Számítógépes képfeldolgozás

Ismert alakú görbék detektálása: a Hough-transzformáció

Tófalvi Tamás

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



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
TUDOMÁNYEGYETEM

Tartalom

1. A modellillesztés nehézségei
2. Hough-transzformáció egyenesekre
3. Hough-transzformáció körökre
   - Kördetektálási példák
4. A Hough-transzformáció további változatai
   - A Hough-transzformáció összefoglalása

Tartalom

1. A modellillesztés nehézségei
2. Hough-transzformáció egyenesekre
3. Hough-transzformáció körökre
   - Kördetektálási példák
4. A Hough-transzformáció további változatai
   - A Hough-transzformáció összefoglalása

Több struktúra modellillesztése 1/2

- A kép többféle struktúrát tartalmazhat
  - alakzatokat, görbéket
- **„Tyúk vagy tojás” probléma**
  - → a modell becsléséhez szegmentálni kell a képet
  - → a szegmentáláshoz modellt kell rendelni az adatokhoz
- Robusztusság a kiugró pontokkal szemben
  - **durva** kiugró pontok: egyik struktúrához sem illeszkednek
  - **látszólagos** kiugró pontok: a kiválasztott struktúrához nem illeszkednek
  - → de egy másikhoz igen

Több struktúra modellillesztése 2/2

- Robusztusság a hiányzó, zajos adatokkal szemben
  - kitakarások
  - hiányzó mérések
  - torzítások, zaj
- A probléma számos fontos alkalmazásban felmerül, pl.:
  - homográfia becslése
  - 3D objektumok szegmentálása
  - mozgásszegmentálás
  - alakzatok és görbék detektálása

Nemparaméteres módszerek

- RANSAC
  - konszenzus: egyetlen modell
- Multi-RANSAC
  - konszenzus: kiterjesztés több modellre
- FLoSS
  - konszenzus: több modell, iteratív
- RHA
  - preferenciaelemzés: több modell
- J- és T-Linkage
  - preferenciaelemzés, klaszterezés: több modell

Paraméteres módszerek

- Hough-transzformáció
  - szavazás: egyetlen modell
- Általánosított Hough-transzformáció
  - szavazás, mintaillesztés: egyetlen modell
- Randomizált Hough-transzformáció
  - RANSAC-szerű: több modell

Tartalom

1 A modellillesztés nehézségei

2 Hough-transzformáció egyenesekre

3 Hough-transzformáció körökre
- Kördetektálási példák

4 A Hough-transzformáció további változatai
- A Hough-transzformáció összefoglalása

A Hough-transzformáció (HT) fogalma

- Adott alakzatok és görbék detektálása
- **Analitikusan** megadott alakzatok vagy görbék
  - egyenes
  - kör, ellipszis stb.
- **Mintával** megadott alakzatok vagy görbék
  - tetszőleges sima alakzat vagy görbe
  - rögzített orientáció és méret

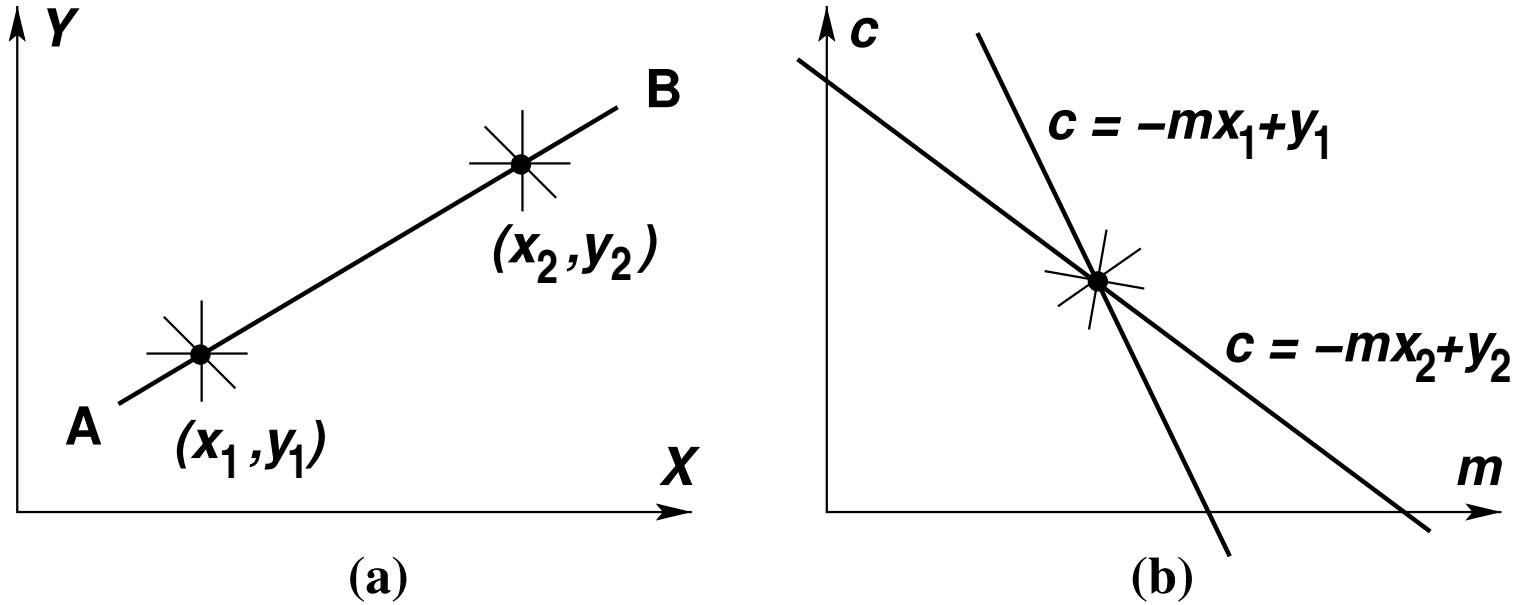
Az eredeti Hough-transzformáció

- **Paul Hough**
  - buborékkamrás részecskenyomok detektálásán dolgozott
  - 1962-ben amerikai szabadalmat kapott a transzformációra
- Paraméterezett **egyenesekre** alkalmazható
- Szavazási eljárás
  - a pontok a rajtuk áthaladó egyenesekre szavaznak
- Képtér $\longrightarrow$ paramétertér (akkumulátortömb)
- Klaszterek keresése a paramétertérben $\longrightarrow$ egyenesek
  - végpontok nélkül

