

A satellite in space, viewed from a distance, with several solar panels extended. The satellite is positioned on the left side of the frame, and the background is a bright, hazy sky.

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar**

Térinformatikai és távérzékelési alkalmazások fejlesztése

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Giachetta Roberto, Cserép Máté
mcserep@inf.elte.hu
<http://mcserep.web.elte.hu>

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Műveletek csoportosítása

- A térinformatikai műveleteknek számos feladata
 - alapvető *térbeli műveletek* szabványosítottak (SFA)
 - általában a topológiai térben hajtódnak végre
 - távérzékelte felvételek feldolgozása során nem csak térbeli, de *spektrális (intenzitás) műveleteket* is végezhetünk
 - a térbeli műveletek esetén magát a képi tartalmat kell transzformálnunk
- A műveletek az eredmény képzése szempontjából lehetnek helyben dolgozó (*in-place*), vagy külön adathalmazba dolgozó műveletek (*out-place*)
 - a helyben feldolgozás nem minden esetben oldható meg

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Műveletek munkaterülete

- A raszteres műveletek csoportosíthatóak munkaterület (workspace) alapján:
 - *lokális*: egy képpontból egy képpontot állít elő
 - *fokális*: képpontok (adott sugarú) csoportjából egy képpontot állít elő
 - *regionális*: (szomszédos) képpontok csoportjából képpontok csoportját állítja elő
 - *globális*: munkaterülete a teljes kép (vagy a képi statisztika), amelyből a teljes eredményképet állítja elő
- A műveletek kapcsán megkülönböztethetjük még az egy sávon, illetve több sávon dolgozó algoritmusokat

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Műveletek munkaterülete

- A munkaterület az algoritmusok párhuzamosítása során játszik szerepet
 - sok esetben a műveletek párhuzamosíthatóak a konkrét algoritmus ismerete nélkül, munkaterület alapján
 - lokális és fokális műveletek bármely képpontra párhuzamosíthatóak
 - regionális esetben a művelet párhuzamosítható (egymást átfedő tartományokra), de a keletkezett információkat össze kell futtatni (pl. átfedő területek újrafeldolgozása)
 - globális esetben általában egyedi megközelítés szükséges

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Geometriai transzformációk

- Távérzékelte felvételek feldolgozásánál az előfeldolgozás és az utófeldolgozás során is szükséges lehet geometriai transzformációk végrehajtása
 - az előfeldolgozás során egyrészt geometriai hibák korrigálására, másrészt vetületi rendszerbe való transzformációra szolgálnak
 - a geometriai hibák forrásai:
 - a föld elhajlása és forgása a felvételezés közben
 - a szenzor véges pásztázási sebessége és nagy lefedett területe, szenzorhibák
 - a felvételező magassági, sebességi és pontossági eltérései

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Geometriai transzformációk

- A geometriai transzformációk legegyszerűbb csoportja a *lineáris*, vagy *affin transzformációk*:
 - lineáris leképezések segítségével hajthatóak végre, azaz az $x \mapsto Ax + b$ hozzárendeléssel, ahol A a transzformációs mátrix, b az eltolási vektor
 - a kifejezés megadható mátrixtranszformációs alakban is (a b vektor elhanyagolható, ha nincs eltolás):

$$\begin{bmatrix} \vec{u} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vec{b} \\ 0, \dots, 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{x} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Geometriai transzformációk

- elforgatás órajárással ellentétesen:

$$\begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{bmatrix}, \text{ ahol } \Theta \text{ az elforgatás szöge}$$

- átméretezés (skálázás):

$$\begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix}, \text{ ahol } s_x \text{ a vízszintes, } s_y \text{ a függőleges mérték}$$

- ferdtítés (nyírás) a vízszintes tengelyre:

$$\begin{bmatrix} 1 & k \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ ahol } k \text{ az eltolás mértéke}$$

- ferdtítés (nyírás) a függőleges tengelyre:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{bmatrix}, \text{ ahol } k \text{ az eltolás mértéke}$$

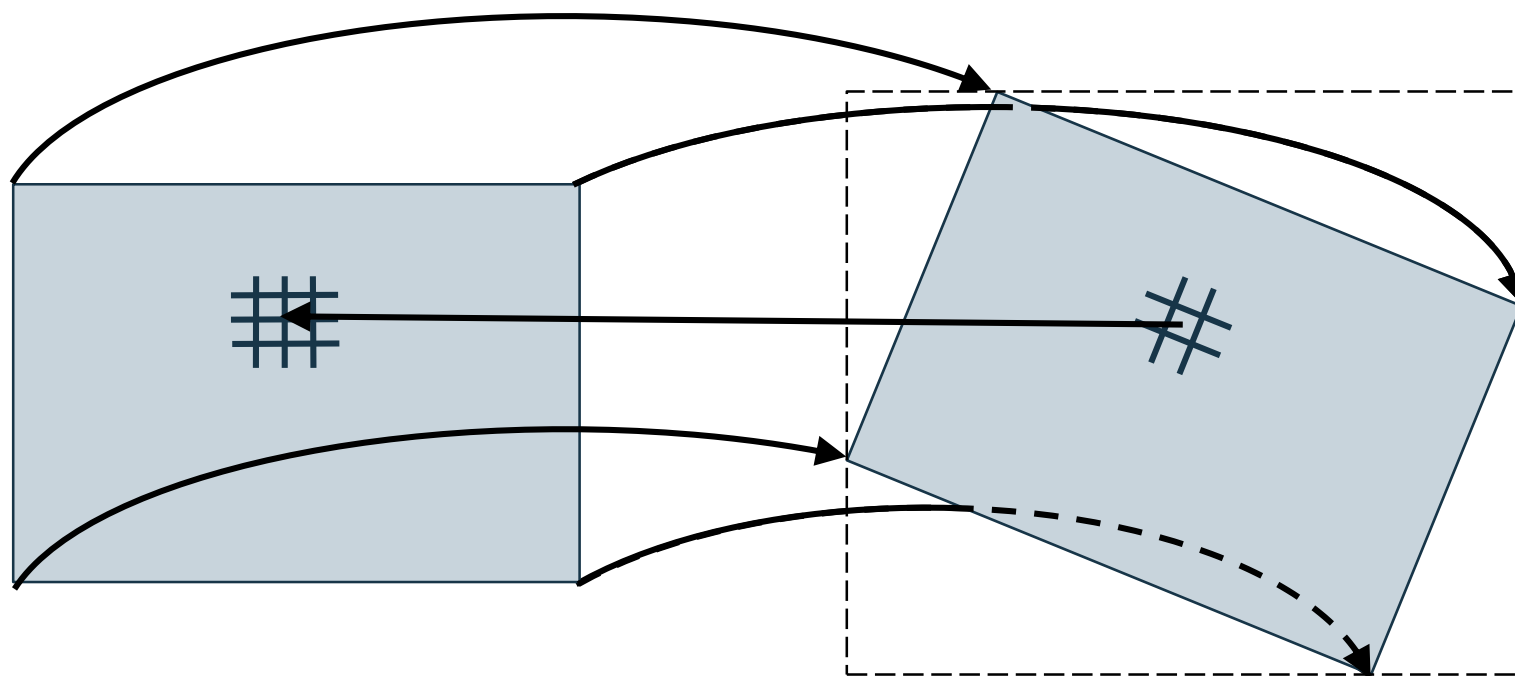
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Geometriai transzformációk

- A felvétel transzformációja több lépésben történik:
 1. transzformációs mátrix kiszámítása
 2. eredménykép méretének meghatározása a sarokpontok transzformációjával
 3. inverz transzformációs mátrix meghatározása
 4. eredménykép valamennyi képpontjához tartozó képpont(ok) meghatározása az inverz transzformációval, ez a *mintavételezés*
- A forráspont meghatározásakor a transzformáció nem garantált, hogy egész koordinátaértéket ad, ebben az esetben *interpolációt* kell végeznünk

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Geometriai transzformációk



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Geometriai transzformációk

- Pl. tegyük fel, hogy egy Landsat műholdfelvételt készítünk Sydney városáról, ekkor a következő geometriai korrekciókat kell végeznünk:
 - a műhold szkennereinek felvételező sajátossága miatt a függőleges felbontás 79 m-ről 56 m-re csökken a pásztázáskor, így függőleges $(\frac{79}{56} = 1.411\text{-szeres})$ átméretezésre van szükség
 - a föld forgása miatt (0.056-os mértékű) vízszintes ferdtést alkalmazunk
 - a műhold 9°-os eltéréssel felvételez az északi-déli tájoláshoz képest, ezt forgatással korrigáljuk

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Geometriai transzformációk

- a föld elhajlás vízszintes átméretezéssel korrigálható a $\tan \Theta / \Theta$ képlettel, ahol Θ a felvételkészítés szöge, ez megadható a vízszintes távolság (x), illetve a magasság (h) függvényében is:

$$\begin{bmatrix} \tan \Theta / \Theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h}{x} \tan^{-1} \left(\frac{h}{x} \right) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- mivel a leképezést invertáljuk, ezért előbb kombináljuk a transzformációkat, majd inverzet számunk, pl. az

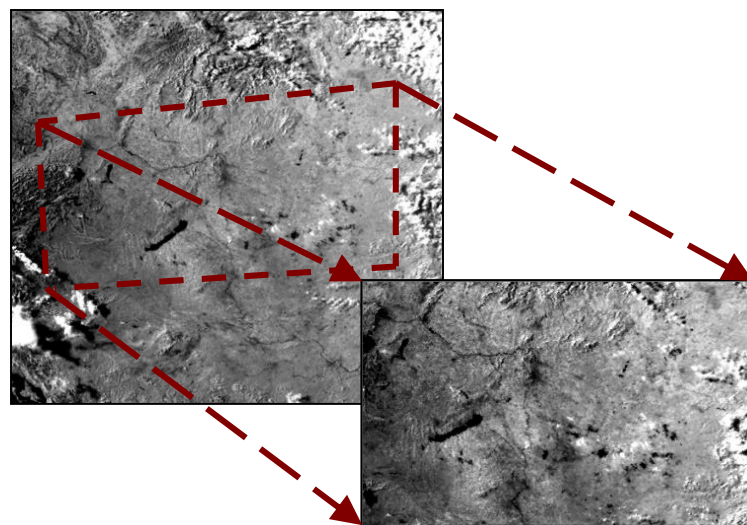
$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.056 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1.411 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \text{ invertálva az}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.056 \\ 0 & 0.709 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \text{ leképezést adja}$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Georeferálás

- A távérzékelte felvételek kezdetben csak képi koordinátákkal rendelkeznek, ehhez társíthatóak a földrajzi koordináták
 - a képi koordinátarendszer megfeleltetését a földrajzi koordinátarendszernek *georeferálás*nak nevezzük
 - a földfelszíni koordinátákat kontrollpontok segítségével társíthatjuk a képhez
 - a kontrollpontokat olyan pozíciókra definiáljuk, amelyeknek ismert a földrajzi koordinátája



Távérzékelte felvételek feldolgozása

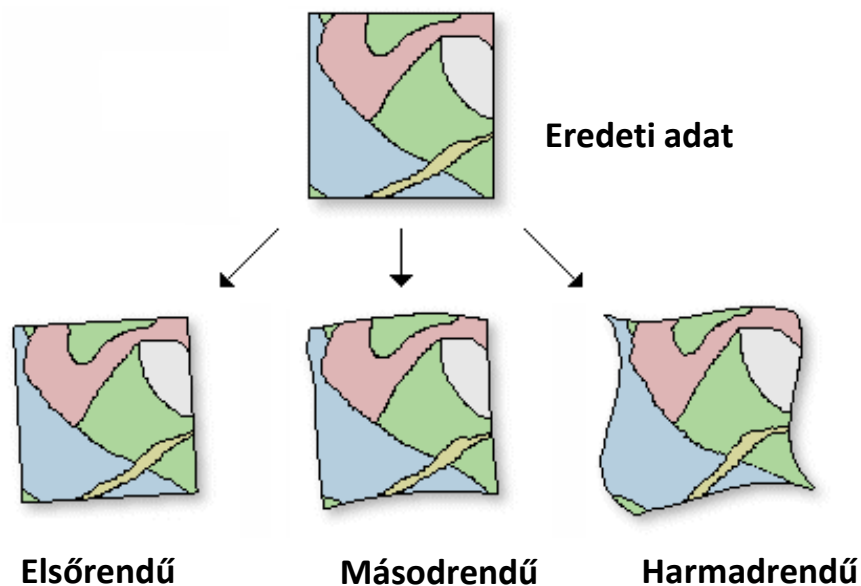
Georeferálás

- A képi koordináta (x, y) és a földrajzi koordináta (u, v) megfeleltetése esetén a transzformációs mátrixot számítanunk kell
 - ennek közelítő megoldását adjuk meg interpolációs polinom formájában: $(x, y) = F(u, v)$, ahol F adott fokszámú polinom, amelynek az együtthatóit kell meghatároznunk
 - a leképezést felbontjuk vízszintes és függőleges irányra, és külön számoljuk a leképezést: $x = F_x(u, v)$, $y = F_y(u, v)$
 - a polinom fokszáma meghatározza, minimum hány kontrollpont szükséges a leképezéshez (pl. másodfokú polinom esetén 3, harmadfokú esetén 6, ...), általában a harmadfokú közelítés elég pontos

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Georeferálás

- A polinom fokszáma meghatározza, minimum hány kontrollpont szükséges a leképezéshez (pl. másodfokú polinom esetén 3, harmadfokú esetén 6)
- Minél magasabb a transzformáció fokszáma, annál komplexebb transzformáció írható le.
- Általában a harmadfokú közelítés elég pontos.



