Digitális képalkotás fizikája, képek tárolása

Fotoelektromos kölcsönhatás!

Előadás tartalma

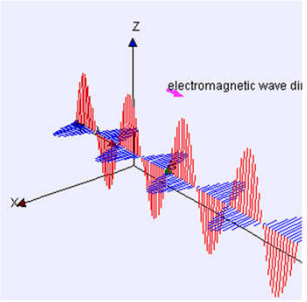
- Képalkotó rendszerek általános modellje
  - Elektromágneses sugárzás
  - Félvezetők / fotodiódák / CCD-k felépítése működése
  - Ezen eszközök működése miatt kialakuló zajok/hibák
- Digitális képek tárolásának szabványai
  - BMP / TIFF
  - GIF – LZW kódolás
  - PNG (és tömörítése)
  - JPEG (és tömörítése, artifaktumai)
  - DCM

Jelforrások

- Fény
  - Elektromágneses sugárzás
  - Egyszerre hullám és részecsketulajdonságokkal is bír
    - Főleg a részecsketulajdonságaival foglalkozunk a tárgy során
  - Pl.: Látható, Röntgen (CT, Röntgen, Tomo), Gamma (PET), MRI
- Hang
  - Rugalmas közeg mechanikai rezgése, mely hullámként terjed
  - Pl.: Ultrahang

Az elektromágneses sugárzás

- Foton mozgása miatt egyszerre változik a mágneses és az elektromos tér, vektoraik egymásra és a terjedési irányra merőleges hullámmozgást végeznek :
- A fotonok főbb tulajdonságai:
  - Nyugalmi tömege nulla
  - Sebessége állandó
  - Frekvenciájával arányos energiája: $E = h \cdot (c/\lambda)$
    - Ez határozza meg, hogy viselkedik más anyagokkal „találkozva”
  - A fény / energia kvantuma
  - Polarizáció

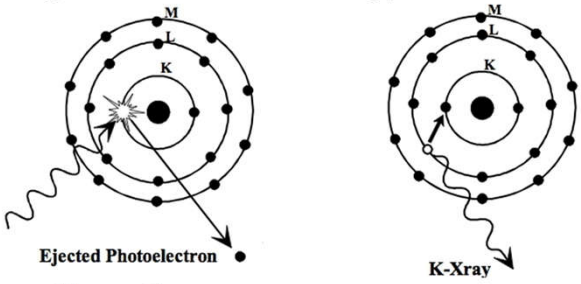


www.mit.bme.hu/~hadhazi/Oktatas/OKD/GIFek/EM3D.gif

Foton a z tengely mentén mozog, a H a mágneses térerőség vektora, az E az elektromos térerőség vektora.
H: plank állandó, c: fénysebesség

Fotoelektromos kölcsönhatás

- Foton rugalmatlanul ütközik egy elektronnal:

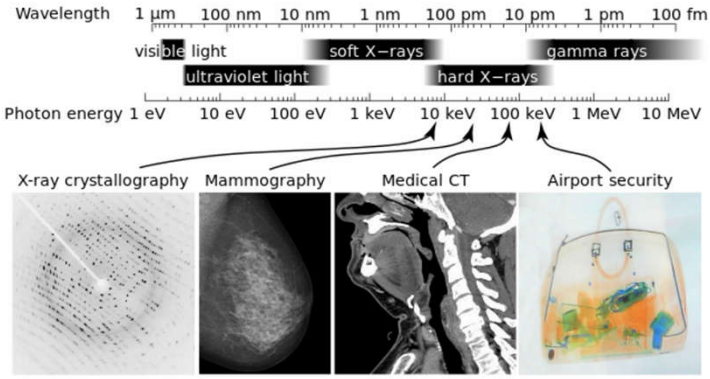


  - $E_f = E_{he} + E_{ke}$
    - E_f : foton energiája, E_{he} : elektron kötési energiája
      E_{ke}: fotoelektron kinetikus energiája

Fotoelektromos kölcsönhatás

- Annál valószínűbb, minél kisebb E_{ke} :
  - Értelemszerűen nem lehet negatív
  - Minél nagyobb rendszámú (Z) elemet vizsgálunk, annál nagyobbak a kötési energiák
  - Minél távolabb van az atommagtól az elektron annál kisebb a kötési energiája
  - Röntgen foton tipikusan K héjú elektronokkal tud kölcsönhatásba kerülni ~10 keV (alacsonyabb Z esetén)
  - Gamma fotonoknál ritkább a kölcsönhatás
  - Ökölszabály: kölcsönhatás gyakorisága $\propto \left(Z/E_f\right)^3$