A Hough-transzformáció módosításai

- Az élorientáció felhasználása
- Bonyolultabb alakzatok és görbék
  - pl. nem analitikusan megadott alakzatok
- Különböző alakzatok együttes kezelése
- A paramétertér optimális felbontása
- Többfelbontású eljárások

Egyenes a kép- és a paramétertérben



(a) Az egyenes egyenlete a **képtérben** (K-tér): $y = mx + c$

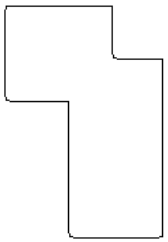
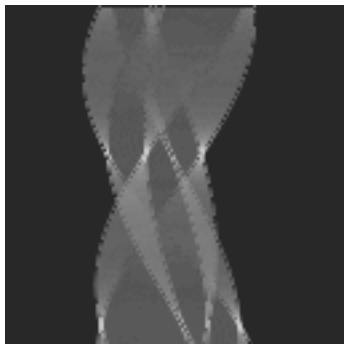
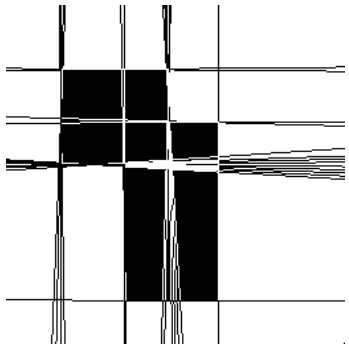
(b) Az egyenlet a **paramétertérben** (P-tér): $c = -mx + y$

- szavazás: pont a K-térben $\longrightarrow$ egyenes a P-térben

$\rightarrow$ egyenes mentén növeljük az akkumulátorcellákat

- az AB egyenes $\longrightarrow$ két egyenes metszéspontja a P-térben

Egyszerű detektálási példa polárkoordinátákkal

bemeneti kép élek akkumulátor (θ, d) eredmény[1]

- Az $y = mx + c$ alak nem igazán jó: $m, c \in [-\infty, \infty]$
- Polárkoordinátás alak: $d = x \cos\theta + y \sin\theta$
  - korlátos változók $\longrightarrow$ diszkrét akkumulátortömb
  - egyenesek helyett szinuszgörbék
- A feltöltött akkumulátortömb feldolgozása
  - az alsó korlát (küszöbparaméter) feletti lokális maximumok

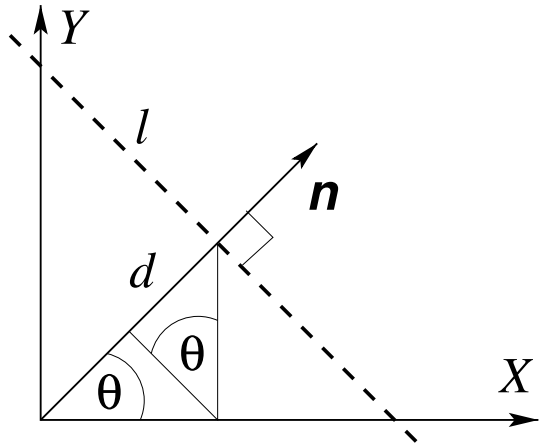
  $\rightarrow$ „fantom” egyenesek is megjelenhetnek

[1] Forrás: homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hough.htm

Az élorientáció felhasználása

Az l egyenes paraméterezése:

- θ: az **n** normális szöge ($\|\mathbf{n}\| = 1$)
- d: az egyenes távolsága az origótól



- Az éltérképen (x, y): az él helye, θ: a gradiens iránya
- Minden kis szakasz egy **pontra** szavaz a (θ, d) térben
  - $\rightarrow$ minden élpont egyetlen akkumulátorcellára szavaz
    - $\theta = \arctan n_y/n_x, \quad d = xn_x + yn_y$
- A műveletek száma drasztikusan csökken, de:
  - figyelembe kell venni az élirány pontatlanságát
  - $\rightarrow$ nagy d-nél elmosódik a klaszter az akkumulátorban