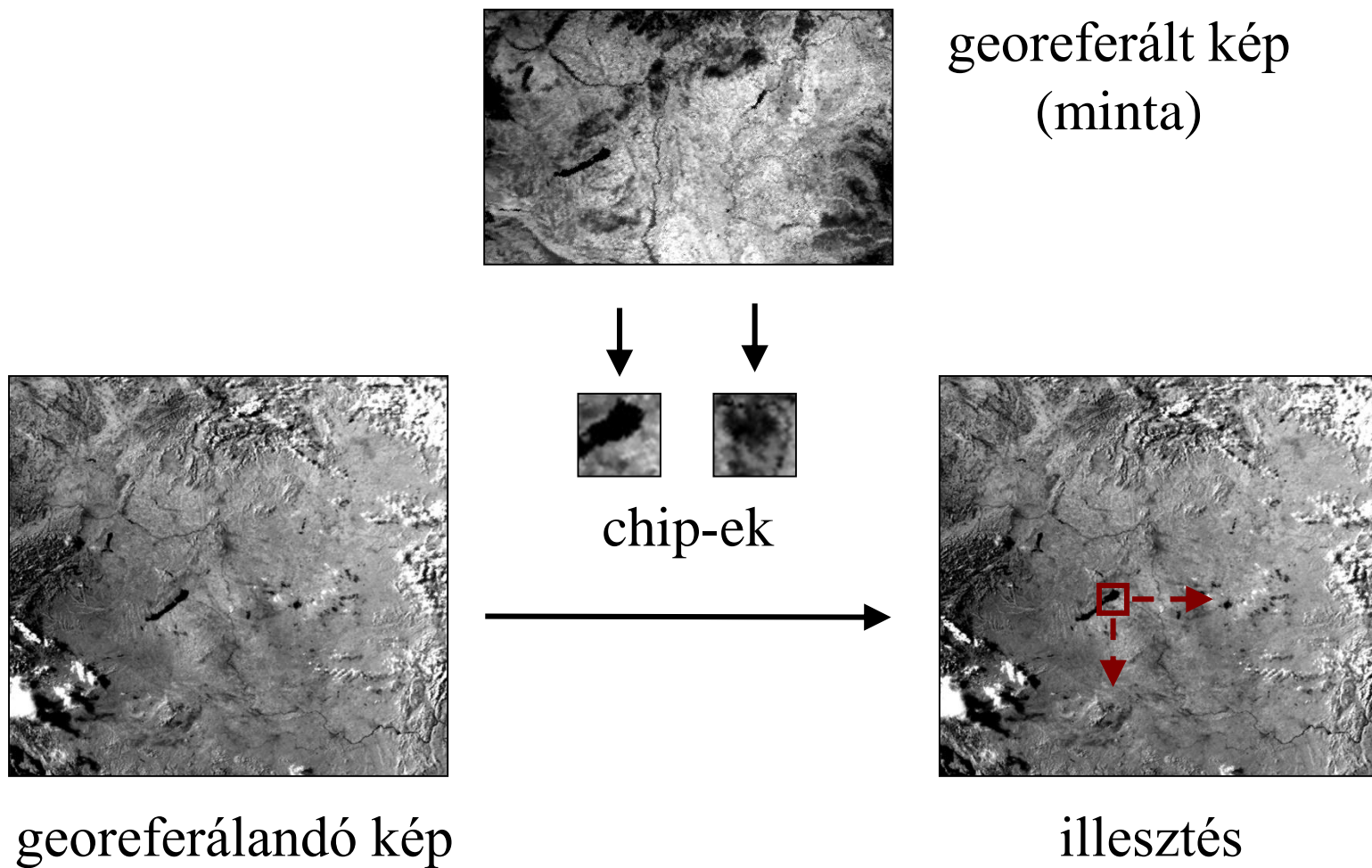
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Georeferálás

- Amennyiben nem definiálhatóak kontrollpontok, használhatunk a területet (részben) lefedő georeferált felvételeket
 - a kontrollpontokat mintaillesztéssel választjuk ki a két felvételen megfelelő részképek illeszkedésének keresésével (*chip-matching*)
 - a részképeket (chip-eket) úgy választjuk ki, hogy jól differenciált képrészeket tartalmazzanak (pl. szórás alapján)
 - a részképeket végigfuttatjuk a georeferálandó felvételen, a legjobb illeszkedési pontokat választjuk ki kontrollpontnak
 - mivel nagyobb a tévedés esélye, érdemes sok kontrollpontot használni, és kiválogatni a legjobbakat

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Georeferálás

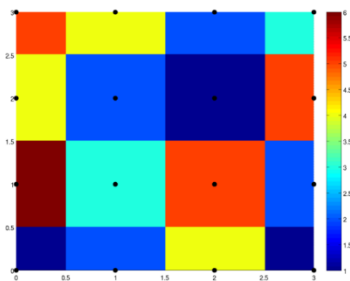


Távérzékelte felvételek feldolgozása

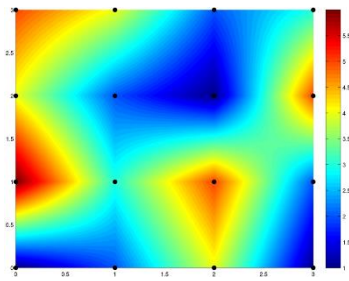
Geometriai transzformációk

- Az interpolációs technikák figyelembe vehetik egy adott képpont rögzített környezetét (nem adatív), illetve tartalomfüggő környezetét (adatív)

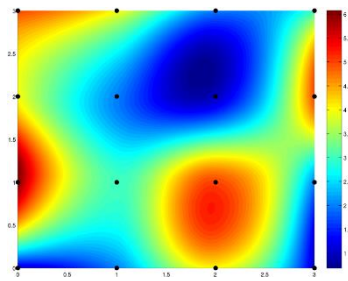
- pl.:



lineáris (1)



kettős lineáris (2)



kettős köbös (4)

- nemkívánatos hatások: pixelesedés (aliasing), elmosódás, túlképzés (overshoot, edge halo)
- összetettebb transzformációk komplexebb interpolációkat követelnek meg (*spline*, *Lanczos*)

Távérzékelte felvételek feldolgozása

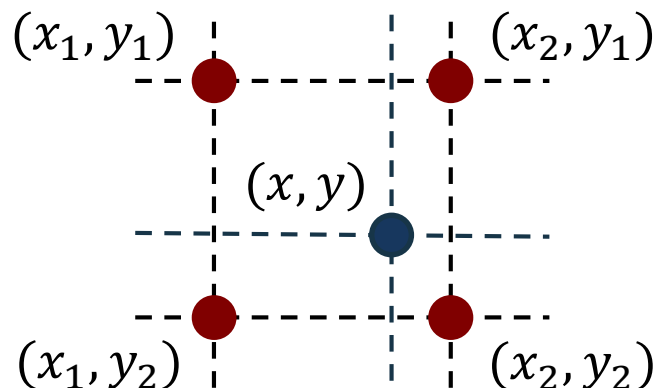
Geometriai transzformációk

- a kettős lineáris (*bilinear*) interpoláció:

$$I'(x, y_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} I(x_1, y_1) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} I(x_2, y_1)$$

$$I'(x, y_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} I(x_1, y_2) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} I(x_2, y_2)$$

$$I'(x, y) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} I'(x, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} I'(x, y_2)$$



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Spektrális műveletek

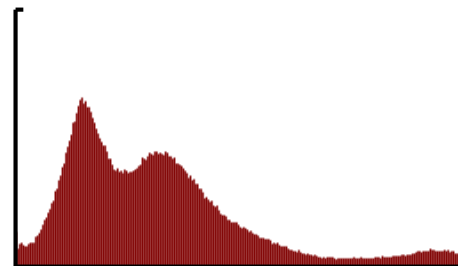
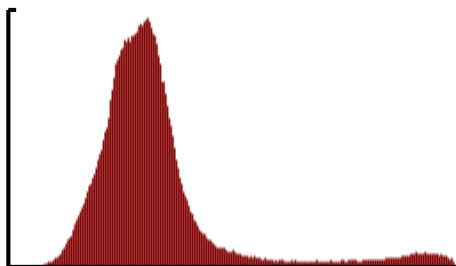
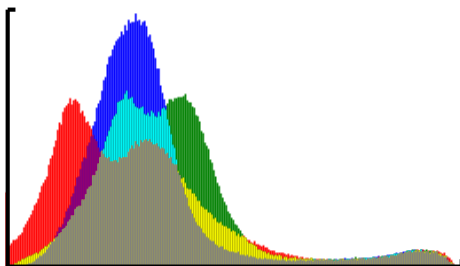
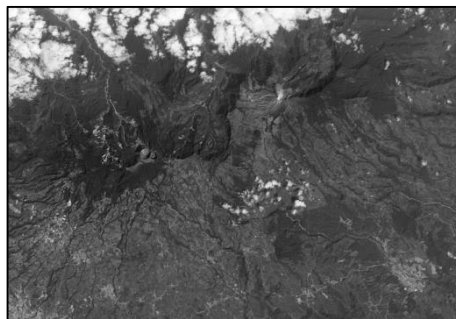
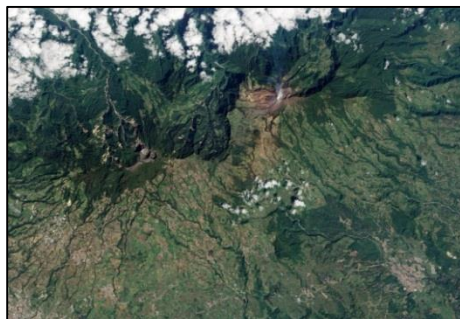
- Spektrális műveletek során a kép intenzitásértékeit módosítjuk, amelyhez alapvető információ a kép *spektrális*, illetve *radiometriai felbontása*
 - a spektrális felbontás megadja, a képi spektrum (10 nm és 300 μm hullámhossz között) mely tartományaiban tárol információkat
 - a radiometriai felbontás meghatározza, hogy az intenzitás milyen tartomány értékeit veheti fel
 - pl.: 8 bites felbontás esetén $2^8 = 256$ érték lehet
 - lehetőség van a felbontás megváltoztatására az eredeti (R) és az új felbontás (R') figyelembevételével:

$$I'(x, y) = I(x, y) \cdot 2^{R'-R}$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Hisztogram

- Alapvető raszteres képi statisztika a *képi hisztogram*, amely a radiometriai felbontásnak megfelelő skálán megadja, mely intenzitásértékekből mennyi található az adott spektrumtartományban



Távérzékelte felvételek feldolgozása

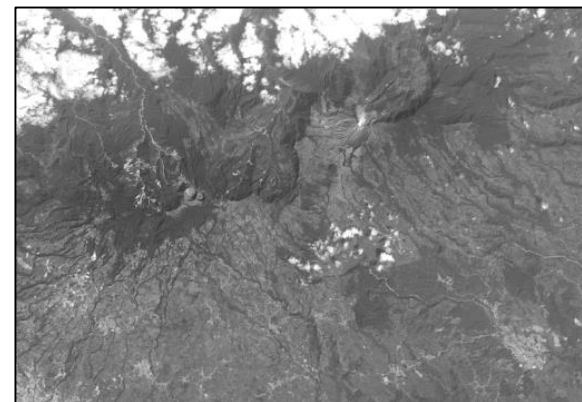
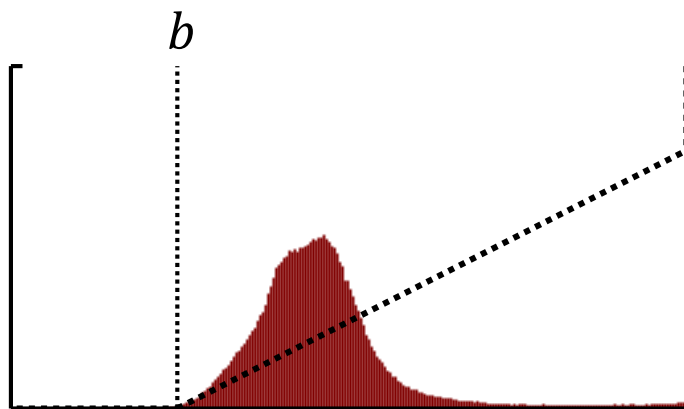
Hisztogramműveletek

- A leggyakoribb intenzitás transzformációk a távérzékelésben:
 - *kontrasztfokozás (contrast enhancement)*: a pontok intenzitás-értékei közötti különbségek növelése, főleg a képi hisztogram alapján
 - *küszöbölés (thresholding)*: fekete-fehér kép előállítása egy adott küszöbnél történő szétválasztással
 - *szomszédsági, vagy konvolúciós műveletek (neighbourhood operations)*: egy adott méretű konvolúciós mátrixszal való lineáris átképzése a képpontoknak
- A végrehajtás során mindig az intenzitástartományban kell maradnunk ($0 \dots 2^R - 1$), ezért a túlfutó értékeket megvágjuk