Fotonok energiája



- Determinálja, hogy különböző atomokkal hogyan lép kölcsönhatásba (foto-elektromos, Compton, stb., lsd. majd a röntgenes előadást)

Fényérzékelés folyamata

- Fény
- Fotodióda (fotonból áram)
- Kondenzátor (gyűjti a töltést)

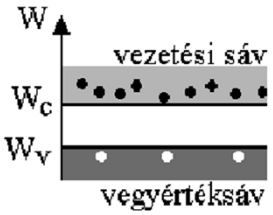
Ez egy fizikai eszköz is lehet (pl. MOS kapacitás)

- Analóg erősítő
- A/D átalakító
- Digitális feldolgozás

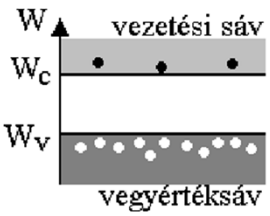
Félvezetők működési elve

- Kristályszerkezetek elektronjai:
  - Lehetséges energiájuk diszkrét halmazt alkot (az elektronok úgynevezett sávokban helyezkednek el):
    - Legfelső a vezetési sáv (e- többlet)
    - Alatta az ú.n. vegyértéksáv (lyuk többlet)
  - Félvezetők esetén termikus mozgás a két sáv között

N típusú Félvezető :

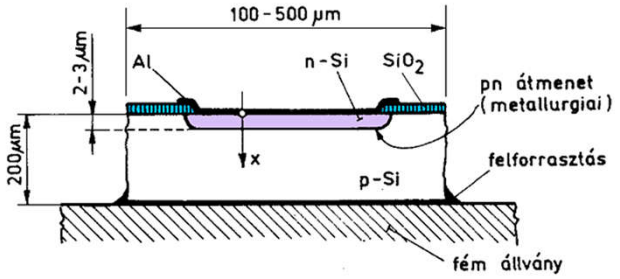


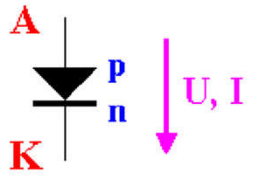
P típusú Félvezető :



Diódák működési elve

- Dióda: egymás mellett egy P és egy N félvezető:





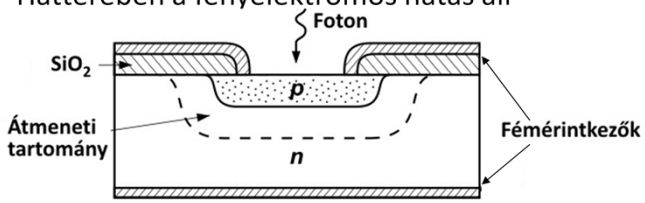
A = anód, **K** = katód

  - Anódtól a katód felé folyik az áram, ha Up>Un
  - Ellenkező esetben is folyik áram, de az feszültség független és jóval kisebb (ez lesz a sötétáram)

- Mire jó a dióda: kvázi egy selejtes szelep – ha elég nagy a potenciálkülönbsége az anódnak és a katódnak, akkor vezeti az áramot, ha nem, akkor is vezet, de kevesebbet

Félvezető fotodiódák

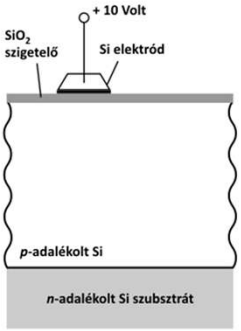
- Átmeneti tartományba eső foton hatására keletkező töltéshordozók okozta áram mérésén alapulnak:
  - Félvezető sávszerkezete határozza meg, hogy milyen energiájú fotonokra érzékeny a dióda
  - Az impulzusok megszámlálhatóak – foton számláló detektor
  - CMOS / CCD: ezeket kvázi „integrálja” – integrátor detektor
  - Hátterében a fényelektromos hatás áll



Foton hatására megindul a vezetés a p és az n típusú félvezető között => áram folyik az eszközön => 1 foton hatására egy impulzus keletkezik, ezt kell megszámolni.

