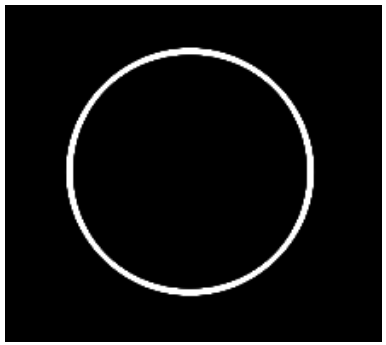
1. **Egyenletes tartományokra nincs válasz**
   $\Rightarrow$ a maszkelemek összege nulla: $\sum_{r,c} w(r,c) = 0$
2. **Izotrópia**
   - a válasz független az élorientációtól
3. **Jó detektálás**: minimalizálandó annak a valószínűsége, hogy
   - zaj okozta hamis éleket detektálunk (hamis pozitívak)
   - valódi éleket nem találunk meg (hamis negatívak)
4. **Jó lokalizáció**: a detektált élek a lehető legközelebb legyenek a valódi élekhez
5. **Egyszeres válasz**: minimalizálandó a hamis lokális maximumok száma a valódi él körül



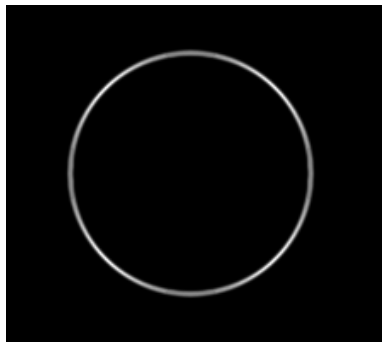


Az izotrópia kritériumának szemléltetése

eredeti kép



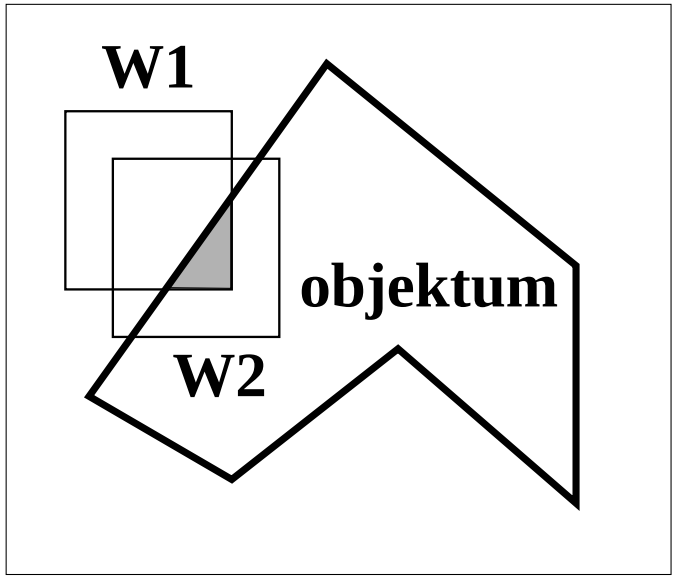
izotróp szűrő



anizotróp szűrő

- **Izotróp** szűrő: minden irányra egyforma élerősség
- **Anizotróp** élszűrő: iránytól függő élerősség
- A példában a válasz függ az élorientációtól
  - a $45^\circ \cdot k$ irányok felerősödnek
  - a $90^\circ \cdot k$ irányok elnyomódnak

Az egyszeres válasz kritériumának szemléltetése



- Ugyanazt a kontúrdarabot a W1 és a W2 ablak is detektálja
  $\Rightarrow$ a „valódi” élekkel párhuzamos „fantom” élek, vastag kontúrok
- A válasz az ablak és a kontúr átfedésétől függ
- A többszörös válasz *minden* ablakalapú detektálási feladatra jellemző

Tartalom

1 Alapvető képi jellemzők

2 Az éldetektálás alapelvei

3 Gradiens alapú élszűrők
- Egyszerű gradiensmaszkok
- A Canny-féle éldetektor
- Az éldetektálás utófeldolgozása

4 Nullátmenetes éldetektor

Gradiens alapú élszűrők

Tegyük fel, hogy az $f(x, y)$ intenzitásfüggvény elég sima.