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Hisztogramműveletek

- *Függvény által definiált leképezés*: az intenzitásértékeket a megadott függvény szerint képezzük le az új tartományba
 - lineáris leképezés: $I'(x, y) = aI(x, y) + b$
 - logaritmikus és exponenciális leképezés



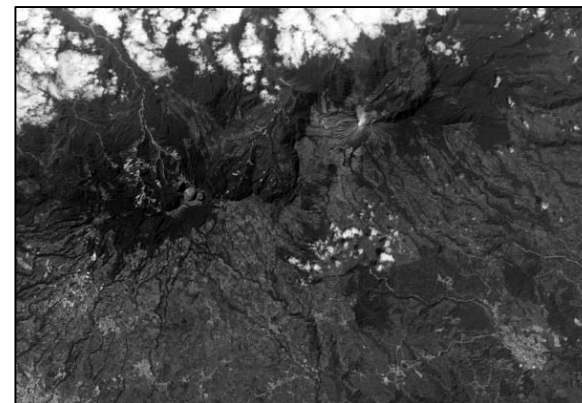
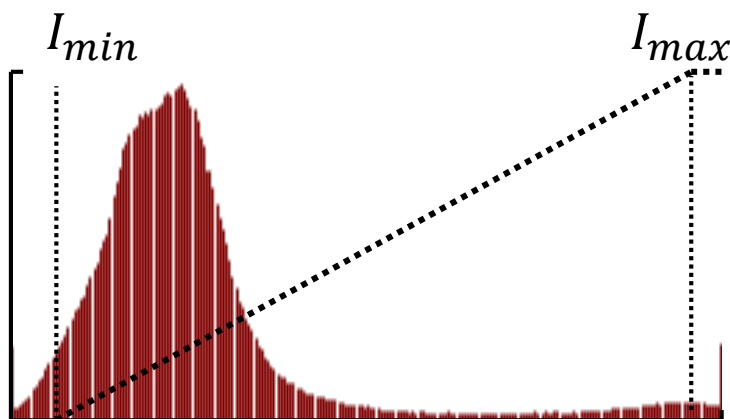
- *Pontenkénti leképezés*: kontrollpontok segítségével adjuk meg a leképezést, közöttük lineáris átmenetet alkalmazunk

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Hisztogramműveletek

- *Hisztogram széthúzás (saturating linear enhancement):* a hisztogram tartományát étképezzük a teljes tartományra (lehetővé teszi, hogy a kép a lehető legkontrasztosabb legyen információvesztés nélkül)

$$I'(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \cdot 2^R$$

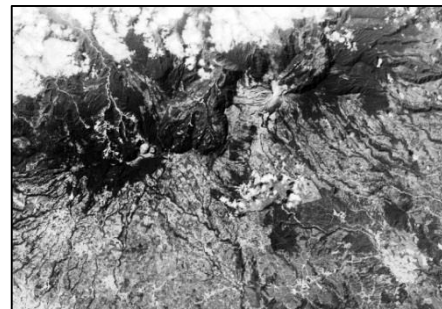
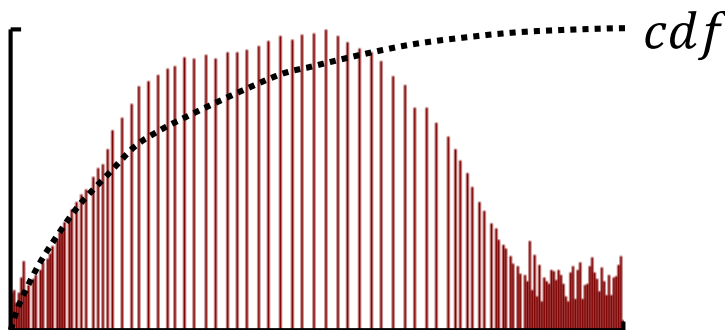


Távérzékelte felvételek feldolgozása

Hisztogramműveletek

- *Hisztogram kiegyenlítés*: a hisztogram széthúzása oly módon, hogy a sűrűbb területek nagyobb tartományt öleljenek át
 - ehhez szükségünk van a hisztogram kumulatív eloszlásfüggvényére (*cdf*): $cdf(x) = \sum_{i=0}^x \frac{h(i)}{N}$
 - ez alapján számolható a leképezés:

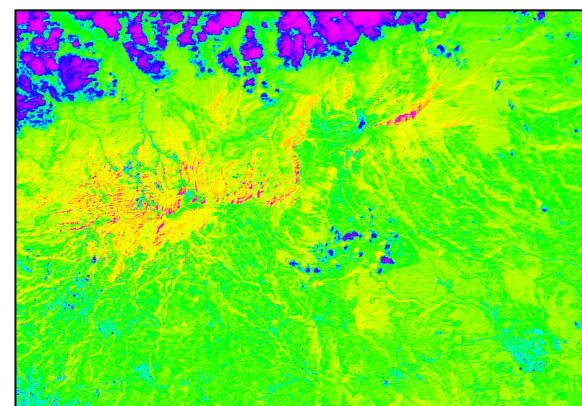
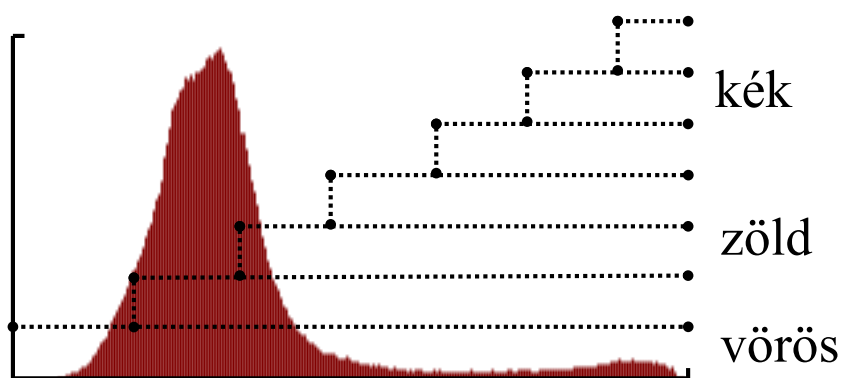
$$I'(x, y) = \frac{cdf(I(x, y)) - cdf(I_{min})}{cdf(I_{max}) - cdf(I_{min})} \cdot 2^R$$



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Hisztogramműveletek

- *Sűrűség szeletelés (density slicing)*: adott tartományok egy értékre való leképezése, ami történhet
 - *fekete-fehér tartományba*, ekkor lényegében egy diszkrét kontrollpontos leképezést definiálunk
 - *színes tartományba*, ha az egyes tartományokhoz színértékeket rendelünk, ekkor kapjuk az úgynevezett *pszeudoszínezett* képet



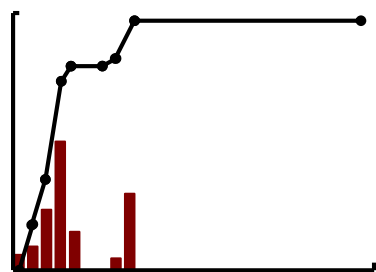
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Hisztogramműveletek

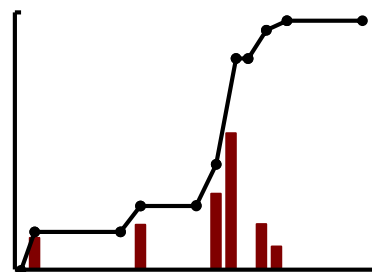
- *Hisztogram illesztés*: a hisztogramértékek illesztése egy másik (referencia) hisztogramhoz
 - olyan leképező függvényt (M) kell keresnünk, amelyre a kumulatív eloszlásfüggvény értékei egyeznek, tehát ha

$$cdf_I(i_I) = cdf_{ref}(i_{ref}), \text{ akkor } M(i_I) = i_{ref}$$

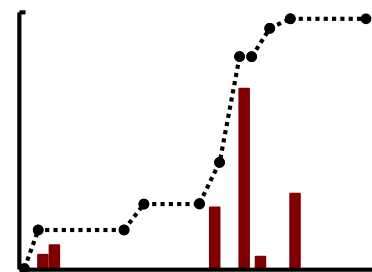
- például akkor hasznos, ha egy felvételt geometriailag illeszteni szeretnénk további felvételekhez



forrás



referencia



eredmény

Távérzékelte felvételek feldolgozása

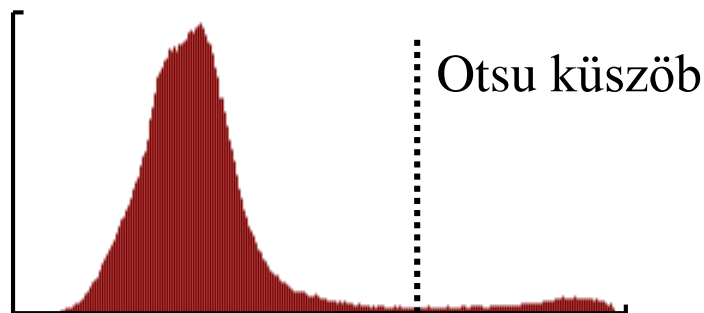
Hisztogramműveletek

- A *küszöbölés* során egy adott küszöbérték segítségével választjuk szét az intenzitásértékeket két osztályra
- A küszöbölés speciális változata az *Otsu küszöbölés*, ahol az osztályon belüli varianciát (σ_w^2) minimálisra vesszük:

$$\min_t \sigma_w^2(t) = \min_t [\omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t)]$$

- ehelyett az osztályok közötti varianciát maximalizáljuk:

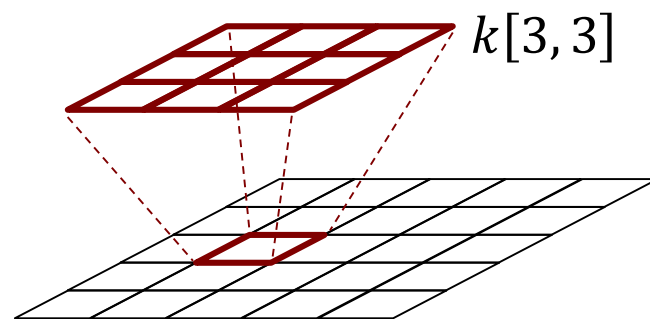
$$\max_t \sigma_B^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2$$



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

- A szomszédsági, vagy konvolúciós szűrések során egy adott pixel értékét befolyásoljuk a szomszéd pixelek értékei alapján
 - ehhez szükségünk van egy *konvolúciós mátrixra (kernel)*, amely megadja, milyen mértékben vesszük figyelembe a szomszédos képpontokat
- a mátrix alatt a középső értéket transzformáljuk
- a kernel mérete mindig páratlan ($k[2n - 1, 2n - 1]$, $n > 1$), és a mátrix értékei mellett tartalmazhat egy osztótényezőt (d , ált. $d = (2n - 1)^2$), valamint egy additív tényezőt (a , ált. $a = 0$)



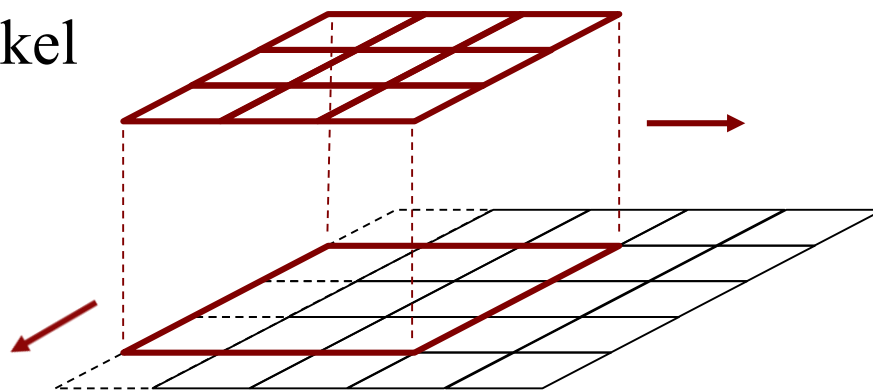
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

- a művelet során mindig a kernel alatti középső képpont intenzitásértékét befolyásolja a szomszédos értékek alapján:

$$I'(x, y) = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^{2n-1} \sum_{j=1}^{2n-1} I(x - n + i, y - n + j) \cdot t[i, j] + a$$

- a konvolúciós mátrixot lineárisan lefuttatjuk minden képpont felett, a képszélek mentén a szélső értékekkel kiterjesztjük a képet



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

- *Élsimítás, homályosítás (smoothing, low pass filtering):* részletek és képzaj eltüntetésére

- *lineáris simítás:* az értékek átlagát vesszük

$$I'(x, y) = \frac{1}{(2n-1)^2} \sum_{i=1}^{2n-1} \sum_{j=1}^{2n-1} I(x-n+i, y-n+j)$$

- *medián simítás:* a kernel alatti értékek mediánját vesszük, jobban megtartja az éleket, és jobban eltünteti a képzajt
- *Gauss simítás:* az értékeket normális eloszlással (Gauss függvényvel) simítjuk:

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

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

- a szűrők paraméterezhetőek egy w középérték súlytényezővel:

$$\frac{1}{w+8} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & w & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

lineáris simítás

$$\frac{1}{w+12} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & w & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Gauss simítás

- *Élesítés (sharpening, high-pass filtering):*
 - általában simítás alapján hozzuk létre, a simított kép és az eredeti kép különbségét hozzáadjuk az eredeti képhez
 - két bevett formája a középérték eltávolítás (*mean removal*), illetve a élesítő maszkolás (*unsharp masking*)

Távérzékelte felvételek feldolgozása

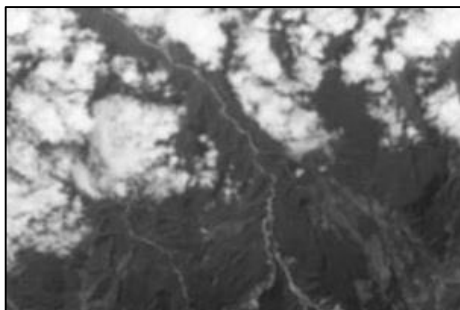
Konvolúciós szűrések

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

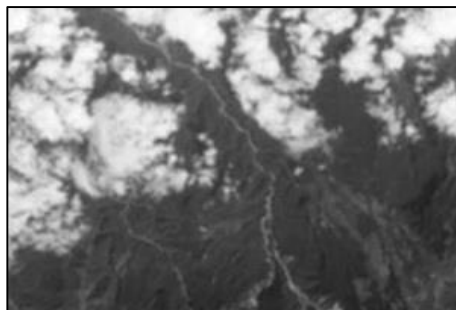
középtérték eltávolítás

$$\frac{1}{w-8} \begin{bmatrix} 0 & -2 & 0 \\ -2 & w & -2 \\ 0 & -2 & 0 \end{bmatrix}$$

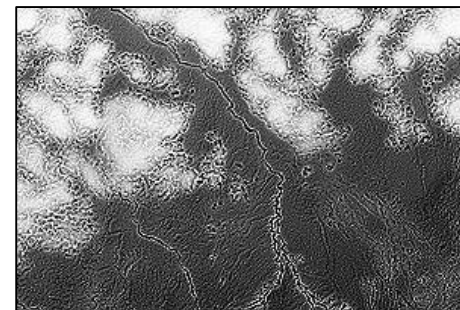
élesítő maszkolás



lineáris simítás



Gauss simítás



élesítő
maszkolás

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

- *Éldetektálás (edge detection)*: a nagy kontrasztkülönbségű szomszédos területek kiemelésére
 - *lineáris éldetektálás*: az értékek inverzét vesszük figyelembe egyik, illetve másik oldalon
 - így az adott irányba eső kontrasztátmeneteket detektálhatjuk, ezért többször kell alkalmaznunk a kernelt más irányokkal, az eredményt pedig összegezzük

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

horizontális detektálás

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

diagonális detektálás

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

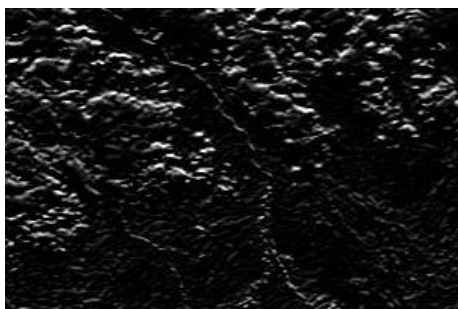
- vannak több irányba egyszerre működő éldetektálók is (kevésbé hatékonyak, de kisebb a műveletigényük):

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

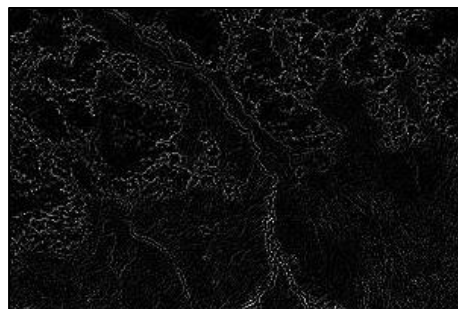
Laplace kernel

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & 4 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} + 2^{R-1}$$

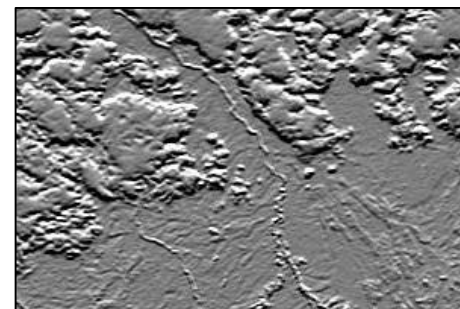
Emboss kernel



lineáris



Laplace



Emboss

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

- vannak kétszeres futtatással alkalmazható éldetektálók is

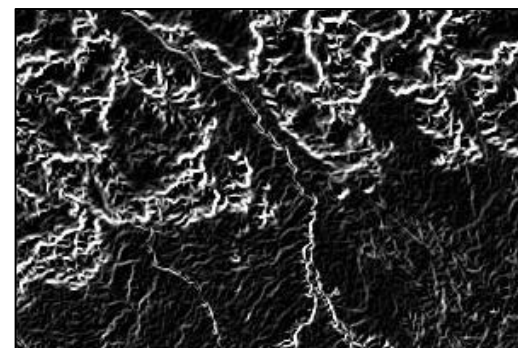
$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}$$

Sobell

Prewitt

Kirsh

- először vertikálisan, majd horizontálisan futtatjuk a leképezést, a keletkezett képeket átlagoljuk
- jobb eredményt biztosít, mint az egyszer futtatott éldetektálók, de nem igényel annyi végrehajtást, mint a lineáris éldetektálás



Prewitt

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Konvolúciós szűrések

- az éldetektálás elvégezhető nagymértékű élesítés segítségével is
- az éldeketálás segítségével lehet előzetes intenzitás transzformációk elvégzése, pl. Gauss simítás után tisztább éleket kapunk
- *Vonaldetektálás (line detection)*: vonalszerű alakzatok felismerésére, lényegében olyan éldetektálás, ahol közvetlenül szomszédos éleket szeretnénk felismerni

$$\begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} + 2^{R-1}$$

horizontális detektálás

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} + 2^{R-1}$$

diagonális detektálás

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Légköri reflektancia

- A távérzékelte felvételekre számolható reflektancia, amely a földet érő sugárzás, és a föld által visszavert sugárzás aránya
 - amennyiben az érzékelő a légkör felett van (műhold), számolható a *légköri reflektancia (top of atmosphere reflectance)*
 - magában foglalja a felhők és gázok által kibocsájtott sugárzást
 - számításának módja érzékelőnként, illetve az érzékelés időpontjával változik
 - számítható *földfelszíni reflektancia (surface reflectance)*, amelyet a légköri jelenségek nem befolyásolnak
 - adott modellek alapján

Távérzékelte felvételek feldolgozása

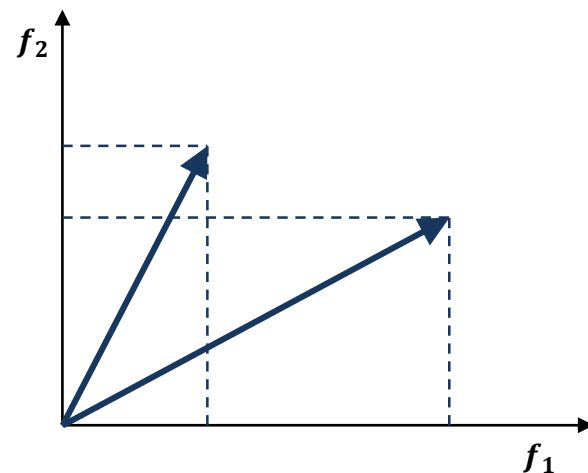
Spektrális indexek

- A spektrális indexek olyan spektrális tartományok alapján kalkulált értékek, amelyek adott felszínborítási jellemzőket tudnak előtérbe hozni, pl.:
 - vegetációs (NDVI): $\frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)}$
 - termőföld (NDSI): $\frac{(SWIR-NIR)}{(SWIR+NIR)}$
 - állóvizek(NDWI): $\frac{(SWIR-RED)}{(SWIR+RED)}$
 - termőföld igazított vegetációs (SAVI):
 $\frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+L)} \cdot (1 + L)$,
ahol $L \in [0 \dots 1]$ a korrekciós mérték

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális tér

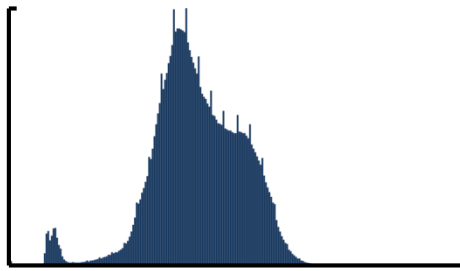
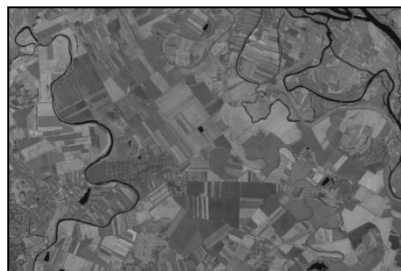
- A hisztogram sok esetben nem elegendő képi statisztika, mivel az egyes sávokat egymástól függetlenül kezeli
- Felépíthetünk egy olyan koordinátarendszert, amelyben a két tengely értékei az egyes sávok intenzitásértékei lesznek, és ebben helyezzük el az egyes képpontok értékeit, ez a *multispektrális térnek* (*multispectral space*)
 - a képpontok, mint *spektrális vektorok* jelennek meg, amelyek az intenzitásértékeknek megfelelő pontba mutatnak a koordinátarendszerben



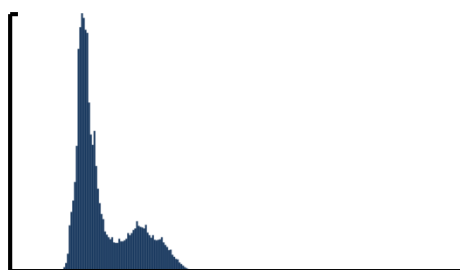
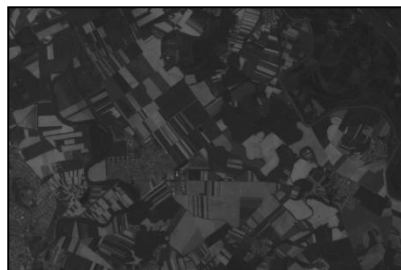
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális tér

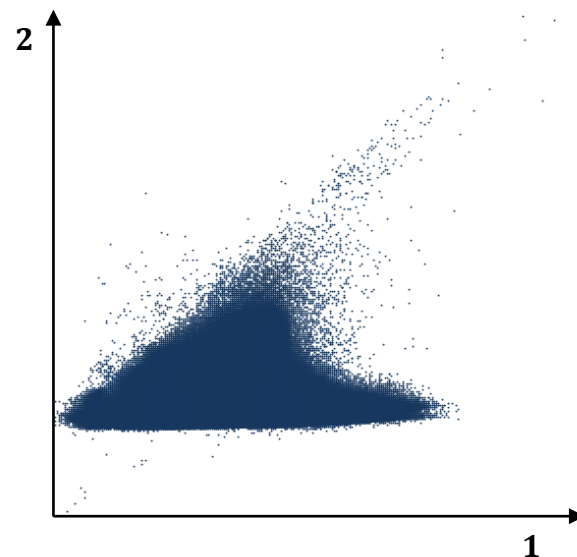
- Pl.:



1. sáv értékei



2. sáv értékei

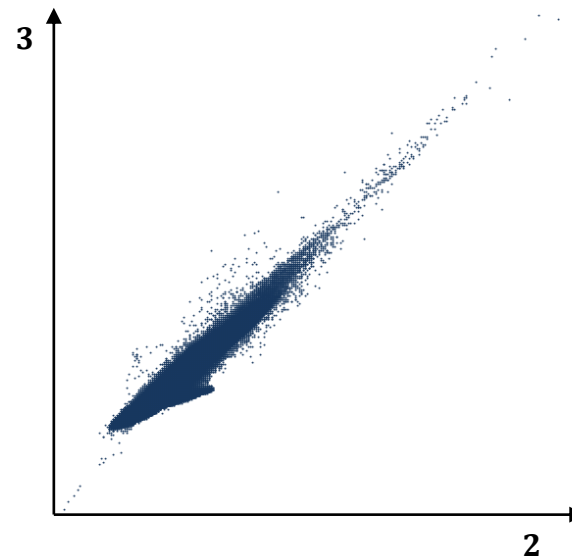
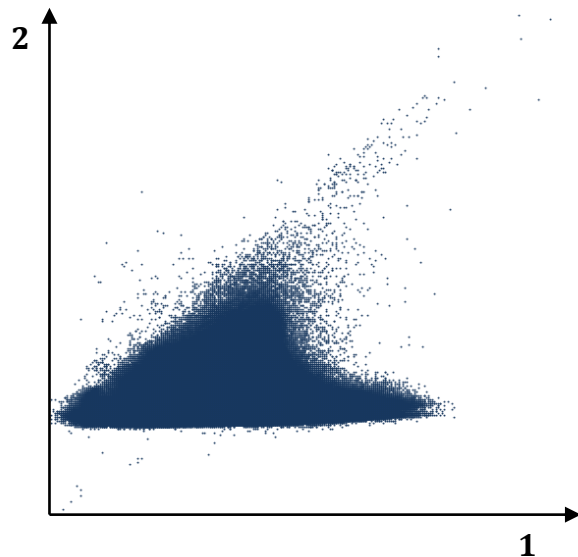
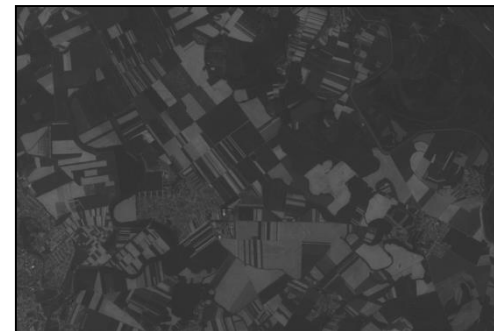
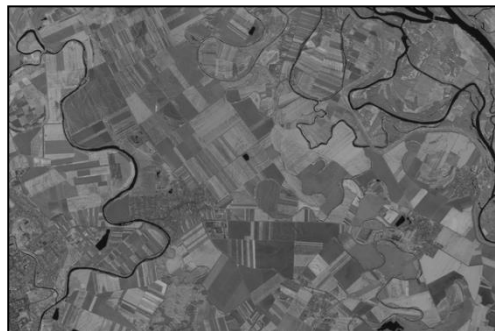