Tartalom

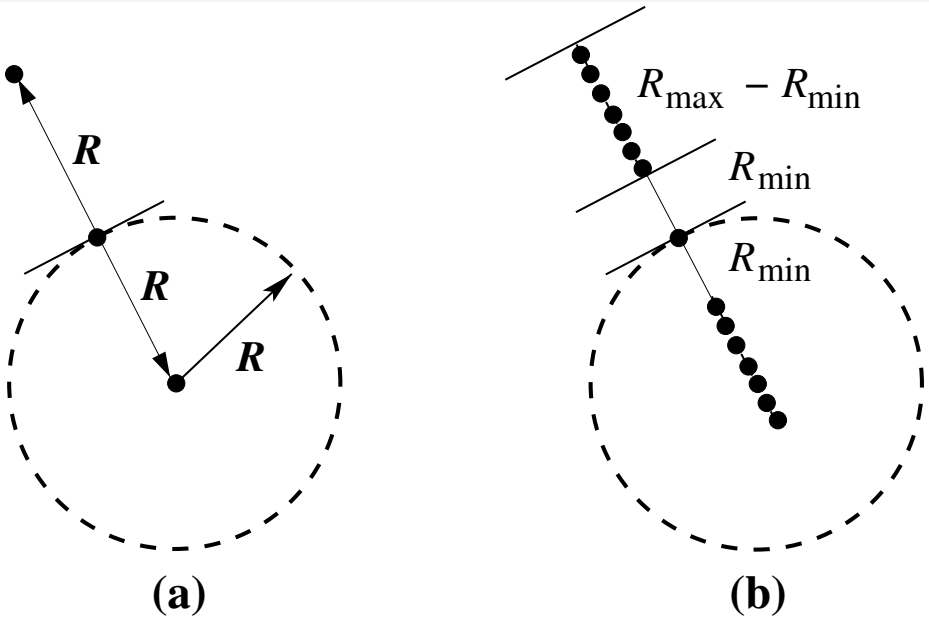
1 A modellillesztés nehézségei

2 Hough-transzformáció egyenesekre

3 Hough-transzformáció körökre
- Kördetektálási példák

4 A Hough-transzformáció további változatai
- A Hough-transzformáció összefoglalása

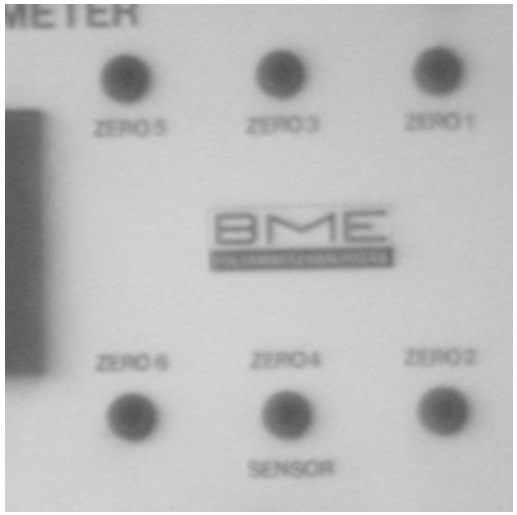
Kördetektálás élek felhasználásával



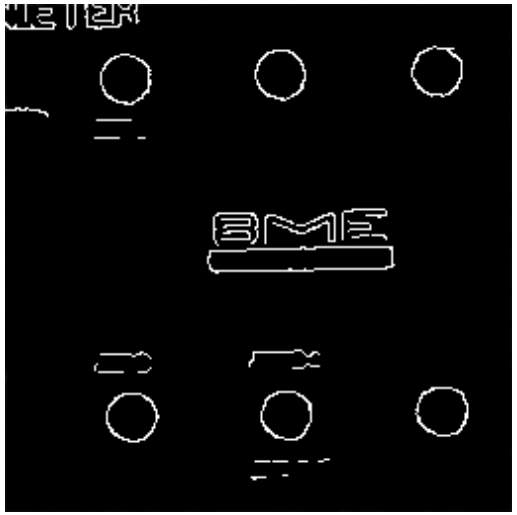
(a) Ismert sugár
- két akkumulátorcellát növelünk
- pontatlan élirány $\longrightarrow$ elmosódott cellacsoport

(b) A sugár az $[R_{min}, R_{max}]$ tartományba esik
- két szimmetrikus egyenesszakasz celláit növeljük
- a generált szakaszok hossza: $R_{max} - R_{min}$