- Az intenzitás **gradiense vektor**:

$$\nabla f(x, y) \doteq \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) = (f_x, f_y)$$

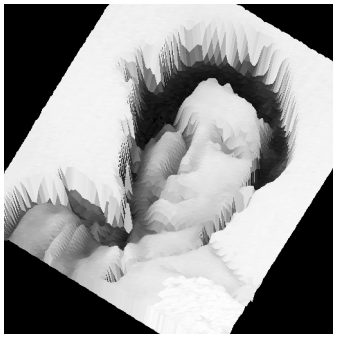
- A gradiens $M(x, y)$ **nagysága** és $\Theta(x, y)$ **orientációja**:

$$\begin{aligned} M(x, y) = \|\nabla f(x, y)\| &= \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \\ \Theta(x, y) &= \arctan \frac{f_x}{f_y} \end{aligned}$$

- A gradiensvektor az intenzitás *leggyorsabb növekedésének* irányát és mértékét adja meg

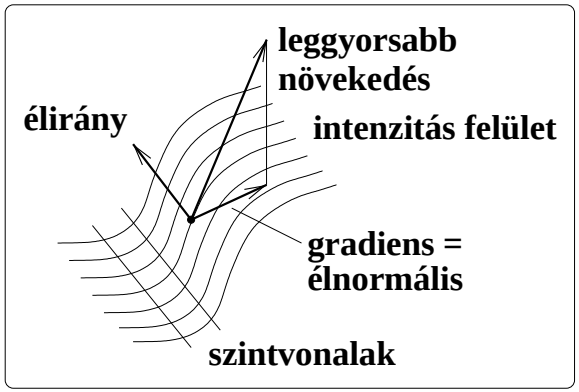
A gradiensvektor jelentése

eredeti kép



intenzitásfelület

küszöbölt kép



Az él intenzitásfelülete és gradiense

3×3-as gradiensmaszkok

- A parciális deriváltakat véges differenciákkal közelítjük
  - $\Rightarrow$ gradiens-komponens maszkokat kapunk: $f * G_x = f_x$, $f * G_y = f_y$
  - $\Rightarrow$ az Y-maszkok az X-maszkok 90°-os elforgatottjai
- Gyakran használt operátorok
  - az izotróp maszk kevésbé érzékeny az élorientációra

Prewitt G_x

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

Sobel G_x

$$\frac{1}{4}\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Izotróp G_x

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

A Canny-féle éldetektor tulajdonságai

- A Canny-féle éldetektor zajos lépcsőélre **optimális**, ha
  - a képzaj additív, korrelálatlan és Gauss-eloszlású
  - az élszűrő lineáris
- Az optimalitási kritérium egyesíti a
  - **jó detektálást** és
  - a **jó lokalizációt**
- Az **egyszeres válasz** kritériumához két utófeldolgozó műveletet alkalmazunk
  - *nem-maximum elnyomás*
  - *hiszterézises küszöbölés*
- Az eredeti Canny-szűrő meglehetősen bonyolult
  - gyakran egyszerűbb közelítését használjuk

A Canny-szűrő gyakorlati közelítése

- Az eredeti Canny-szűrő meglehetősen bonyolult
- Egyszerű gyakorlati közelítés
  - a képet **Gauss-szűrővel** simítjuk:
    $g(x, y) = f(x, y) * w_G(x, y; \sigma)$
  - $\Rightarrow$ a σ paraméter határozza meg a *szűrő méretét*
  - a **gradiensoperátorral** $(\nabla g(x, y))$ megkapjuk az élerősséget és az élorientációt
- A σ skálaparaméter megválasztása függ
  - a kívánt részletességtől: finom élek, globális élek
  - a zajszinttől
  - a lokalizáció és a detektálás közötti kompromisszumtól
  - $\Rightarrow$ lásd mintaillesztés