1. és 2. sáv által meghatározott multispektrális tér

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális tér

- Pl.:



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális tér

- Alapvető statisztikai értékek a multispektrális térben:
 - *átlagvektor* (\mathbf{m}), amely megfelel a várható értéknek:

$$\mathbf{m} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k$$

ahol K a képpontok száma, \mathbf{x}_k egy képpont vektora

- *kovariancia mátrix* (Σ_x), amely megadja a vektorok együttmozgását, azaz összefüggésük mértékét:

$$\Sigma_x = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\mathbf{x}_k - \mathbf{m})(\mathbf{x}_k - \mathbf{m})^t$$

(ha 0, akkor a két sáv független egymástól)

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális tér

- *korrelációs mátrix* (R), amely megadja a vektorok relatív összefüggését:

$$\forall i, j \in [1..n]: R_{ij} = \frac{\sum x_{ij}}{\sum x_{ii} \sum x_{jj}}$$

ahol n a sávok száma (áltójában 1 értékeket kapunk, míg a további értékek megadják az egyes sávok korrelációját)

- pl.:

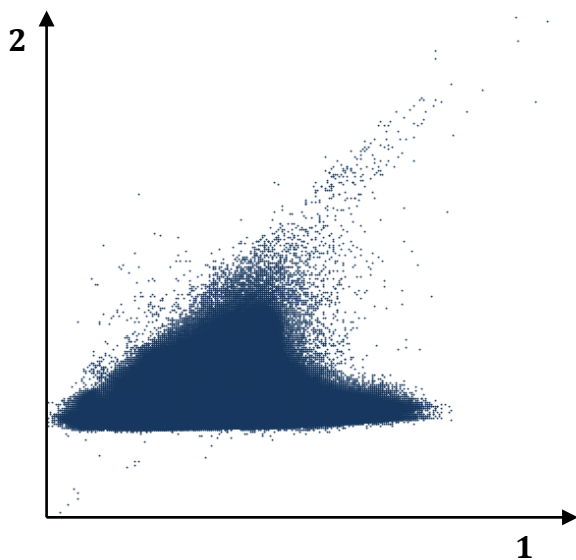
$$\sum_x = \begin{bmatrix} 1.9 & 1.1 \\ 1.1 & 1.1 \end{bmatrix} \text{ esetén } R = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.761 \\ 0.761 & 1.0 \end{bmatrix}, \text{ azaz a}$$

korreláció mértéke 76,1% a két sáv között, azaz jelentős az összefüggőség (az egyik sáv sötét pontjai a másikon is sötétként jelennek meg, stb.)

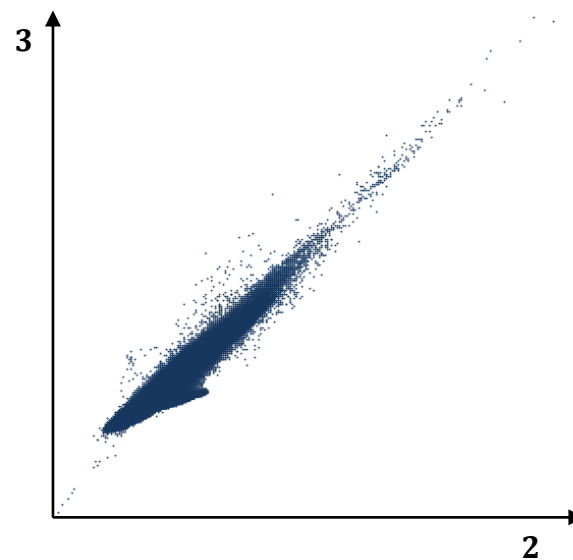
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális tér

- A sávok összefüggősége a spektrális térben is látható, minél nagyobb az összefüggőség két sáv között, az értékei annál inkább tartanak össze, és alkotnak az identitással párhuzamos egyenest, pl.:



24,5%-os korreláció



96,7%-os korreláció

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

- Amikor intenzitás transzformációt végzünk a felvételen, akkor a spektrális tulajdonságait ezzel elronthatjuk
 - mivel a sávok nem függenek egymástól (kivéve, ha a korrelációs érték 0), egy sáv értékeiben az elmozdulás magával vonzza a másik sáv értékeit is, emiatt a spektrális tér eltorzul, és ezzel jelentősen befolyásolja a későbbi elemzést (pl. tematikus osztályozást)
 - ezért bármilyen intenzitás transzformáció előtt célszerű megszüntetni a korrelációt, amit úgy tehetünk meg, hogy a spektrális térünk koordinátarendszerét transzformáljuk úgy, hogy az összefüggőség 0-ra redukálódjon

Távérzékelte felvételek feldolgozása

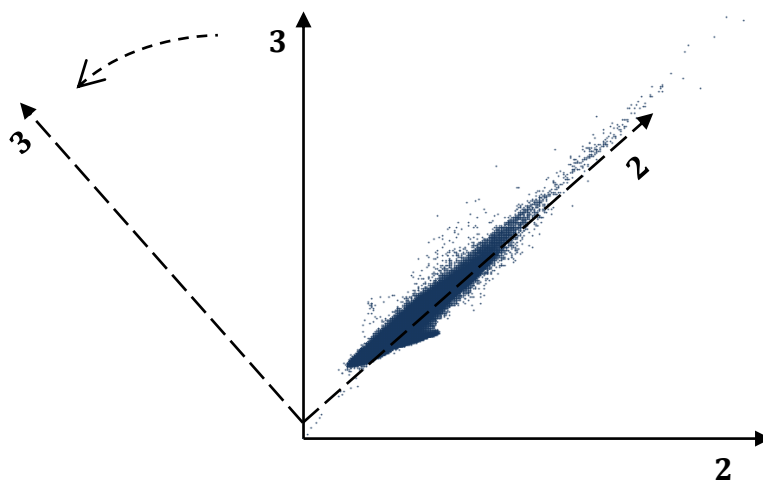
Multispektrális transzformációk

- A spektrális koordinátarendszer transzformációját nevezzük *multispektrális transzformációnak*
 - ez egy lineáris transzformáció, amelynek célja a koordinátarendszer megváltoztatása úgy, hogy a sávok függősége változott (általában teljesen eltűnjön)
 - a transzformáció mátrix (G) segítségével adható meg, amelyet minden képpontra alkalmazhatunk, így az \mathbf{x} vektorokból előállítja az új koordinátarendszer \mathbf{y} vektorait:
$$\mathbf{y} = G\mathbf{x}$$
 - a leképezés nem mindig dimenziótartó, előfordulhat, hogy csökkenti a sávok számát, és így a spektrális tér dimenzióját

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

- A multispektrális transzformációt *főkomponens transzformáció* segítségével hajtjuk végre, amelynek keretében elforgatjuk úgy a koordinátarendszert, hogy a korreláció megszűnjön
 - a főkomponensek az új koordinátarendszer tengelyei
 - a vektorok az eredeti helyükön maradnak, így az összefüggés az új rendszerben már nem fog jelentkezni



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

- A G transzformációs mátrix helyett a transzponáltját (D) számítjuk, mivel ez diagonális:

$$\mathbf{y} = G\mathbf{x} = D^t\mathbf{x}$$

- ebből meghatározható a két kovariancia mátrix kapcsolata:

$$\Sigma_y = D^t \Sigma_x D$$

- mivel az új koordinátarendszer kovariancia mátrixának szintén diagonálisnak kell lennie, ez meghatározható az eredeti kovariancia mátrix sajátértékeivel:

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix}$$

ahol $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_n$ a Σ_x sajátértékei

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

- a sajátértékek alapján a transzformációs mátrix vektorai már kiszámíthatóak:

$$\forall i \in [1..n]: [\Sigma_x - \lambda_i I] \mathbf{g}_i = \mathbf{0}$$

ahol I az identitásmátrix, $\mathbf{g}_i = \mathbf{d}^t_i$ a transzformációs mátrix egy vektora

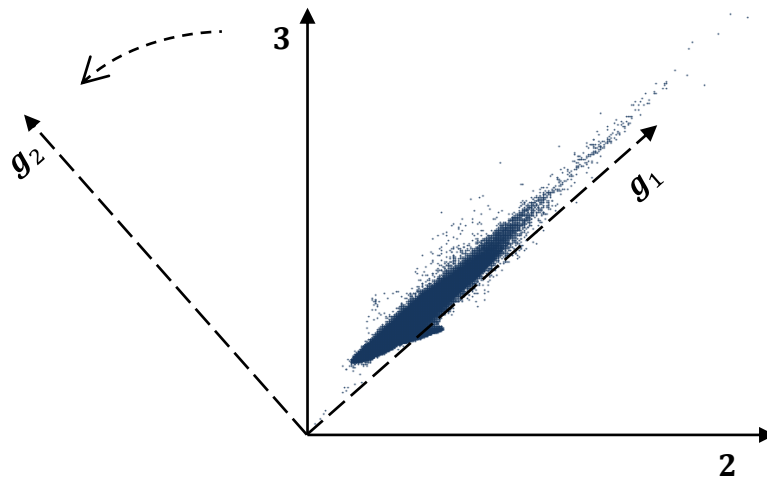
- az egyenletrendszer úgy kell megoldani, hogy a G mátrix ortogonális legyen, amiatt a sajátvektorokat normalizálni kell:

$$\forall i \in [1..n]: \sum_{j=1}^n \mathbf{g}_{ij}^2 = 1$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

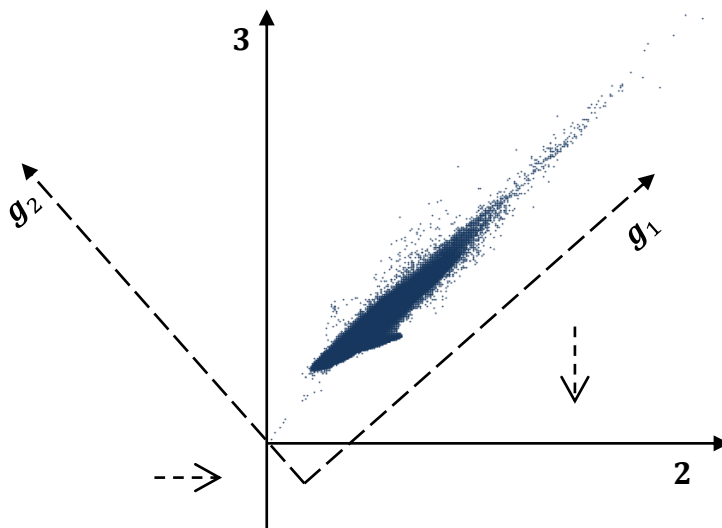
- Pl. 2 dimenziós esetben $\mathbf{g}_i = \begin{bmatrix} g_{1i} \\ g_{2i} \end{bmatrix}$, és 2 két ismeretlenes, ám nem független egyetlenrendszert kapunk, a normalizálás miatt azonban ezek kiegészülnek a $g_{1i}^2 + g_{2i}^2 = 1$ egyenletekkel
- A kapott \mathbf{g}_1 és \mathbf{g}_2 vektorok adják az új koordinátarendszer tengelyeit, a $G = D^t = [\mathbf{g}_1 \quad \mathbf{g}_2]^t$ mátrixot alkalmazhatjuk minden spektrális vektorra



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

- Előfordulhat, hogy a transzformáció miatt bizonyos értékek függőlegesen a negatív tartományba esnek, ennek kiküszöbölésére eltolhatjuk a transzformáció középpontját