Charge-coupled Device (CCD)

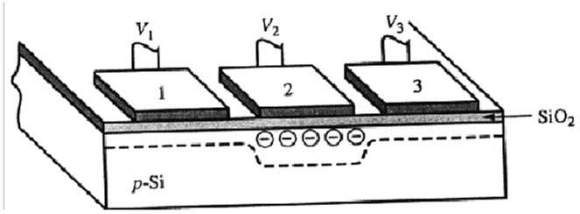
- CCD-k fényérzékeny MOS kondenzátorokból állnak:
  - Felépítését tekintve egy fém elektróda – szigetelő – P félvezető – N félvezető szendvics, fémre pozitív töltést N félvezetőre negatív töltést csatolunk.
  - P adalékolt Si-ban foto elektromos kölcsönhatás során egy vezetési elektron és egy lyuk keletkezik
  - Ha elegendően nagy az N félvezető és a fémlap közötti feszültség, akkor a lyuk az N félvezető felé indul, míg az elektron a dielektrikum elektródával szembeni oldalára kerül.



www.mit.bme.hu/~hadhazi/Oktatas/OKD/GIFek/CCD_MOSC.gif

Charge-coupled Device (CCD)

- Ilyen kondenzátorok helyezkednek el egymás mellett:
  - 3 db szükséges 1 pixelhez
  - Ezek a kondenzátor hármasok gridben helyezkednek el
  - Az elektródákra kapcsolt feszültséggel a töltéseket shiftelni lehet, innen ered a töltéscsatolt elnevezés.
- Expozíció alatti vezérlés:

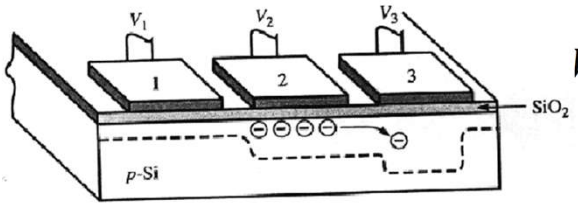


$$V_2 > V_{kusz} > V_1, V_3$$

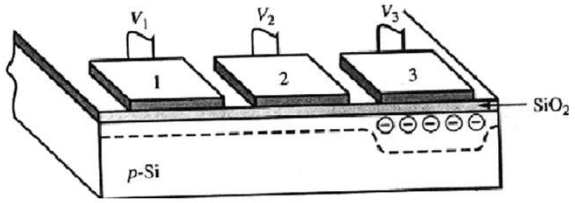
Ez 1 db (szub) pixel!

Charge-coupled Device (CCD)

- Kiolvasás során alkalmazott vezérlés:

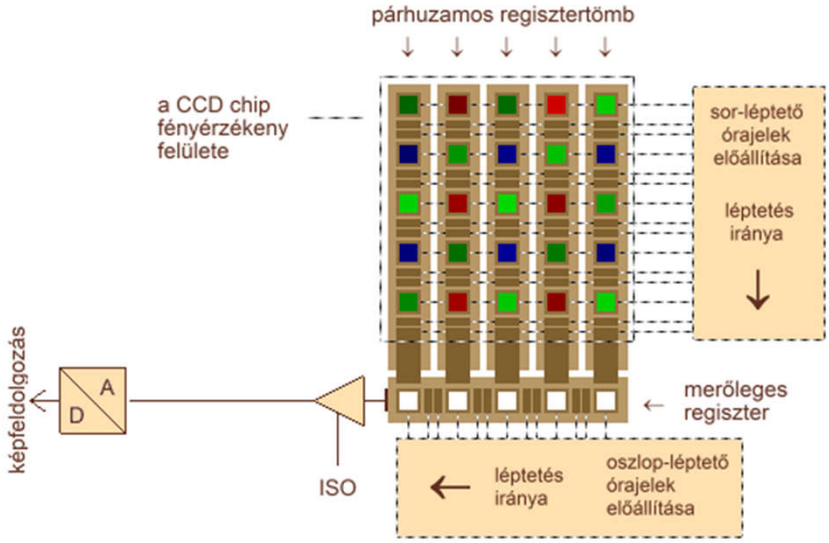


$$V_3 > V_2 > V_{kusz} > V_1$$



$$V_3 > V_{kusz} > V_2, V_1$$

CCD működésének szemléltetése



www.mit.bme.hu/~hadhazi/Oktatas/OKD/GIFek/CCD.gif

Szcintilláció

- Nagyobb energiájú fotonokra érzéketlenek:
  - Pl. Röntgen, gamma, stb.
- Szcintilláció:
  - Cél látható / detektor által érzékelhető fotont generálni
  - Újfent a foto-elektromos kölcsönhatáshoz nyúlunk
  - Olyan anyagot választunk, melyre igazak az alábbiak:
    - Z eléggé nagy – gyakori a kölcsönhatás
    - Van olyan elektronja, melyre $E_{he} \approx E_f - 5eV$
  - E mögé helyezve hagyományos detektort érzékelhetővé válnak a nagyobb energiájú fotonok is
  - Pl.: CsI kristályok röntgennél

Milyen zaj terheli a képeket

- Fotonok inherens zaja
  - Fotonok modellezése ergodikus Poisson folyamattal
  - $\mathrm{E}\{X\} = Q$ esetén $\mathrm{var}\{X\} = \sqrt{Q}$.
- Fényérzékeny MOS kondenzátor
  - Sötét áram: P-N záró állásában is folyik áram, valamint a háttérsugárzás is generál áramot.
    - Kalibrációval kompenzálható
  - Előző felvétel beégése:
    - Csak ha túl kevés idő telik el két felvétel között
- Analóg erősítőből származó zaj
- A/D kvantálási zaja: egyenletes eloszlású (lsd ML3)
- Szcintilláció zaja (ha szükséges)

Dinamika tartomány

- Full Well Capacity (FWC [e^-]):
  - A P-SI réteg csak véges számú elektront képes tárolni
  - Hozzávetőlegesen 5E4 elektron egy mai érzékelőnél
  - Orvosi berendezéseknél E5 nagyságrendű
- Kiolvasási zaj (RN [e^-]):
  - Kalibrált MOS kondenzátorok zaja (+ a beégés, ha van)
  - Ha jó a kalibráció, akkor E-1 nagyságrendű
- Analóg digitális konverzió zaja (ADCN [e^-]):
  - Lsd. ML 3, 1E-5 – nél általában kisebb
- Dinamikatartomány bitekben: $D = \log_2\left(\frac{FWC/P}{P \cdot RN + ADCN}\right)$
  - P: analóg erősítő erősítése

Dinamika tartomány

- P általában állítható:
  - ADC-t tipikusan úgy tervezik, hogy P=1 esetén az FWC adja a maximális kimenetet
  - Orvosi eszközök esetében csak kis tartományban állítható
  - P<1 állításnak az eddigiek értelmében nincs túl sok értelme
  - P>1 esetén romlik a dinamika, de kevesebb foton esetén is kihasználhatjuk az A/D átalakító teljes tartományát
  - Fényképezőgépeknél az erősítést ISO P*100 alakban állítjuk
    - Az ISO a szabványosítási szervezetre, illetve a régi kisfilmes (ISO/ASA 50/100/200/400/800/1600) gépek elnevezéséből maradt ránk

P<1 problémája: FWC-nél több elektront úgy sem képes tárolni egy MOS kapacitás

Képrögzítés egyéb fizikai hibái

- MOS kapacitás hibája
  - Halott pixel: függetlenül a megvilágítástól mindig sötétáramnyi töltés generálódik benne
  - Forró pixel: megvilágítástól függetlenül mindig telített
  - Ezek a hibák a szomszédos érzékelők által mért intenzitásokból kiinterpolálhatóak
- Szisztematikus zaj
  - Orvosi képalkotás során használt flat detektorok tipikusan több blokkból állnak össze:
    - Blokkonként eltérő hibájú A/D, illetve analóg erősítő
    - Kompenzálni kell a hatást, különben zavaró lehet (főleg a rekonstruált képeken)

Képformátumok

- Veszteségmentes
  - Pontosan visszaállítható az eredeti kép
  - BMP, PNG, (TIFF), JPEG2000 megfelelően beállítva
- Veszteséges
  - Nem állítható vissza a teljes információ
  - JPEG, JPEG2000, Fraktál tömörítés
- Tárolók amik sokmindent tartalmazhatnak
  - TIFF, DiCom