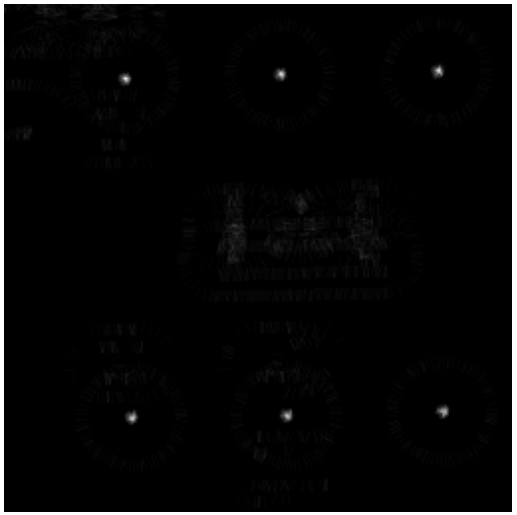
Szabályos körök 1/2



bemeneti kép



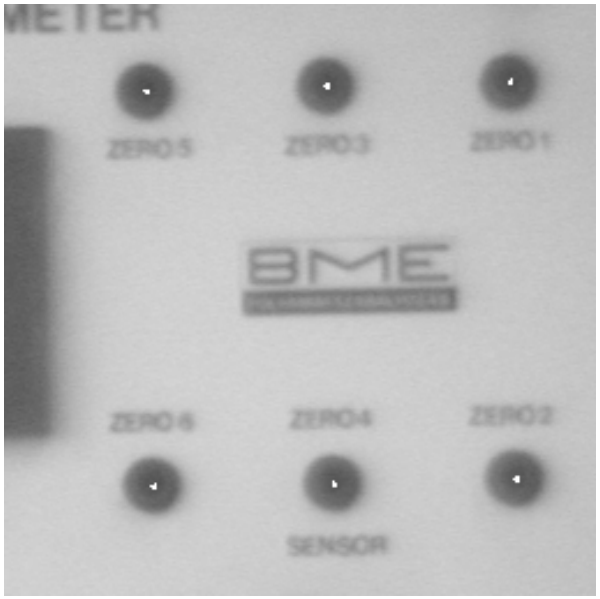
éltérkép



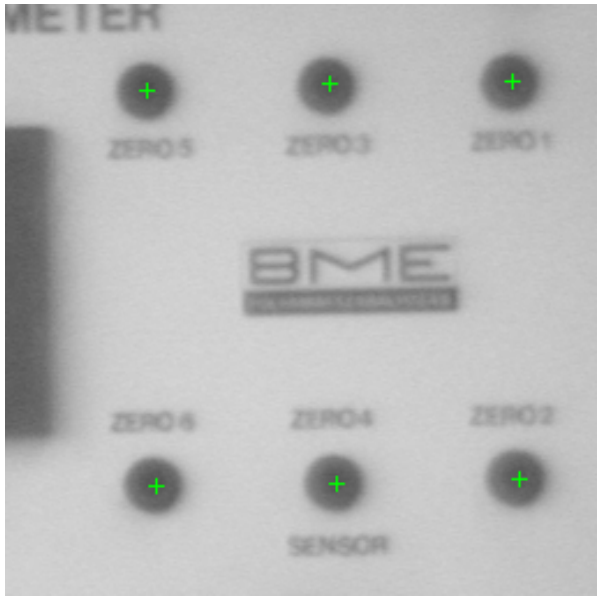
akkumulátorkép

- Éldetektálás: 7×7-es Canny-operátor
  - $\rightarrow$ az élnormálisok iránya
- Feldolgozott, normalizált akkumulátorkép
  - a maximális érték $\longrightarrow$ 255

Szabályos körök 2/2



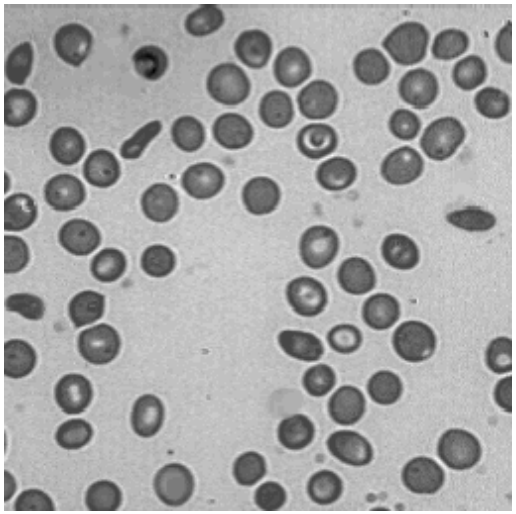
a körök középpontjai



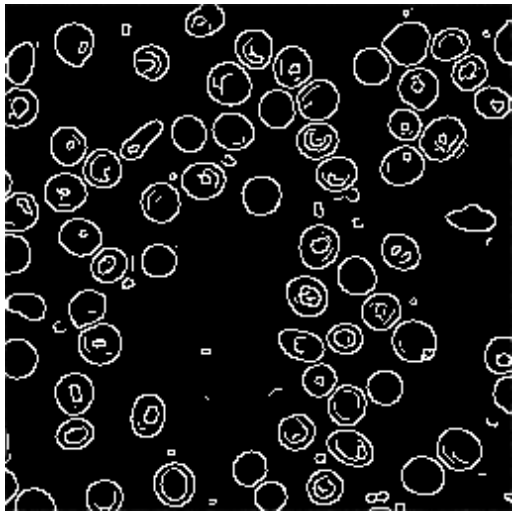
sötét foltok

- Középpontok: binarizált (Otsu), vékonyított akkumulátor
- Foltdetektálás skálatérben (méret: 30–35 pixel)
- A Hough-féle pozíciók pontosabbak (?)