A Canny-szűrő gyors megvalósítása

- Kihasználjuk a lineáris szűrők *asszociativitását*:

$$\nabla(f(x,y) * w_G(x,y)) = f(x,y) * (\nabla w_G(x,y))$$

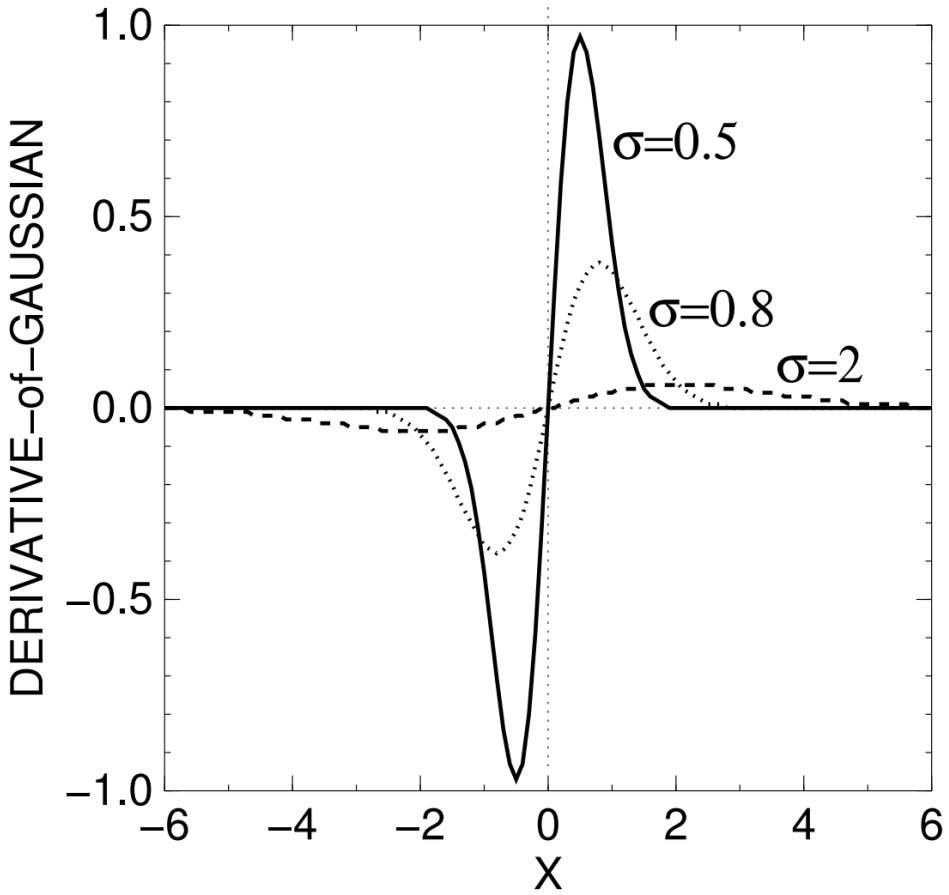
- Kihasználjuk a Gauss-szűrő **szeparálhatóságát**: $w_G(x,y) = w_G(x) \cdot w_G(y)$
- Az eredmény egy vektorszűrő (C normáló tényező):

$$\nabla w_G(x,y) = (w_G(y) \cdot w'_G(x),\ w_G(x) \cdot w'_G(y))$$

$$w'_G(x) \doteq \frac{\partial w_G(x)}{\partial x} = C \cdot x \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\}$$

$\Rightarrow$ A szűrőt **1D maszkok** sorozataként valósítjuk meg

$-w'_G(x)$ alakja növekvő σ-ra



Éllokalizáció

- **Bemenet**
  - $M(x, y)$ élerősség
  - $\Theta(x, y)$ élorientáció
- **Kimenet**
  - bináris *éltérkép*

  $\Rightarrow$ 1: él, 0: nincs él
- $M(x, y)$ azon maximumait választja ki, amelyek valódi élpixelek
- Bármely szűrővel használható, amely élerősséget és orientációt ad
  - gradiens alapú: Canny, Prewitt
  - nem gradiens alapú: Mérő–Vassy
- Két alapművelete van
  - **nem-maximum elnyomás** a „fantom” élek eltávolítására
  - **hiszterézises küszöbölés** a zajos maximumok eltávolítására