BMP, TIFF

- Bitmap Image (.bmp)
  - Az összes képpont intenzitásának szerializációját tárolja
  - Esetleg az adatokat LZW tömöríti
- Tag Image File Format (.tif)
  - Különböző színábrázolási és tömörítési módokat támogat
  - Több réteget, rétegek átlátszóságát is kezeli
  - LZW / (Huffman) Futáshossz / JPEG kódolás
  - Professzionális használatban (tördelő, grafikus szoftverekben) elterjedt, hétköznapiban nem annyira

Graphics Interchange Format (.gif)

- Jellemzői:
  - Legfeljebb 8 bites képeket kezel (színes esetben is)
    - +RGB paletta: csökkenhető a kvantálásból eredő hiba
  - LZW veszteségmentes tömörítést alkalmaz
  - GIF 89-től animált képek
- Története:
  - ’83-ban az Unisys szabadalmat jegyzett az LZW-re
  - ’94-től üzleti felhasználóktól használati díjat követelt
  - ’99-ben jogi eljárás azokkal szemben, akik nem licence-elt szoftverrel készült GIF képeket használtak weboldalukon

Lempel-Ziv-Welch kódolás

- Változó bithosszú kódolás
- Lépései:

1. Szótárat inicializálunk minden lehetséges pixel intenzitással
2. Kikeressük a kódolni kívánt sorozat azon leghosszabb eddig még nem kódolt prefixét (***W***), mely már szerepel a szótárba (***k*** kóddal)
3. Hozzátoldjuk a tömörített kép végéhez ***k***-t, majd bővítjük a szótárat [***W***|***a***]-val, ahol a ***a*** tömörítendő bitfolyam ***W*** utáni első eleme.
4. GO TO 2

➢ A 3. lépésbeli ***k***-t mindig annyi biten írjuk ki, amennyin ábrázolható a szótár összes kódja (ez a változó kódhossz oka)

Lempel-Ziv-Welch kódolás példa

- Például kódoljuk az alábbi intenzitásképet:

1	2	1
2	3	2
1	2	1

  – A bitsorozathoz sorosítani kell a képet, pl. oszloponkénti szerializálással: [1,2,1,2,3,2,1,2,1]
- Átlagos teljesítménye:
  – Angol szövegeknél átlagosan felezi a file méretét
  – Képek esetén a ¾-edes arány tekinthető átlagosnak

Portable Network Graphics (.png)

- Motivációja: GIF lecserélése (LZW kihagyása)
- Jóval fejlettebb a GIF-nél:
  - α csatornák, γ korrekció
  - Palettás / 16 bites szürkeskálás / 48 bites színábrázolás
  - Fokozatos megjelenítés
  - De nem támogat animációt, arra az MNG / APNG szolgál
- Veszteségmentes, két fázisú tömörítés:
  - 1. fázis: egyszerű lineáris szűrés alapú predikció
  - 2. fázis: Deflate (LZ77) tömörítés (nincs szabadalmazva)

Gamma korrekció: nemlineáris leképezése az intenzitásnak – CRT-k esetén pl. az intenzitás és a katód feszültsége nem egyenes arányos – ezt hivatott eredetileg korrigálni.

PNG tömörítése – szűrés

- Motiváció: predikció szűréssel, csak a predikciós hibát kelljen tömöríteni (nincs nagy, nagyságrendbeli változás)
- Alkalmazható szűrők:
  - Különböző szűrők a bitfolyam előző pixeleinek intenzitásai alapján számított predikció és az aktuális pixel intenzitásának különbségét állítják elő, pl.:

-1	-1	-1
-1	4	

  - Soronként eltérő szűrés megengedett, megválasztásuk heurisztikus eljárással történik
  - A szűrt kép minden pixele egész értékű kell, hogy legyen!
  - Cél a szűrt kép értékkészletének minimalizálása

Cél hogy a predikcióval egy olyan szűrést végezzünk el, ami csak már a vevő oldalra átért pixelek intenzitásait „használja fel”, valamint az így előálló kép értékkészlete minimálissá válik.