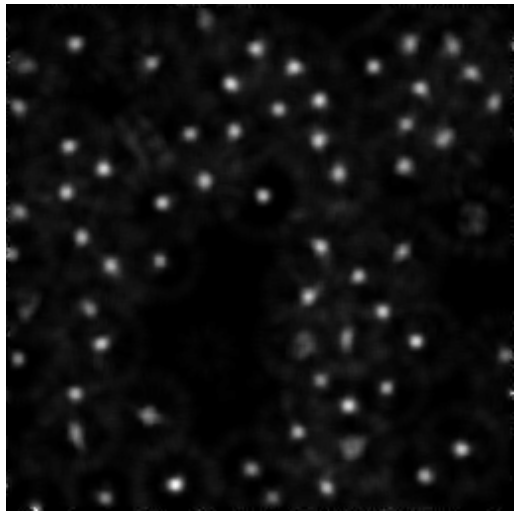
Vérsejtek 1/2



bemeneti kép



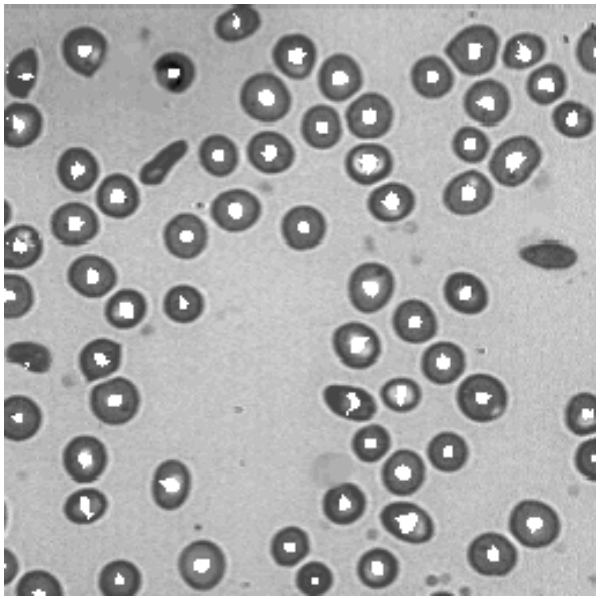
éltérkép



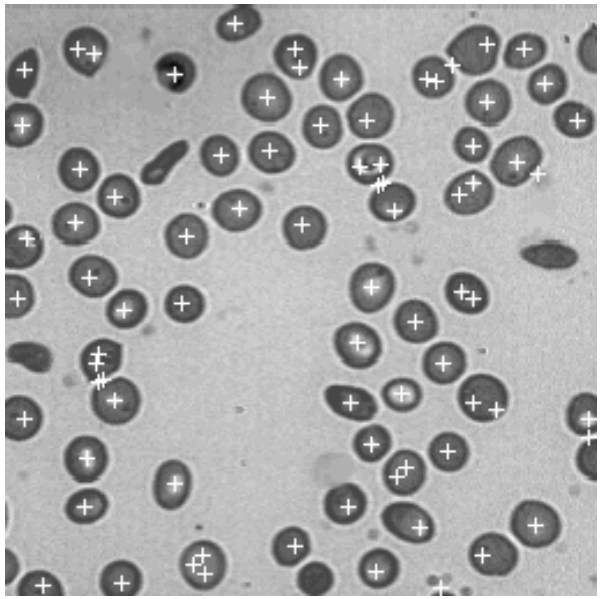
akkumulátorkép

- Éldetektálás: 7×7-es Canny-operátor
- Feldolgozott, normalizált akkumulátorkép
  - simítás 5×5-ös dobozszűrővel
  - a maximális érték $\longrightarrow 255$

Vérsejtek 2/2



a körök középpontjai

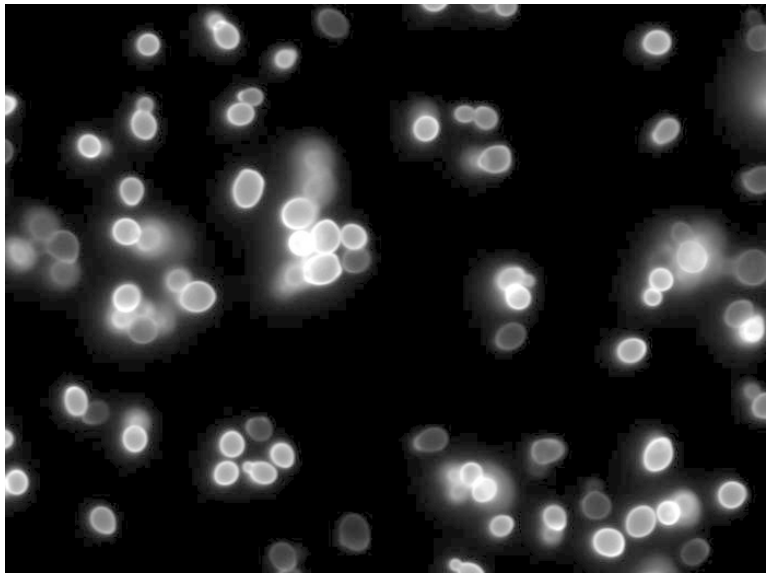


sötét foltok

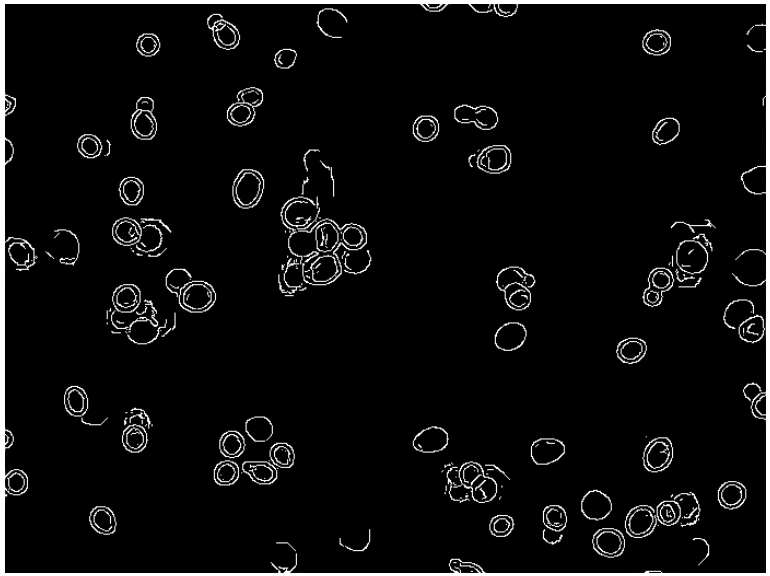
- Jobbra: méretinvariáns foltdetektálás skálatérben
  - hasonló eredmények
- Sok sejt inkább ellipszis, mint kör