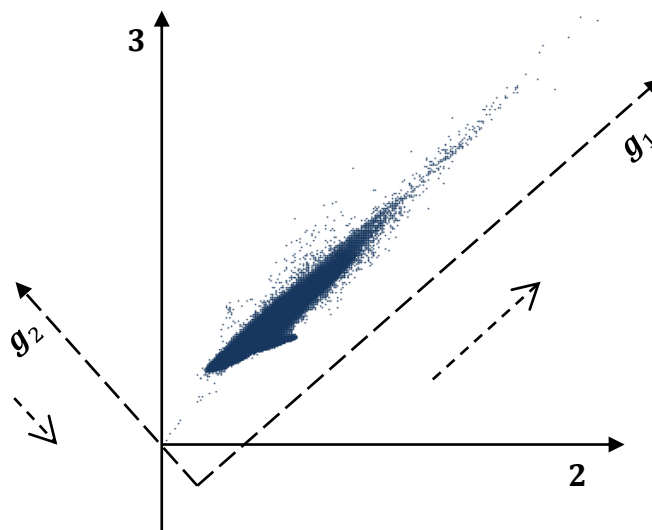


- az eltolás mértéke kiszámítható a legkisebb keletkezett érték alapján, és akár utólag, külön is elvégezhető

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

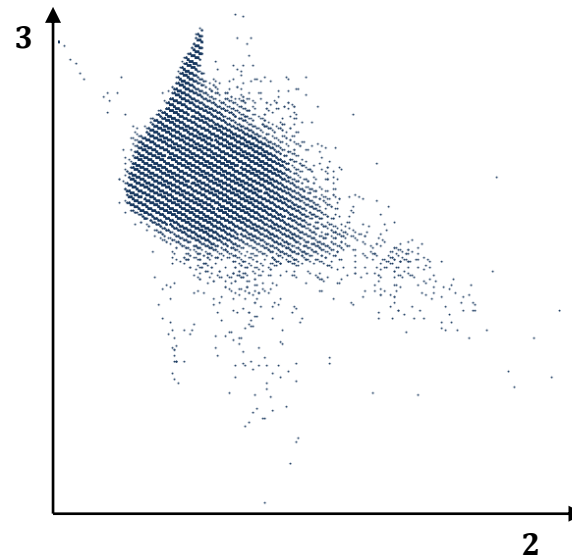
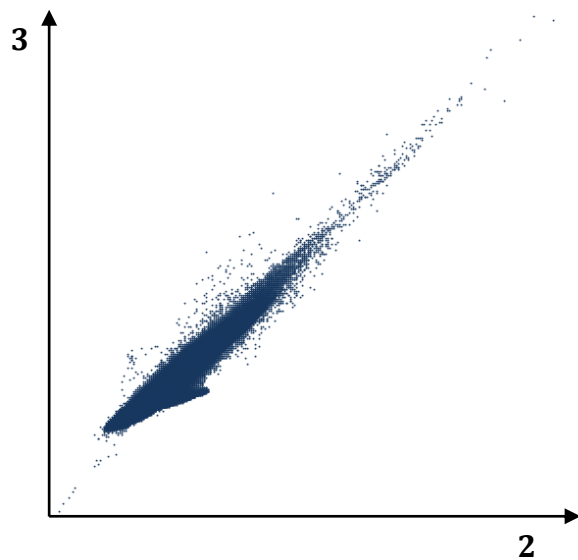
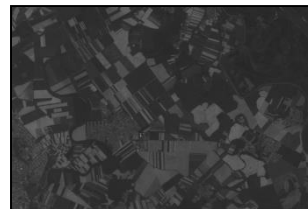
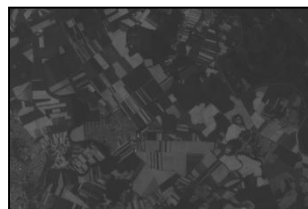
- Szintén előfordulhat, hogy az értékek túlesnek a koordinátatengely határain (pl. 8 bit esetén 255 fölöttiek), ekkor lineáris transzformációval (*saturating contrast enhancement*) alakíthatjuk át a koordinátarendszert
 - hasonlóan csökkenthetjük is a tengely méretét



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Multispektrális transzformációk

- Pl.:



Távérzékelte felvételek feldolgozása

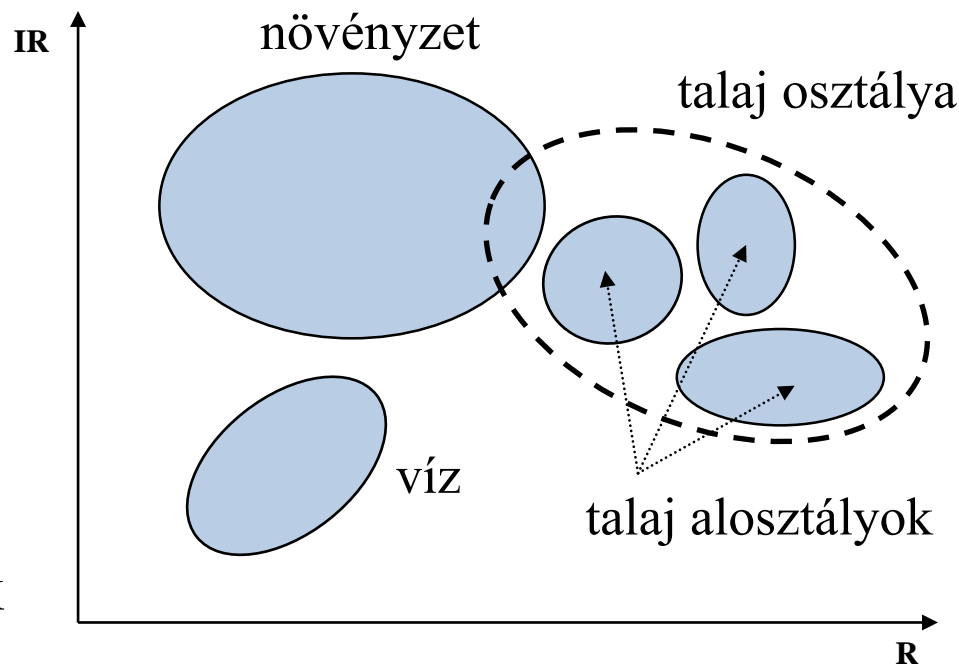
A tematikus osztályozás feladata

- A távérzékelés egyik fő feladata műholdfelvételek alapján a felszínborítás automatizált azonosítása, és olyan térképek előállítása, amelyekben a felszíntakarókat külön-külön jelöljük
 - a keletkezett térképeket *tematikus térképnek*, a besorolást elvégző eljárást *tematikus osztályozásnak* nevezzük
 - a térképek gazdasági, pénzügyi folyamatok döntési alapjaként szolgálnak
 - céljaink az osztályozással kapcsolatban:
 - kevés terepi információt igényeljen
 - a valóságnak minél jobban megfeleljen
 - a folyamatot minél nagyobb mértékben automatizáljuk

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Osztályok a spektrális térben

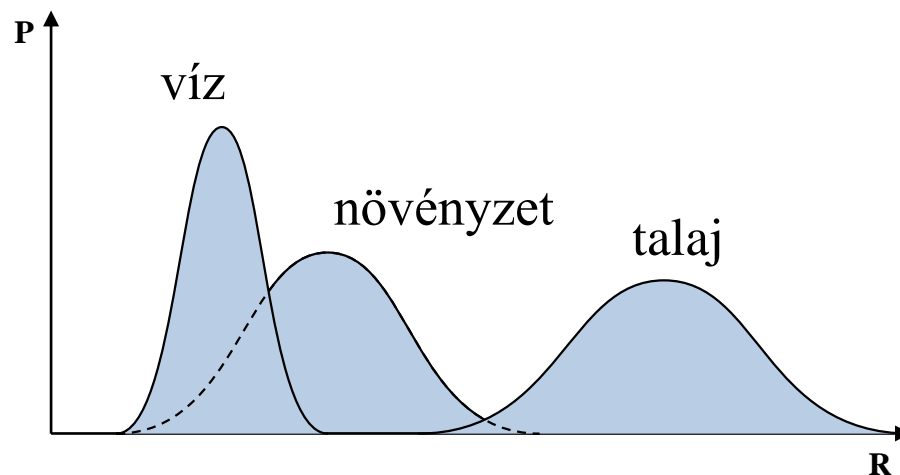
- Az osztályozáshoz kihasználjuk, hogy a felszínakaró a különböző spektrális sávokban különböző értékeket produkál
 - az értékeket az egyes sávok viszonylatában összevethetjük a spektrális térben
 - az egyes intenzitás értékekhez rendelt tartományok a spektrális osztályok
 - a besorolás nem mindig egyértelmű, mert egyes osztályok átfedhetik egymást



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Osztályok a spektrális térben

- A besoroláshoz figyelembe vesszük az osztályok valószínűségét is, normális eloszlást feltételezve
 - azaz a tartomány középpontjában elhelyezkedő spektrális vektor sokkal valószínűbben tartozik az osztályba, mint a tartomány határvonalán elhelyezkedő vektor
 - különösen a több osztályt is érintő vektoros esetén fontos, hogy a valószínűbb osztályba soroljuk a képpontot



Távérzékelte felvételek feldolgozása

A klaszteres módszerei

- A tematikus osztályozás két módon történhet:
 - *felügyelt osztályozás (supervised classification)*: az osztályozás folyamata szakértői beavatkozással történik, pl. tanulóterület megadásával
 - *felügyeletmentes osztályozás (unsupervised classification)*: az osztályozás folyamata automatikusan történik, a paraméterek és az osztályok statisztikai becslésével



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Az osztályozás folyamata

- A felügyelt osztályozás általában négy lépésből áll:
 1. A képpontokat intenzitásértékeik alapján besoroljuk a spektrális osztályokba, ezt a lépést *klaszterezésnek* nevezzük, az eredményt pedig *klaszterképnek*
 2. Megadunk egy referenciaterületet (*tanulóterület*), amelynek tényleges felszíntakarása ismert, ezeket a területeket megfeleltetjük a korábbi osztályoknak
 3. A megfeleltetés alapján elvégezzük a spektrálisosztályok besorolását tematikus osztályokba
 4. Egy másik referenciaterülettel (*tesztterület*, vagy *ellenőrzőterület*) ellenőrizzük az eljárás pontosságát

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Klaszterezés

- Legyen a spektrális osztályok száma M , és jelölje őket ω_i , $i \in [1..M]$ az osztályokat, míg x tetszőleges spektrális vektor (képpont), a klaszterezés során meghatározzuk, hogy x melyik ω_i osztályba tartozik
- A klaszterezés több módszerrel végezhető, a leggyakoribb a Maximum Likelihood becslés:
 - megállapítjuk annak a valószínűségét, hogy egy x spektrális vektor milyen eséllyel esik ω_i spektrális osztályba $p(\omega_i|x)$, ezt maximalizáljuk, vagyis:

$$x \in \omega_i, \text{ ha } \forall j \in [1..m], i \neq j: p(\omega_i|x) > p(\omega_j|x)$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Klaszterezés Maximum Likelihood módszerrel

- másként: $x \in \omega_i$, ha

$$\forall j \in [1..m], i \neq j: p(x|\omega_i)p(\omega_i) > p(x|\omega_j)p(\omega_j)$$

ahol $p(\omega_i)$ a spektrális osztály relatív mérete a képben,
 $p(x|\omega_i)$ pedig a tanulóterület alapján meghatározható

- mivel a normális eloszlás exponenciális alapon számol,
logaritmikus alapra térünk át, legyen

$$g_i(x) = \ln(p(x|\omega_i)p(\omega_i)) = \ln(p(x|\omega_i)) + \ln(p(\omega_i))$$

akkor a feladat leírható az alábbi alakban:

$$x \in \omega_i, \text{ ha } \forall j \in [1..m], i \neq j: g_i(x) > g_j(x)$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Klaszterezés Maximum Likelihood módszerrel