PNG tömörítése – DEFLATE

- Duplikált sorozatok keresése:
  - LZ77-el tömörít – véges hosszú pufferben keresi a tömöríteni kívánt bitsorozat leghosszabb prefixét
  - Pointer a minta előző előfordulására, és hosszára, és az azt követő első intenzitás értékét tároljuk
- Huffman kódolással tömörítés:
  - Lsd. Digitális technika
  - Gyakoriság alapján optimális kódhosszú tömörítés
    - Különböző intenzitások – különböző hosszúságú kód
- Fokozatos megjelenítés:
  - Több menetben, több felbontásban tömöríti a képet
  - De minden pixelt csak egyszer tartalmaz a file

Joint Photographic Experts Group (.jpeg / .jpg)

- Jellemzői:
  - Több réteg, rétegenként különböző átlátszóság
  - 16 bit / csatornás értékkészlet
  - Veszteséges és veszteségmentes tömörítést is támogat
- Alkalmazási területe:
  - Webes képek
  - Hobbi fényképezőgépek
  - Orvosi területen tipikusan nem (a veszteséges tömörítés miatt)

Veszteséges JPEG tömörítés

1. Színtér transzformáció:
   - RGB-ből Y'CrCb térbe írjuk át a színeket
     - Y': gamma korrekció utáni fényerő
     - Cr, Cb: vörös és kék árnyalat intenzitása
   - Ezt a lépés néha kihagyják, és csatornánként tömörítenek, de ez nem teljesen szabványos
2. Színcsatornák alul-mintavételezése:
   - Cb, Cr komponensek alulmintavételezése
     - Az Y'-ra sokkal érzékenyebb a szemünk (több pálcika, mint csap)
   - Innentől a három csatornát külön kezelik

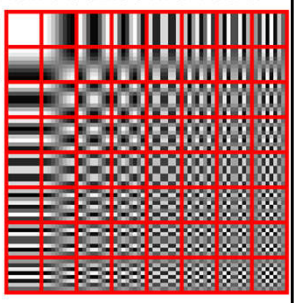
Y': luminance – gamma korrekciót követően megállapított fényerő
Cr: red-difference chroma
Cb: blue-difference chroma

Veszteséges JPEG tömörítés

3. Lépés: 8 × 8 méretű blokkok kialakítása
   - Minden csatornát ilyen diszjunkt blokkokra osszuk fel
   - Ha ilyenekből nem fedhető a csatorna, akkor extrapolál
4. Lépés: Diszkrét Koszinusz Transzformáció (DCT)
   - Minden 8×8-as blokkra egyenként transzformál
   - Ortonormált, 2D koszinusz függvény által leírt bázisokra vetít:

$$f(u,v) = \alpha(u,v) \cdot \cos\left[\frac{(2x+1)u \cdot \pi}{16}\right] \cdot \cos\left[\frac{(2y+1)v \cdot \pi}{16}\right]$$

   - Transzformáció előtt 0 középpontúvá skálázza az intenzitásokat
   - Miért nem Fourier transzformáció?
     - Szelektált DCT bázisok feletti reprezentáció pontosabb



Bázisfüggvényekben +1: így elkerüljük a 0-val való szorzást => minden sor befolyásolja az eredményt (bijjektivitás miatt szükséges)

Veszteséges JPEG tömörítés

5. Kvantálás:
   - Emberi látás érzékenyebb az alacsonyfrekvenciára
   - Képek esetén a jelenergia is nagyrészt alacsony frekvencián tárolódik, de persze a fázisérzékenység sem elhanyagolható
   - $B_{(i,j)} = \text{round}\left(DCT\left\{I_{(i,j)}\right\}/Q\right)$
   - Eddig az opcionális csatornánkénti alul-mintavétel mellett ez az egyetlen nem invertálható lépés, tömörítés hatásfokát Q elemeinek amplitúdója határozza meg (ez állítható).
6. Kódolás:
   - Együtthatókat cikk-cakk trajektória mentén sorosítja
   - Ezen futáshossz + Huffman kódolást alkalmaz

Kvantálás után magasfrekvenciás komponensek tipikusan 0-k, ez az entrópia alapú kódolásnak igencsak kedvez

Veszteséges JPEG tömörítés

5. Kvantálás:
   - Emberi látás érzékenyebb az alacsonyfrekvenciára
   - Képek esetén a jelenergia is nagyrészt alacsony frekvencián a[illegible]m elhanyagolható
   - $B_{(i,j)} = \text{round}\left(DCT\left\{I_{(i,j)}\right\}/Q\right)$