  $\rightarrow$ pontatlan, elmosódott középpontok

Sejtek 1/2



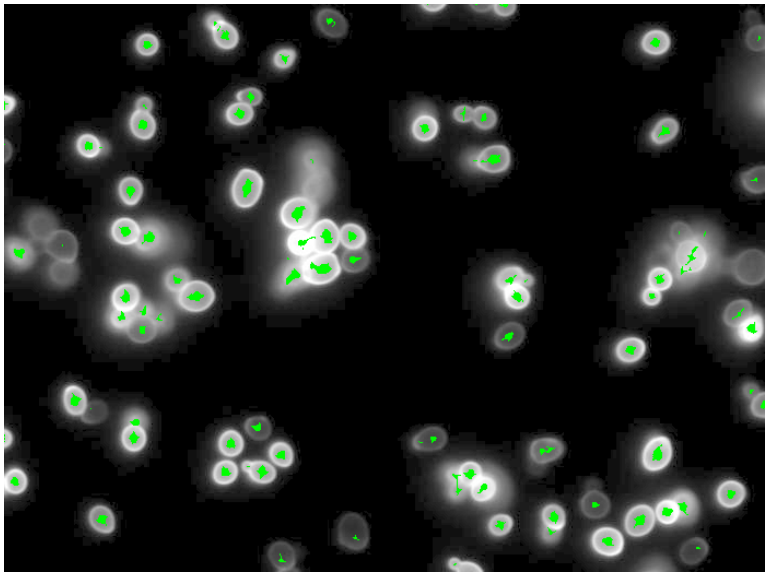
bemeneti kép



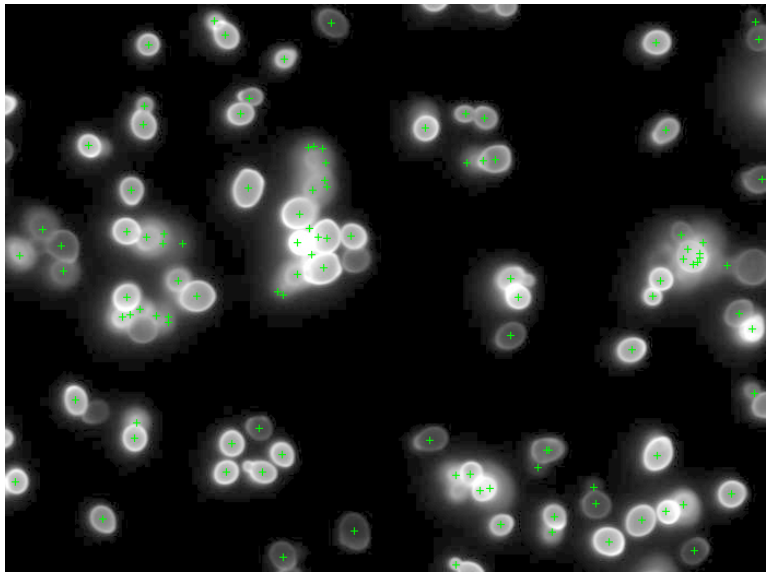
éltérkép

- Egyes sejtek kis kontrasztja $\longrightarrow$ hiányzó kontúrok
  - $\rightarrow$ kisebb akkumulátorérték $\longrightarrow$ zajérzékenység
- Világos sejthatárok $\longrightarrow$ kettős kontúrok
  - ez nem okoz problémát

Sejtek 2/2



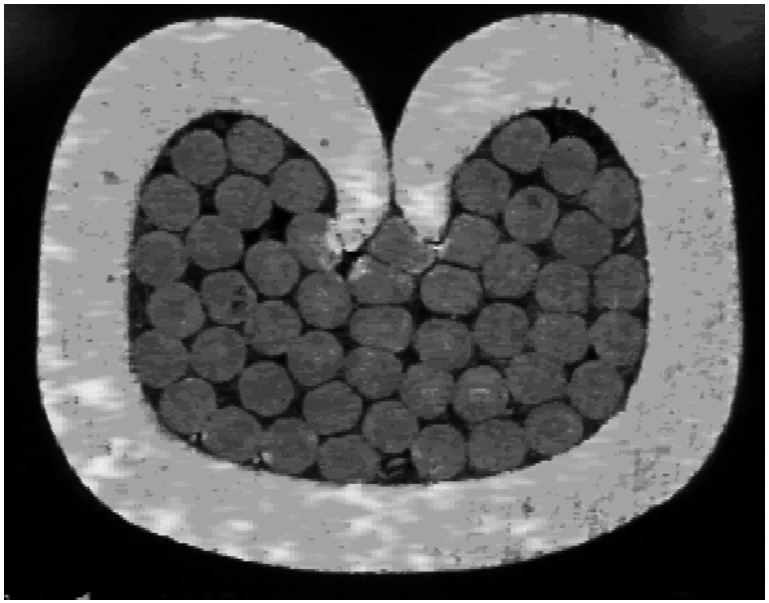
a körök középpontjai



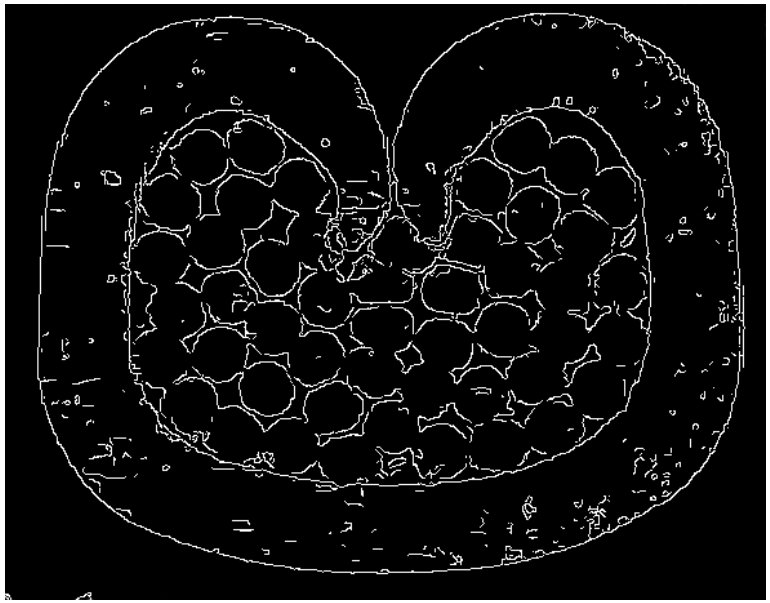
világos foltok

- Sok sejt inkább ellipszis, mint kör
  - → pontatlan, elmosódott középpontok
- Jobbra: méretinvariáns világosfolt-detektálás
  - pontosabb, több sejtet talál
  - de több a téves detektálás (?)