Nem-maximum elnyomás

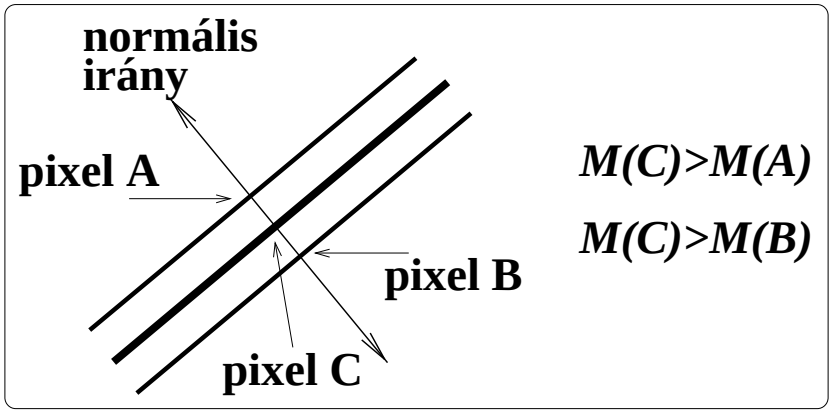
- A többszörös válasz miatt az $M(x, y)$ élerősség a lokális maximumok körül széles gerinceket tartalmazhat
- A nem-maximum elnyomás törli a nem maximális pixeleket, **megőrizve a kontúrok összefüggőségét**

Algoritmus: nem-maximum elnyomás

1. Minden (x, y) pozícióból lépjünk a $\Theta(x, y)$ élorientációra **merőleges** két irányba
2. Jelölje C a kiinduló (x, y) pixelt, A és B a merőleges irányokban lévő két szomszédját
3. Ha $M(A) > M(C)$ vagy $M(B) > M(C)$, az (x, y) pixelt elvetjük: $M(x, y) = 0$

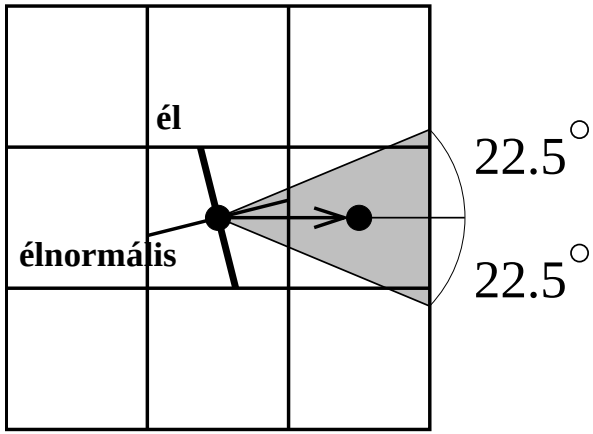
A nem-maximum elnyomás szemléltetése

Pont törlése



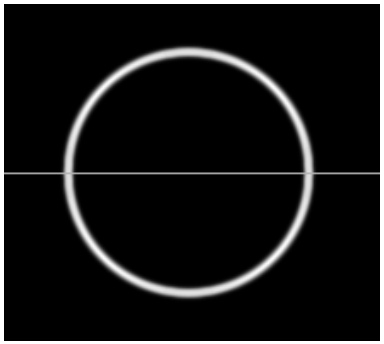
- C megmarad, ha $M(C) > M(A)$, $M(C) > M(B)$
- A és B törlődik, mivel $M(A) < M(C)$, $M(B) < M(C)$

Lépés az élen át



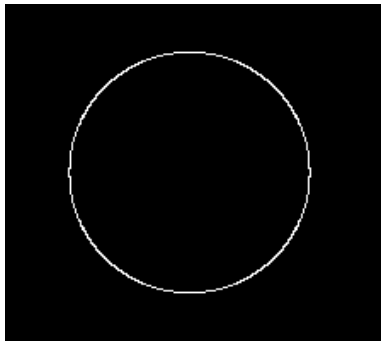
Ha az élnormális szöge a jelölt tartományba esik, a középső pixel jobb és bal oldali szomszédját választjuk.