- behelyettesítve a normális eloszlást, ez a következő formára egyszerűsödik:

$$g_i(x) = -\ln|\Sigma_i| - (x - m_i)^t \Sigma_i^{-1} (x - m_i)$$

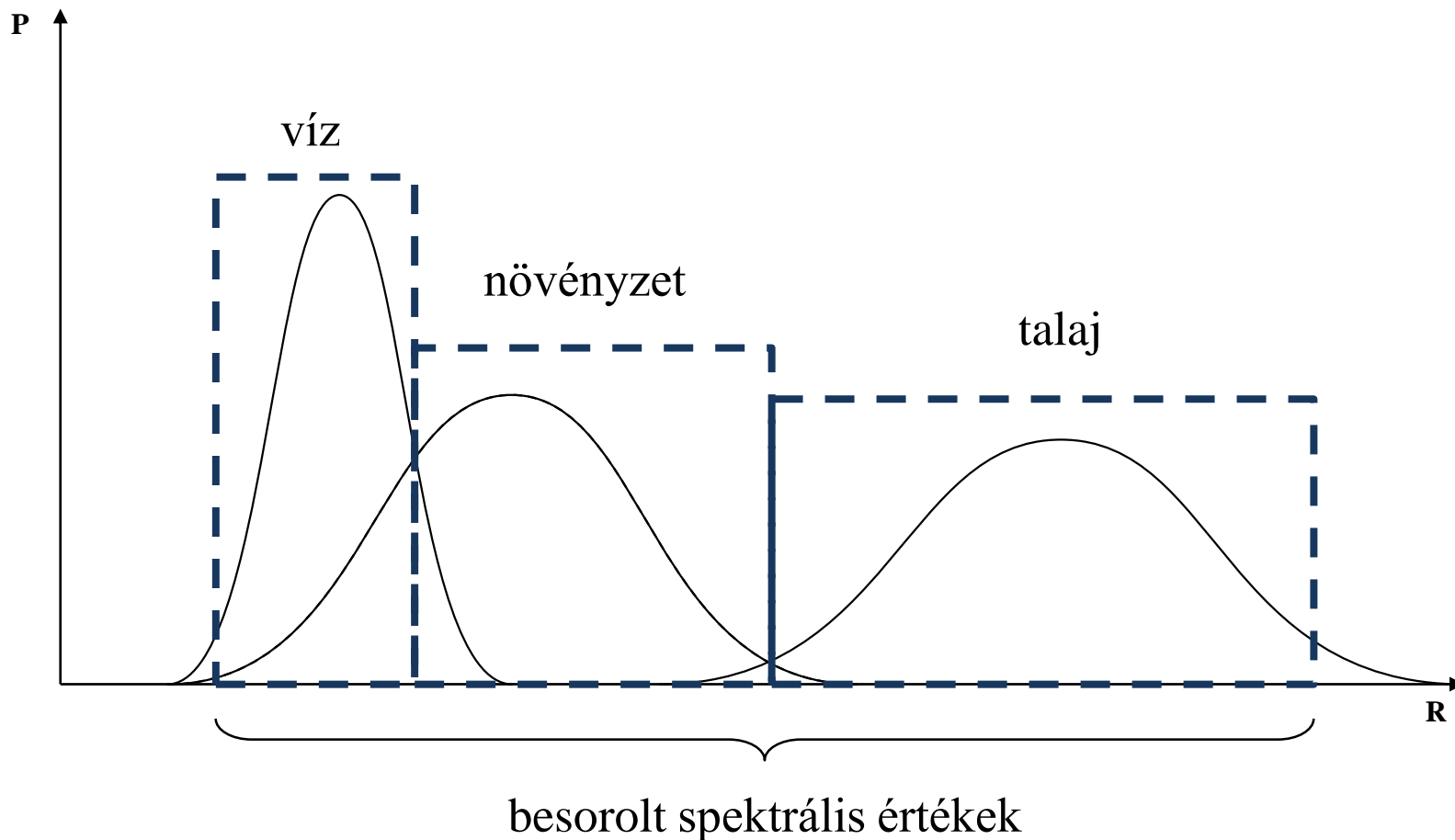
ahol m_i az átlagértékek vektora, Σ_i a kovarianciamátrix

- ez alapján minden képpont besorolódik a megfelelő kategóriába, ami nem célszerű, mert így a kevésbé valószínű pontok is
- a besorolásra osztályonként adható küszöbérték (T_i , $i \in [1..M]$), hogy a kevésbé valószínű képpontokat ne soroljuk be az osztályokba, pl. 95%-os korlát esetén:

$$T_i = -4.744 - \frac{1}{2} \ln|\Sigma_i| + \ln p(\omega_i)$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Osztályok a spektrális térben



Távérzékelte felvételek feldolgozása

A szegmentálás szerepe

- A korábbi lépéseket megelőzendő bevezetünk egy újabbat, a *szegmentálást*, amely megadja a *szegmenstérképet*
 - a szegmentálás a spektrálisan hasonló, szomszédos képpontokat gyűjti egy csoportba, a szegmensbe
 - a szegmenstérképre szintén megadható a spektrális tér, ekkor a szegmens spektrális vektora a szegmens vektorainak
 - ebben a spektrális térben végrehajtva a klaszterezés már figyelem már összevont területekre lesz alkalmazható, azaz nemcsak spektrális, hanem térbeli jellemzőket is figyelembe vesz, így jobb eséllyel kerülnek a tartományok ugyanabba az osztályba

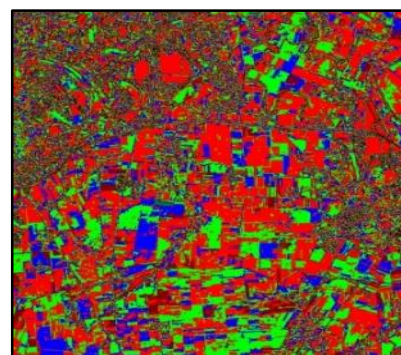
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Az osztályozás folyamata



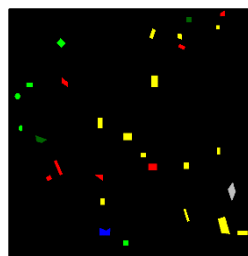
multispektrális
felvétel

szegmentálás

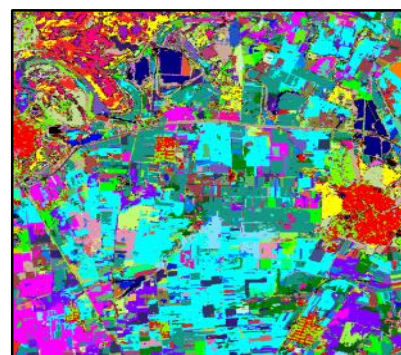
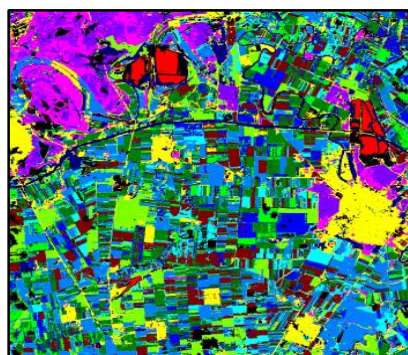


szegmenstérkép

klaszterezés



osztályozás
tanulóterület
alapján



klasztertérkép

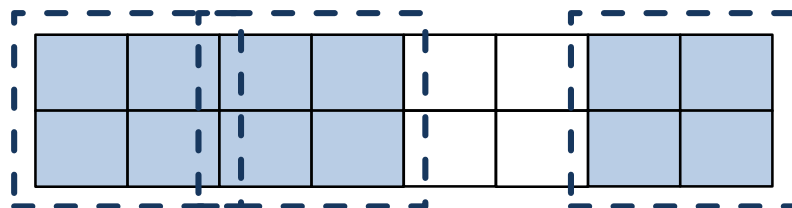
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Szekvenciális csatolás alapú szegmentálás

- Szekvenciális csatolás módszere:
 - 2 x 2-es területekről (*cellákról*) megvizsgálja, hogy homogénnek tekinthetőek-e, a homogenitást szórás segítségével ellenőrzi külön minden sávra:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)\bar{x}^2} \leq C_H$$

ahol C_H egy rögzített homogenitási korlát, $n = 4$ a képpontok száma, \bar{x} a képpontok átlaga



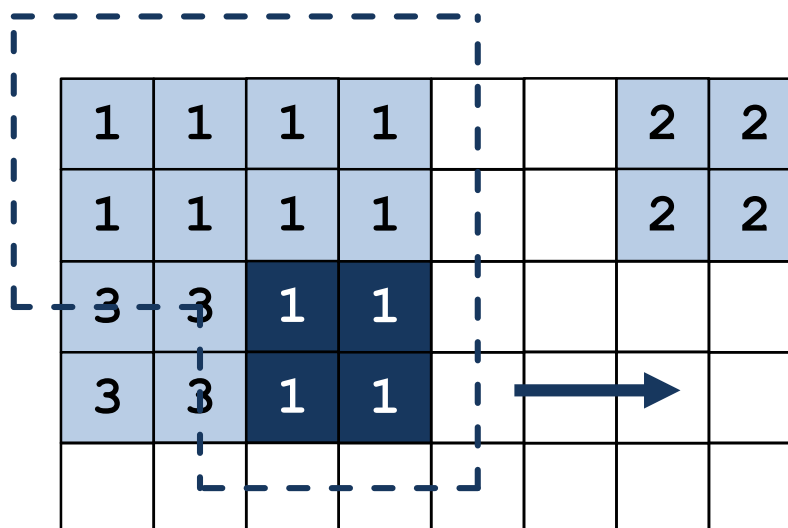
homogén cellák

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Szekvenciális csatolás alapú szegmentálás

- az eljárás felülről lefelé, balról jobbra halad a képen, és amennyiben egy cella homogén, megvizsgálja, hogy csatolható-e a tőle balra, illetve felfelé lévő cellához, vagy új szegmenset kezd

összevont cellák



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Szekvenciális csatolás alapú szegmentálás

- az összevonási kritérium szintén számítható szórás alapján az úgynevezett *ANOVA-kritériumokkal*:

- legyen x egy n elemű, y egy m elemű minta, z a kettő összevonása, ekkor minden sávra kiszámolhatjuk:

$$A_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad A_y = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2$$

$$B_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{z})^2 \quad B_y = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{z})^2$$

$$A = A_x + A_y \quad B = B_x + B_y$$

- majd meghatározott C_1 és C_2 korlátokra megállapítjuk az összevonási feltételeket:

$$(A/B)^{(m+n)/2} \geq C_1 \quad \text{és} \quad \left[\frac{(A_x/n)^{n-1} (A_x/m)^{m-1}}{(A/(n+m))^{n+m-2}} \right]^{1/2} \geq C_2$$

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Szegmentálási módszerek

- Legjobb összevonás alapú szegmentálás:
 - minden képpontot külön szegmensnek tekint, majd hasonlósági kritérium alapján a szomszédos szegmens-párokat összevonja
 - a hasonlóság megállapítható alkalmas távolságfüggvénnyel, pl. Jeffries-Matusita-távolság:

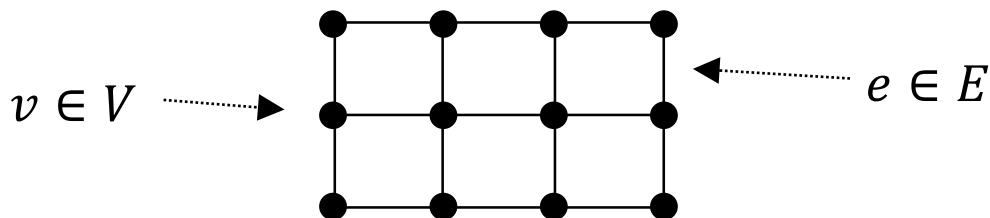
$$D_B(S_1, S_2) = \frac{1}{8} (m_1 - m_2)^t \left[\frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right]^{-1} (m_1 - m_2) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{|(\Sigma_1 + \Sigma_2)/2|}{|\Sigma_1|^{1/2} |\Sigma_2|^{1/2}} \right]$$

ahol m_i az átlagértékek vektora, Σ_i a kovarianciamátrix

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Képek gráf alapú kezelése

- A képszegmentálás tekinthető gráfelméleti problémának is, mivel a kép könnyen reprezentálható egy rácsgráf segítségével

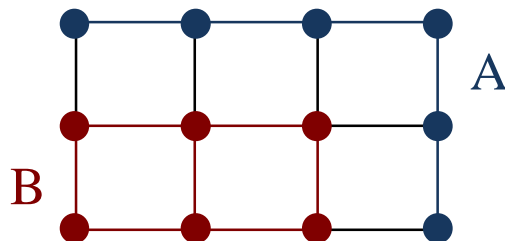


- a csúcsok a képpontok, vagy azok intenzitásértékei lesznek
- az élek költsége a szomszédos képpontok viszonyát (hasonlóságát, vagy különbségét) fejezi ki, pl.
 - *lineáris távolság*: $\omega(u, v) = -|I(u) - I(v)|$, ahol $I(u)$ az adott csúcs intenzitásértéke sávonként, vagy azok átlaga

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Képek gráf alapú kezelése

- *szórás alapú távolság*: $\omega(u, v) = e^{-\frac{(I(u) - I(v))^2}{\sigma^2}}$, ahol σ^2 a szórásnégyzet
- a szegmensek ekkor összefüggő részgráfok lesznek, pl.:



- két irányból végezhetjük az szegmentálást:
 - *összevonással*: a részgráfokat az összekötő élek mentén összevonjuk
 - *vágással*: alkalmas élsorozat mentén bontjuk a részgráfot két szegmensre

Távérzékelte felvételek feldolgozása

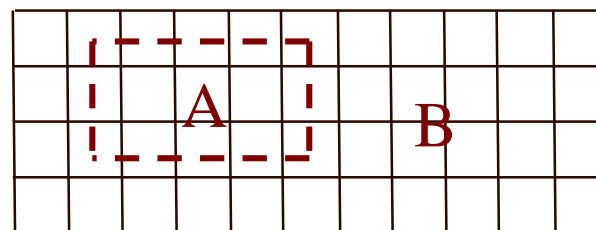
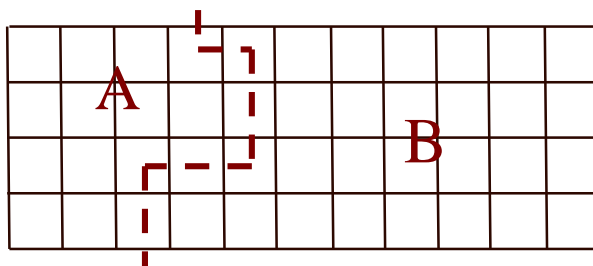
Összevonás alapú szegmentálás