Kábel keresztmetszete 1/2



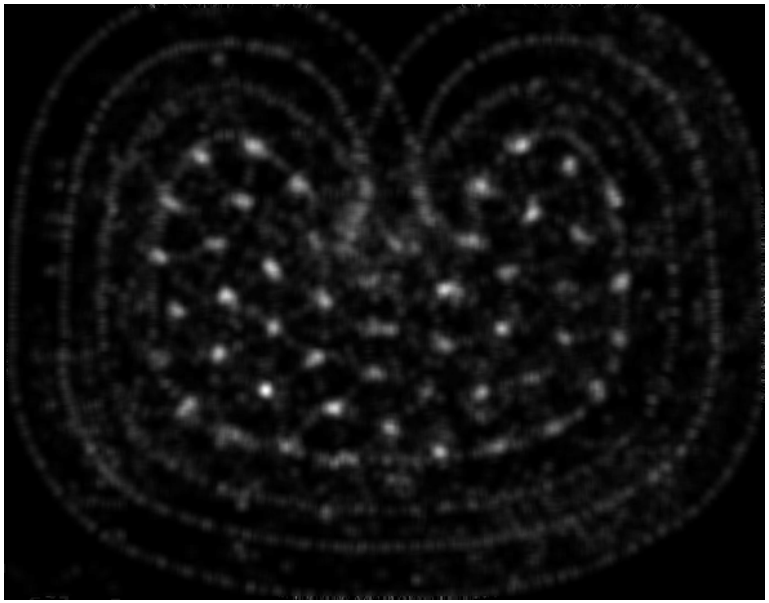
bemeneti kép



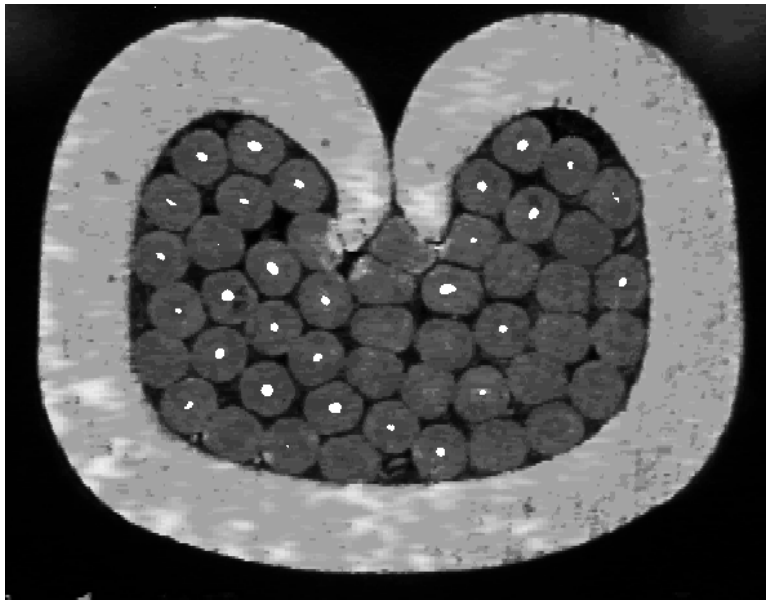
éltérkép

- Kis kontraszt $\longrightarrow$ hiányzó kontúrok
- A kábelerek torzult körök
  $\rightarrow$ zajérzékenység, pontatlanság

Kábel keresztmetszete 2/2



akkumulátorkép



a körök középpontjai

- Sok kábelér elvész
  - alacsony küszöb (több találat) $\longrightarrow$ téves detektálások
- A foltdetektor itt **nem alkalmazható**
  - az erek érintkeznek
  - nincs körülöttük háttér

Tartalom

1 A modellillesztés nehézségei

2 Hough-transzformáció egyenesekre

3 Hough-transzformáció körökre
- Kördetektálási példák

4 A Hough-transzformáció további változatai
- A Hough-transzformáció összefoglalása

Továbbfejlesztési irányok

- Bonyolultabb alakzatok és görbék kezelése
  - nem analitikusan megadott görbék

  → **általánosított Hough-transzformáció**
- Különböző alakzatok együttes kezelése

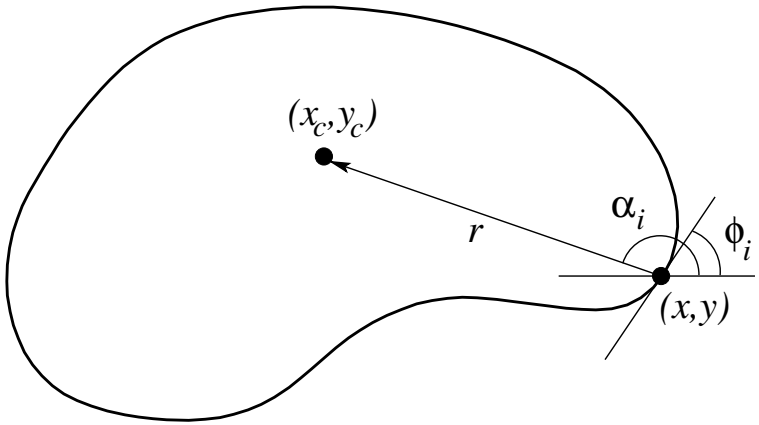
  → **randomizált Hough-transzformáció**
- Az akkumulátortömb optimális felbontása

  → többfelbontású eljárások

Az általánosított HT (GHT) működési elve 1/2

R-tábla

mért ϕ_k	sugarak $\mathbf{r}^k$
ϕ_1	$\mathbf{r}^1_1, \mathbf{r}^1_2, \ldots, \mathbf{r}^1_{N_1}$
ϕ_2	$\mathbf{r}^2_1, \mathbf{r}^2_2, \ldots, \mathbf{r}^2_{N_2}$
$\ldots$	$\ldots$
ϕ_m	$\mathbf{r}^m_1, \mathbf{r}^m_2, \ldots, \mathbf{r}^m_{N_m}$