Példa nem-maximum elnyomásra



élerősség

intenzitásprofil a vonal mentén



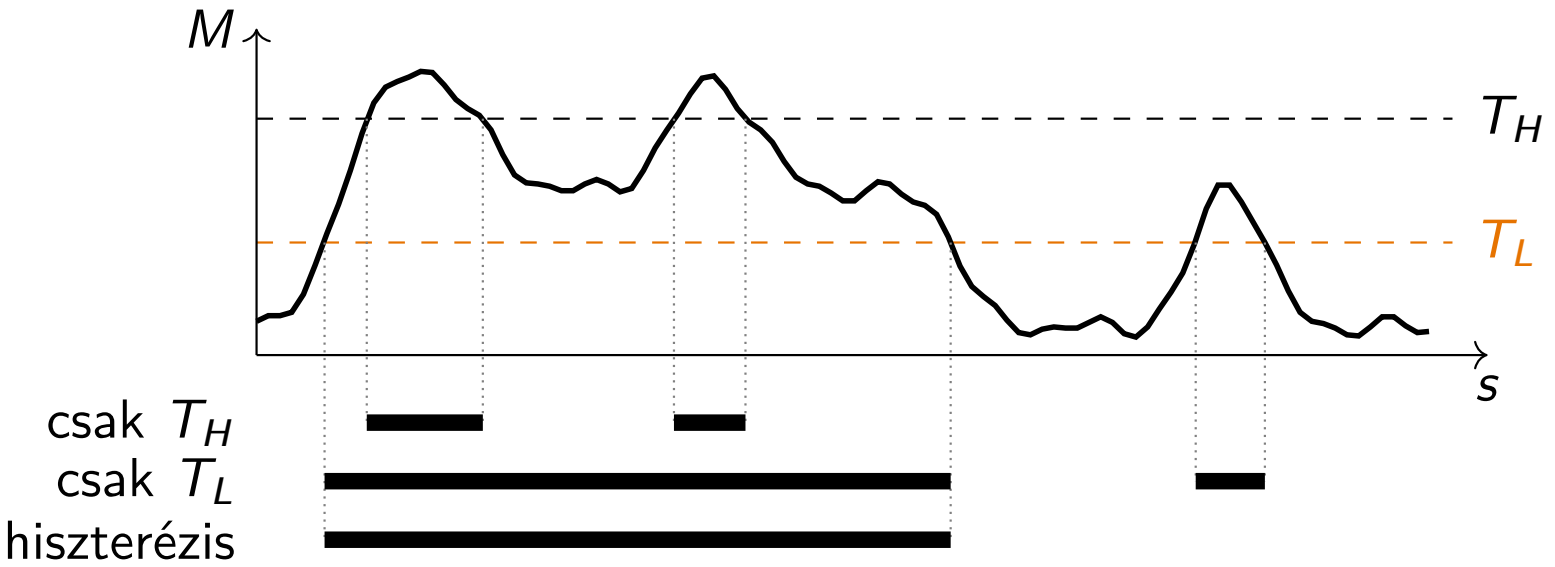
az NMS eredménye

- A nem-maximum elnyomás elvékonyítja az élerősség-kép széles kontúrjait
- A jelölt vonal menti intenzitásprofil a jobb láthatóság kedvéért átméretezve látható

Hiszterézises küszöbölés

- A nem-maximum elnyomás után a kontúrok vékonyak, de a **zaj okozta** gyenge lokális maximumok is megmaradnak
- Egyetlen T küszöböt nehéz jól megválasztani
  - túl nagy T: a valódi kontúrok **szakadozottak**
  - túl kicsi T: sok **zajos él** megmarad
- A hiszterézises küszöbölés **két küszöböt** használ: $T_L < T_H$
  - $M(x, y) \geq T_H$: **erős** élpixel $\Rightarrow$ él
  - $T_L \leq M(x, y) < T_H$: **gyenge** élpixel $\Rightarrow$ csak akkor él, ha egy erős élpixelhez **kapcsolódik**
  - $M(x, y) < T_L$: nem él
- Canny ajánlása: $T_H : T_L \approx 2 : 1 \ldots 3 : 1$