- Egy egyszerű összevonás alapú eljárás, amelyet a rácsgráfra alkalmazhatunk, hogy a szegmenseket (részgráfokat) heterogenitási vizsgálat alapján összevonjuk
 - a heterogenitást (*het*) a szegmens minimális feszítőfájában a maximális él súlyával adjuk meg (így az eljáráshoz elég lesz eltárolni a maximális él súlyát)
 - két szegmens összevonható, ha az újonnan keletkezett szegmens nem növeli jelentős mértékben a heterogenitást:
$$\min \left\{ \text{het}(A) + \frac{k}{|A|}, \text{het}(B) + \frac{k}{|B|} \right\} > \text{het}(A \cup B)$$
ahol k egy küszöbérték
 - az összevont szegmensre elég az összekötő éleket vizsgálni

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Vágás alapú szegmentálás

- Alkalmazhatunk vágás alapú módszert is, ám a gráfok vágása általánosságban NP-teljes probléma, ezért transzformációkat kell végrehajtanunk, hogy polinomiális időben végrehajthassuk az algoritmust
 - a vágás lehet nyílt, illetve zárt a gráfon belül:



- több vágás alapú eljárás van, pl. normált minimális vágás, minimális átlagsúly alapú vágás, minimális arány alapú vágás

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Minimális átlagsúly alapú vágás

- A vágás alapú eljárások a *normált vágás* fogalmán alapszik, ahol egy vágás költségét a benne szereplő súlyköltségek alapján tudjuk meghatározni:

$$Cut(A, B) = \sum_{u \in A, v \in B, (u, v) \in E} \omega(u, v)$$

- A *minimális átlagsúly* megállapításához a vágás költségét elosztjuk a benne szereplő élek számával:

$$Mcut(A, B) = \frac{Cut(A, B)}{\sum_{u \in A, v \in B, (u, v) \in E} 1}$$

- Ezt az értéket minimalizáljuk minden lehetséges vágásra:

$$\min_{A, B \subset V, A \cup B = V, A \cap B = \emptyset} Mcut(A, B)$$

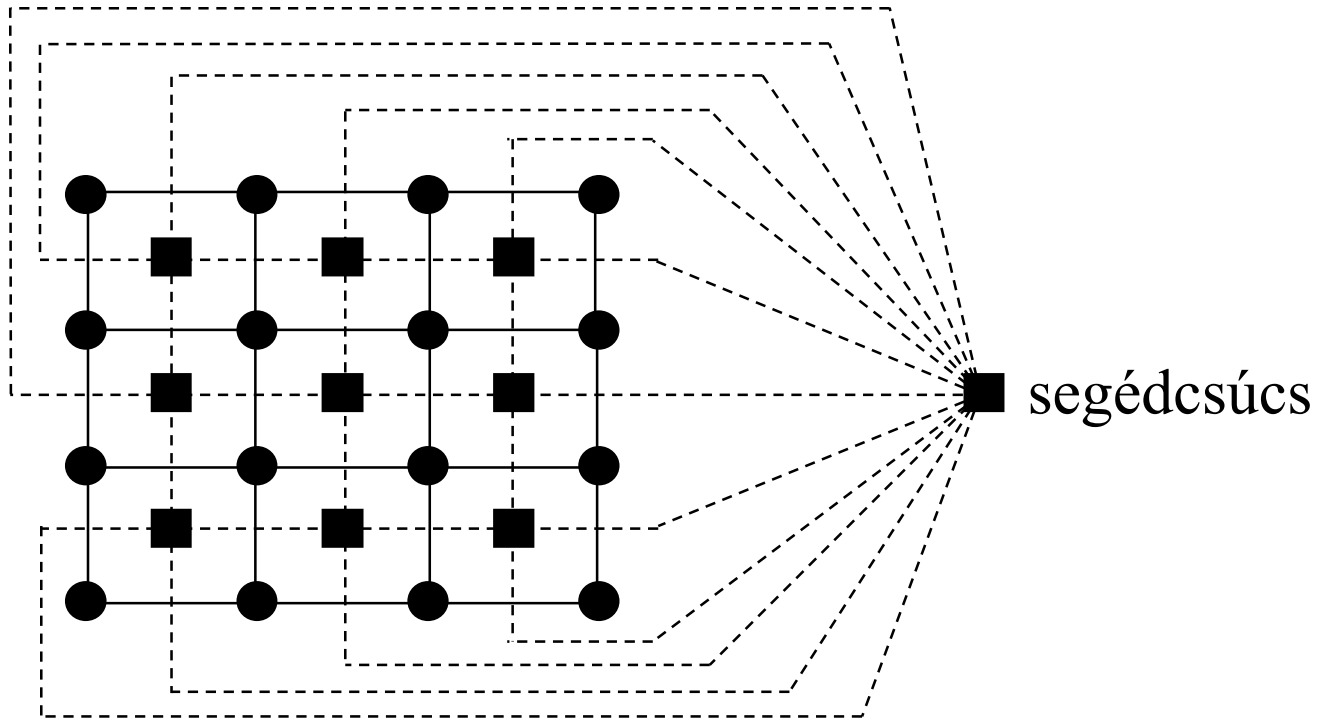
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Minimális átlagsúly alapú vágás

- A feladatot átfogalmazzuk negatív egyszerű körök keresésére
 - ehhez kialakítunk egy duális gráfot, ahol a csúcsok az eredeti rács középpontjaiban helyezkednek el, amelyek között ugyanúgy rácsként meghúzzuk az éleket, kiegészítve egy segédcsúccsal (a kivezető éleknek)
 - az élköltségek az eredeti gráfnak megfelelően alakulnak (annak az élnek a költségét veszi át, melyiket metszi)
 - ezután az élköltségeket csökkentjük úgy, hogy egy negatív kör szerepeljen a duális gráfban (a csökkentés mértékét bináris kereséssel határozzuk meg), így a feladatunk ennek a negatív körnek a megkeresése lesz

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Minimális átlagsúly alapú vágás



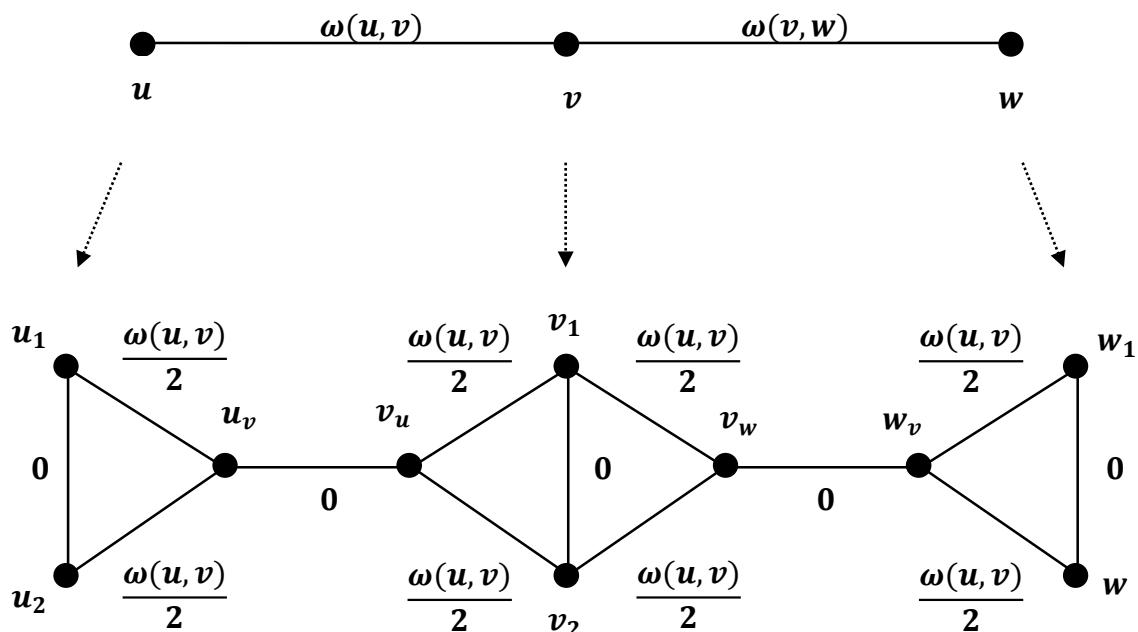
● — ● eredeti gráf éle

■ - - - ■ duális gráf éle

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Minimális átlagsúly alapú vágás

- A feladatot ezután átfogalmazzuk minimális tökéletes illesztéssé, mivel arra már adható polinomiális megoldó algoritmus
 - ehhez újabb transzformációt végzünk a gráfon:



Távérzékelte felvételek feldolgozása

Minimális átlagsúly alapú vágás

- Gráf egy illesztése (*matching*) olyan élek halmaza, amelyeknek nincs közös csúcspontjuk, ez akkor tökéletes (*perfect matching*), ha a gráf összes éle vagy benne van az illesztésben, vagy szomszédos vele, ezen illesztések közül keressük azt, ahol az élek összköltsége minimális
- Ez a feladat az *Edmonds* féle virág (*blossom*) algoritmussal $\mathcal{O}(n^2 \cdot e)$ műveletigénnyel megoldható
 - iteratívan páratlan hosszú köröket (virágokat) készít, amely az illesztésben bent lévő, illetve nem bent lévő váltakozó élsorozat (*alternating path*) tartalmaz
 - ezen köröket kiegészíti, illetve összevonja minimális költségű élekkel, amíg lehetséges

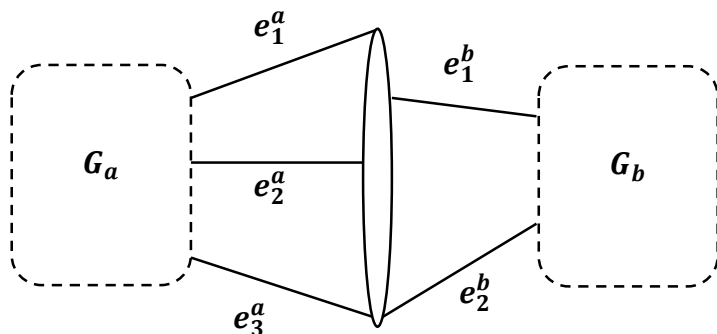
Távérzékelte felvételek feldolgozása

Minimális átlagsúly alapú vágás

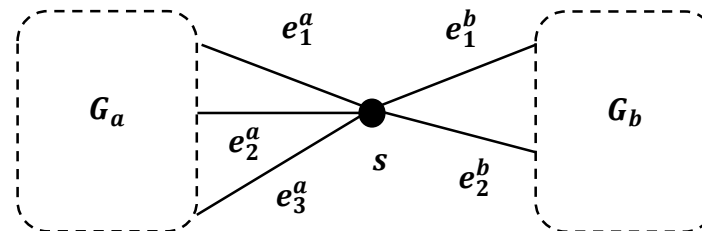
- Eddig egy vágást tisztáztunk, a teljes algoritmus egynél sokkal többet fog alkalmazni, ezért minden esetben a transzformáció elvégzése költséges lenne, így a vágást a duális gráfok szintjén fogalmazzuk meg
 - a minimális (negatív) átlagsúlyú kört redukáljuk egy pontra, a körbe vezető élek így ebbe a pontba fognak vezetni
 - a pontot felbontjuk a két részgráfhoz vezető élek mentén, ezzel kialakítjuk a két részgráfnak megfelelő duális gráfokat, amelyekből párhuzamosan újra számíthatunk minimális köröket (pontosabban negatív köröket)
- Az iterációt egy adott mélységig hajtjuk végre, vagy amíg a részgráfok kellően homogének nem lesznek

Távérzékelte felvételek feldolgozása

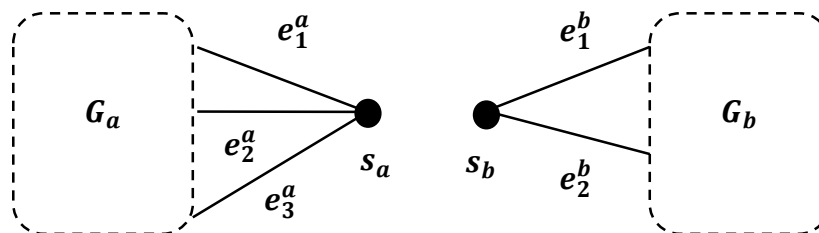
Minimális átlagsúly alapú vágás



minimális átlagsúlyú kör



kör összevonása egy pontra



gráf felbontása

Távérzékelte felvételek feldolgozása

Ellenőrzés és hibaszámítás

- A tematikus osztályozás utolsó lépéseként a teszterület alapján felépíthető egy mátrix (*tévesztési mátrix*)
 - értékei megadják, hogy hány olyan képpont található, amely az adott kategóriába került besorolásra az osztályozás során, illetve a teszterületen

| | | Osztályozás eredménye | |
|-----------------------|---|-----------------------|------|
| | | 1 | 2 |
| Teszterület osztályai | 1 | 3627 | 325 |
| | 2 | 936 | 6540 |

- az átlóban lévő értékek a jól osztályozott képpontok, ezek százalékos aránya adja meg az osztályozás pontosságát