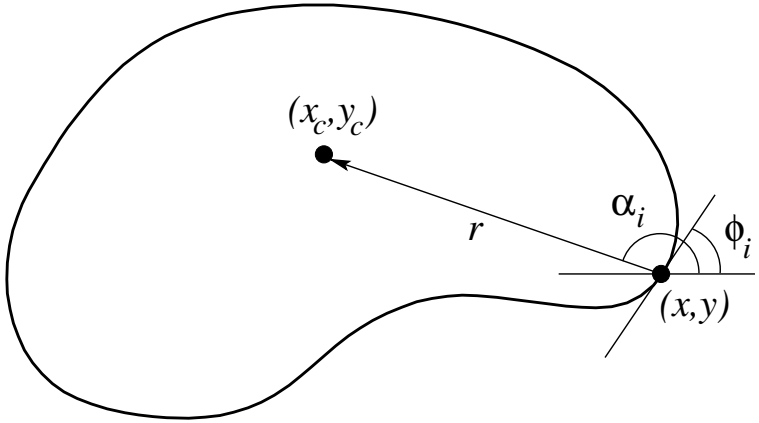
1. lépés: a mintaalakzat bejárása és az ***R*-tábla** felépítése

- Referenciapont (x_c, y_c) a mintaalakzaton belül
  - pl. a súlypontot
- Egy ϕ_k élirányhoz több $\mathbf{r} = (r, \alpha)$ sugár is tartozhat
  - az alakzat különböző pontjaiban

Az általánosított HT (GHT) működési elve 2/2

R-tábla

mért ϕ_k	sugarak $\mathbf{r}^k$
ϕ_1	$\mathbf{r}_1^1, \mathbf{r}_2^1, \ldots, \mathbf{r}_{N_1}^1$
ϕ_2	$\mathbf{r}_1^2, \mathbf{r}_2^2, \ldots, \mathbf{r}_{N_2}^2$
$\ldots$	$\ldots$
ϕ_m	$\mathbf{r}_1^m, \mathbf{r}_2^m, \ldots, \mathbf{r}_{N_m}^m$



2. lépés: az adott alakzat keresése a bemeneti éltérképen

- Minden ϕ_k irányú (x, y) élpontban:
- minden $\mathbf{r}^k$-ra egy szavazat a **referenciapont-akkumulátorba**
  - $x_c = x + r(\phi_k)\cos(\alpha(\phi_k))$, $y_c = y + r(\phi_k)\sin(\alpha(\phi_k))$

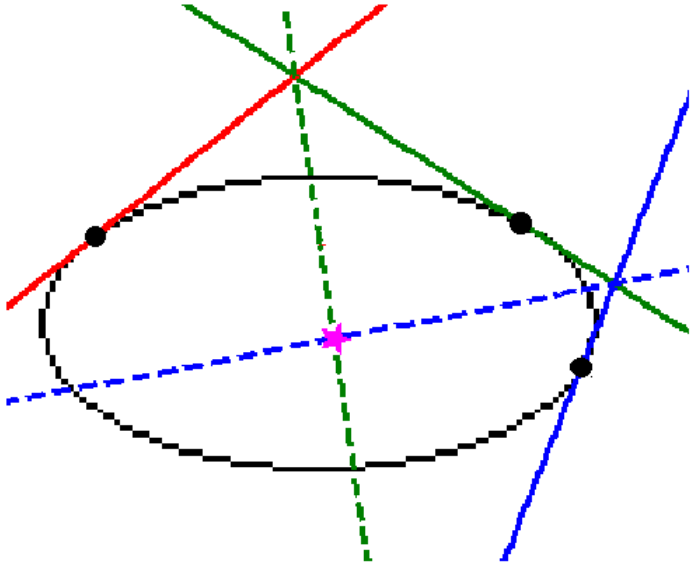
Randomizált HT: a Hough és a RANSAC találkozása

- RANSAC: **RANdom SAmple Consensus** (véletlen minták konszenzusa)
- Az RHT és a RANSAC is paraméterezett görbékre való
- Véletlenszerűen annyi pontot választunk, amennyi a modell becsléséhez kell
  - → pl. egyeneshez két pontot
- Az élirány-információval a pontok száma csökkenthető
  - → pl. ellipszishez 3 pont az élirányokkal
- A kiválasztott pontokkal a modellre szavazunk a paramétertömbben

RHT egyenesekre

- Paramétertömb: m, c vektor és egy n számláló
- Az i-edik véletlen pontpár $\longrightarrow m_i, c_i$
- m_i, c_i összevonása a korábbi m_k, c_k, n_k cellákkal, $k < i$
  - $\rightarrow$ ha m_i, c_i és m_k, c_k távolsága $< \delta$,
  - $\rightarrow$ akkor $n_k \leftarrow n_k + 1$
- Ha nem vonható össze, új cellát nyitunk: m_i, c_i és $n_i = 1$
- A paramétertömbben való kereséshez hatékony adatszerkezet kell

RHT ellipszisre ismert élirányokkal



- Három kontúrpont az érintőirányokkal
- Minden felezőegyenes a középpont felé mutat
- Két felező a középpont közelében metszi egymást
  - $\rightarrow$ kiszámítjuk a metszéspontot, és a **középpontra szavazunk**

A HT előnyei

- Robusztus a kiugró pontokkal szemben
- Robusztus a hiányzó, zajos adatokkal szemben
- Hatékonyan használja fel az élirányokat
- Analitikusan vagy mintával megadott alakzatok
- Különböző modellek együttes kezelése
- RHT: a paramétertér változó felbontása
  $\rightarrow$ gyorsabb szavazás

A HT hátrányai

- Sűrű pont- vagy élhalmaz a képen gondot okozhat
  - véletlen elrendeződést is alakzatnak, görbének detektál
- Több paraméter $\longrightarrow$ több számítás, kisebb robusztusság
- Az élirányok együttes felhasználása $\longrightarrow$ kisebb pontosság
- A gyakorlatban főleg egyenesekre és körökre használják
- A látszólagos kiugró pontok gondot okozhatnak
  - pl. kis görbületű görbék egyenesek keresésekor
- Nem könnyű a paramétertér optimális felbontását megadni