A hiszterézises küszöbölés elve



- s: pozíció egy kontúr mentén; a valódi él erőssége **ingadozik**, a zajcsúcs **gyenge**
- Egy T_L feletti szakasz akkor marad meg, ha valahol eléri T_H-t

$\Rightarrow$ „bekapcsolás” T_H felett, „kikapcsolás” T_L alatt: *hiszterézis*

A hiszterézises küszöbölés algoritmusa

Algoritmus: hiszterézises küszöbölés

1. Minden erős pixelt ($M(x,y) \geq T_H$) élnek jelölünk az E bináris éltérképen: $E(x,y) = 1$, és egy verembe tesszük
2. Amíg a verem nem üres, kiveszünk belőle egy pixelt; minden olyan **8-szomszédját**, amelyre $M \geq T_L$ és még nem él, élnek jelöljük és a verembe tesszük
3. A többi pixel nem él: $E(x,y) = 0$

- Ugyanez másképp: az $M \geq T_L$ pixelek 8-összefüggő komponensei közül azokat tartjuk meg, amelyekben van erős pixel
- Minden pixel legfeljebb egyszer kerül a verembe $\Rightarrow$ lineáris futási idő

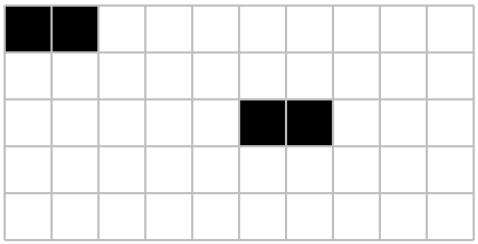
A hiszterézises küszöbölés szemléltetése

$M(x, y)$ a nem-maximum elnyomás után

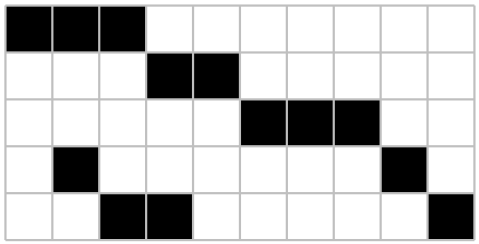
erős: $M \geq T_H = 6$

gyenge: $T_L \leq M < T_H$

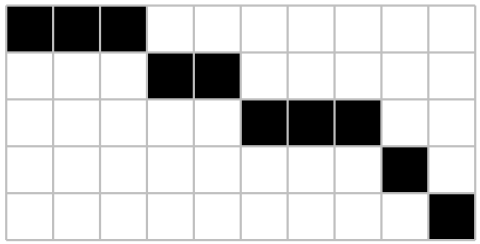
nem él: $M < T_L = 3$



csak T_H: szakadozott



csak T_L: zajos



hiszterézis

- A gyenge lánc jobb alul **gyenge pixeleken át** erős pixelhez kapcsolódik $\Rightarrow$ megmarad; bal alul elszigetelt $\Rightarrow$ törlődik

Példa hiszterézises küszöbölésre

az NMS után | csak T_H | csak T_L | hiszterézis

- $\sigma = 1{,}5$; $T_L = 0{,}08\, M_{\max}$, $T_H = 3\, T_L$
- Fehér: erős, narancssárga: gyenge élpixel
- Csak T_H: szakadozott kontúrok (váll, nyak)
- Csak T_L: sok zajos él (haj, ruha)
- A hiszterézis összefüggő kontúrokat ad, kevés zajjal

A Canny-féle éldetektor lépései

élszűrés: $f * \nabla w_G(\sigma)$ állokalizáció

eredeti kép | 1. simítás | 2. élerősség | 3. NMS | 4. hiszterézis

1. **Simítás** Gauss-szűrővel: $g = f * w_G(\sigma)$ $\Rightarrow$ kevesebb zaj
2. **Gradiens**: $M(x, y)$ élerősség, $\Theta(x, y)$ élorientáció
3. **Nem-maximum elnyomás**: csak az élnormális menti lokális maximumok maradnak $\Rightarrow$ vékony kontúrok
4. **Hiszterézises küszöbölés** ($T_L < T_H$): az erős és a hozzájuk kapcsolódó gyenge élpixelek $\Rightarrow$ éltérkép