Kvantálás utáni együtthatók

Elemenkénti osztás

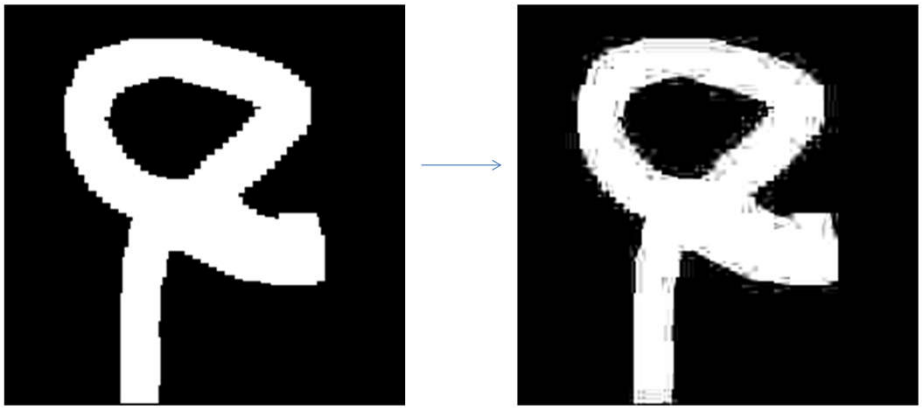
(i,j)-edik blokkja az input képnek

Szabványban meghatározott kvantálási mátrix skalárszorosa. Ez is egy előre „bedrótozott” mtx – nincs adaptivitás

6. Kódolás:
   - Együtthatókat cikk-cakk trajektória mentén sorosítja
   - Ezen futáshossz + Huffman kódolást alkalmaz

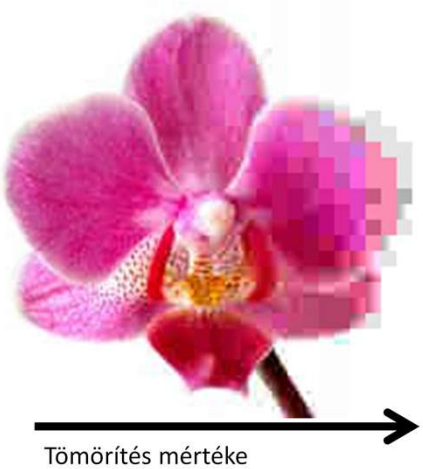
Veszteséges JPEG artifaktumai

- Ringing effektus: meredek átmenetű alul-áteresztés (lsd. Gibbs artifakt)



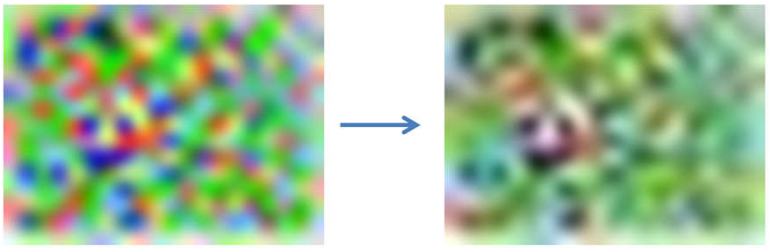
JPEG artifaktumok

- Blokkosodás:
  - Minél nagyobb a tömörítés rátája (Q amplitúdója), annál látványosabb
  - Oka a blokkonkénti tömörítés



JPEG artifaktumok

- Elszíneződés: Cr, Cb csatornák durvább alul-mintavételezése miatt



- Elmosás:
  - Mértéke függ a tömörítés fokától

Digital Imaging and Communications in Medicine (.dcm)

- Lényegében egy szabvány, melynek része egy file formátum
- DCM, mint konténer formátum:
  - Tag-ekből épül fel (pl. mint egy XML)
  - A kép is egy ilyen tag, melyhez egy másik tag-ben megadható a formátuma (png, tiff, jpeg)
  - Egyéb meta adatok is tárolhatóak benne:
    - Melyik intézmény, melyik osztályán
    - Kiről, milyen felvételi elrendezésben
    - Leletek bizonyos elemei (pl. kerekárnyék szegmentációk)

Digital Imaging and Communications in Medicine

- A szabvány leírja a fájlok archiválásának módját
  - A képek megjelenítésében és tárolásában résztvevő szerverek hálózatának felépítését
  - A hálózat kommunikációs protokollját
  - PACS (Picture Archiving and Communication System) rendszerek ehhez igazodnak
- A szigorú szabályozás több célt is szolgál
  - Legfontosabb, hogy a felvételek ne vesszenek el
  - A különböző időpontban készült felvételek összehasonlíthatóak legyenek (lsd. később képregisztráció)