$\Rightarrow$ A detektor paraméterei: σ, T_L és T_H

Tartalom

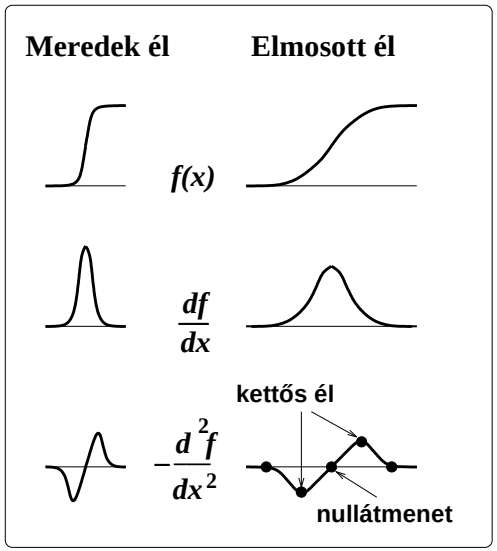
1 Alapvető képi jellemzők

2 Az éldetektálás alapelvei

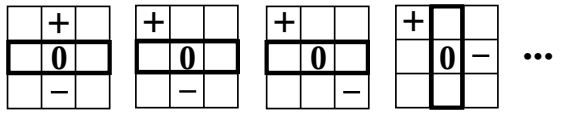
3 Gradiens alapú élszűrők

4 Nullátmenetes éldetektor
- Az éldetektálás összefoglalása

A nullátmenetes éldetektor elve



nullátmenet elve



Maszkok a nullátmenetek keresésére

- A bemeneti képre Laplace-szűrőt alkalmazunk
- A szűrt képen megkeressük a nullátmeneteket
  - egyszerű maszkokkal *vagy*
  - lokális lineáris közelítéssel és analitikus megoldással

A LoG-operátor konvolúciós maszkja

- Gauss-Laplace (Laplacian-of-Gaussian, LoG) operátort használunk
  - deriválás előtt simítunk
- Polárkoordinátákban, r, θ (origó a maszk középpontjában):

$$\Delta f = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial f}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2}$$

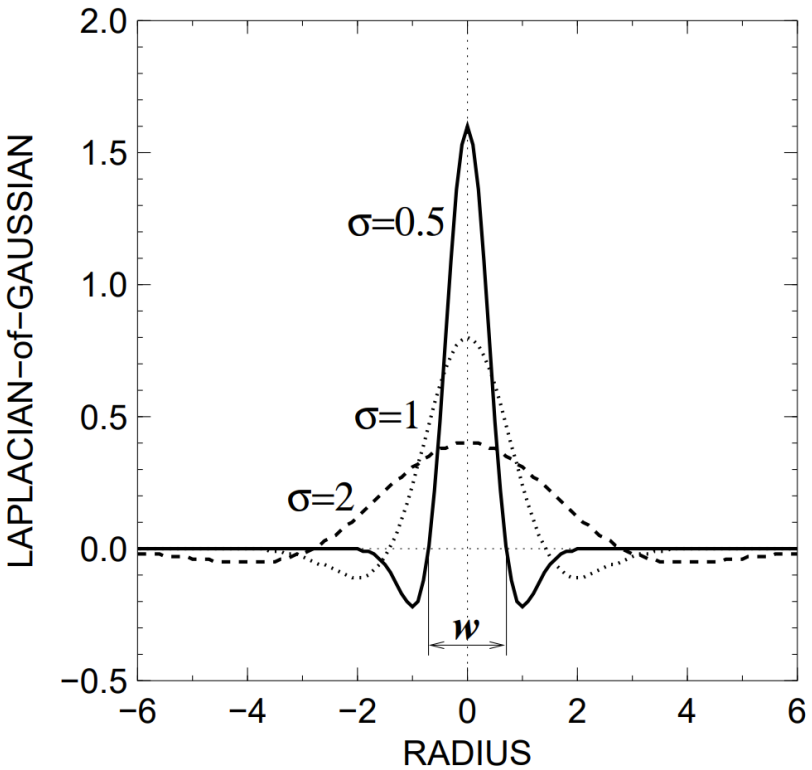
- A lineáris szűrők asszociativitását és a Gauss-függvény forgásszimmetriáját kihasználva (C normáló tényező):

$$w_{zc}(r) = C\left(\frac{r^2}{\sigma^2} - 1\right)\exp\left\{\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right\}$$

- Diszkrét nullátmenet-maszk
  - σ a skálaparaméter: kis σ finom éleket ad
  - a LoG-t a Gauss-szűrőhöz hasonlóan $k\sigma$-nál vágjuk el

$\Rightarrow$ $\sigma = 4$ esetén a maszk mérete 40

A LoG alakja változó σ-ra



- „Mexikói kalap”
- σ a skálaparaméter: a részletesség szintje
  - kisebb $\sigma \Rightarrow$ finomabb élek
- A LoG-szűrőt a Gauss-szűrőhöz hasonlóan $k\sigma$-nál vágjuk el
- A pozitív középső rész mérete: $w = 2\sqrt{2}\sigma$

DoG-szűrő: Gauss-függvények különbsége

- A LoG-szűrő nem szeparálható
  $\Rightarrow$ nagy σ-ra lassú
- A DoG-szűrő (Difference-of-Gaussians) a LoG-szűrő gyors, szeparálható **közelítése**:

$$w_{LoG}(r;\sigma) \approx w_G(r;\sigma_1) - w_G(r;\sigma_2) \doteq w_{DoG}(r;\sigma_1,\sigma_2)$$

  - $w_G(r;\sigma_1)$, $w_G(r;\sigma_2)$ két Gauss-szűrő
  - általános esetben $\sigma \neq \sigma_1 < \sigma_2$
- Gyakori választás: $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = 1{,}6\sigma$:

$$w_{DoG}(r;\sigma) = w_G(r;\sigma) - w_G(r;1{,}6\sigma)$$

A nullátmenetes éldetektor tulajdonságai

- A folytonos nullátmenetes éldetektor mindig **zárt kontúrokat** ad
  - $\Rightarrow$ folytonos felület metszete egy síkkal
    - elvben ez segítheti a kontúrkövetést
    - a gyakorlatban sok **hamis hurok** jelenik meg
- Szabályozható operátorméret: σ
  - természetes élhierarchia a *skálatérben*
  - durvább skálán az élek csak összeolvadhatnak vagy eltűnhetnek
  - $\Rightarrow$ a faszerű szerkezet megkönnyíti a kép **strukturális elemzését**
- Nem ad **élorientációt**
  - a nem-maximum elnyomás és a hiszterézises küszöbölés nem alkalmazható
  - más utófeldolgozással távolíthatók el a nem kívánt élek

Példák: éldetektálás 15 × 15-ös LoG-szűrővel

LoG abszolút érték

utófeldolgozással

utófeldolgozás nélkül

- **LoG abszolút érték**: a kimenet abszolút értéke
  - a sötét vonalak a kontúrok
- **Utófeldolgozással**: a gyenge élek eltávolításával
- **Utófeldolgozás nélkül**: a gyenge élek eltávolítása nélkül

Különböző éldetektorok összehasonlítása

Prewitt 3×3

Mérő–Vassy 7×7

LoG 21×21

Canny 3×3

Canny 7×7

Canny 25×25

- LoG eredmény: a gyenge élek eltávolításával
- Mérő–Vassy: nem gradiens alapú éldetektor

Az éldetektálás összefoglalása

- A 3×3-as gradiensoperátorok (Prewitt, Sobel) **egyszerűek és gyorsak**. Akkor használjuk őket, ha
  - csak finom élekre van szükség
  - alacsony a zajszint
- A σ paraméter változtatásával a **Canny-operátor** használható
  - finom és durva élek detektálására egyaránt
  - különböző zajszinteken
- Minden **gradiensoperátor**
  - élorientációt is ad
  - lokalizációt igényel: nem-maximum elnyomás, hiszterézises küszöbölés
- A **nullátmenetes** éldetektor
  - mellett neurofiziológiai kísérletek szólnak
  - az 1980-as években volt népszerű
  - ma a gyakorlatban **ritkábban használják**