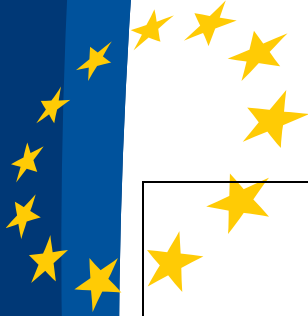


Értékünk AZ **EMBER**

Humánerőforrás- fejlesztési Operatív Program



Czap László

KÉPFELDOLGOZÁS

Magyarország célba ér

NEMZETI
FEJLESZTÉSI
TERV



A jegyzet a HEFOP támogatásával készült.
© Miskolci Egyetem. Minden jog fenntartva

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	5
1. Az emberi látás	6
1.1. Az emberi szem felépítése	6
1.2. Látásunk tulajdonságai	10
2. Színrendszerek	16
2.1. Az RGB színrendszer.....	16
2.2. A CMY és a CMYK színrendszer	20
2.3. Az YUV színrendszer.....	25
2.4. A HSV színrendszer	27
3. A képmegjelenítés és képfelvétel eszközei	30
3.1. A televíziók és monitorok képmegjelenítése.....	30
3.2. Képfelvevő eszközök	32
3.2.1. Képfelvétel az elektronikai gyártásellenőrzésben.....	34
4. Képfeldolgozási műveletek	42
4.1. Pont-pont műveletek.....	43
4.1.1. Hisztogram transzformációk	43
4.1.2. Aritmetikai és logikai műveletek.....	55
4.2. Lokális műveletek	59
4.2.1. Konvolúción alapuló műveletek.....	59
4.2.2. A konvolúció néhány tulajdonsága	79
4.2.3. Sorrendi szűrések.....	83
4.3. Műveletek a síkfrekvencia tartományban	86
4.3.1. A síkfrekvencia tartományban végzett szűrés és a konvolúció kapcsolata	107
5. Morfológiai műveletek	110
5.1. Szegmentálási hibák korrigálása	110

6. Alakzatfelismerés.....	122
7. Optikai ellenőrzés az elektronikai gyártásban.....	125
8. Képtömörítés	133
9. Hangtömörítés	144
9.1. Hangkódolás az MPEG szabvány szerint.....	144
9.2. Beszédkódolás lineáris predikcióval.....	147
Tárgymutató.....	151
Bevezetés.....	5
1. Az emberi látás	6
1.1. Az emberi szem felépítése.....	6
1.2. Látásunk tulajdonságai.....	10
2. Színrendszerek	16
2.1. Az RGB színrendszer.....	16
2.2. A CMY és a CMYK színrendszer	20
2.3. Az YUV színrendszer.....	25
2.4. A HSV színrendszer	27
3. A képmegjelenítés és képfelvétel eszközei	30
3.1. A televíziók és monitorok képmegjelenítése.....	30
3.2. Képfelvevő eszközök	32
3.2.1. Képfelvétel az elektronikai gyártásellenőrzésben.....	34
4. Képfeldolgozási műveletek	42
4.1. Pont-pont műveletek.....	43
4.1.1. Hisztogram transzformációk	43
4.1.2. Aritmetikai és logikai műveletek.....	55
4.2. Lokális műveletek	59

4.2.1. Konvolúción alapuló műveletek.....	59
4.2.2. A konvolúció néhány tulajdonsága	79
4.2.3. Sorrendi szűrések.....	83
4.3. Műveletek a síkfrekvencia tartományban	86
4.3.1. A síkfrekvencia tartományban végzett szűrés és a konvolúció kapcsolata	107
5. Morfológiai műveletek	110
5.1. Szegmentálási hibák korrigálása	110
6. Alakzatfelismerés.....	122
7. Optikai ellenőrzés az elektronikus gyártásban	125
8. Képtömörítés	133
9. Hangtömörítés	144
9.1. Hangkódolás az MPEG szabvány szerint.....	144
9.2. Beszédkódolás lineáris predikcióval.....	147
Tárgymutató.....	151

Bevezetés

A számítógépek sebességének és tároló kapacitásának rohamos növekedése lehetővé tette a nagyméretű, többdimenziós objektumok feldolgozását. Szóhasználatunkban képnak a digitalizálás során kapott két- vagy többdimenziós tömböket fogjuk tekinteni, az ezeken végzett műveleteket értjük képfeldolgozás alatt. A képfeldolgozás rendszerint a kép átalakítását vagy elemzését jelenti. A kép átalakítása során újabb kép keletkezik, amely jobban megfelel céljainknak. Ilyen lehet pl. a zajcsökkentés, a kép vagy egyes részleteinek élesítése (keményítése), de a magasabb szintű feldolgozás előkészítő lépései is. A kép elemzése információ kinyerését jelenti a képből. Példaként említhetjük a képen végzett méréseket (méret, hely, helyzet, jelenlét meghatározás), vagy az optikai karakterfelismerést. A magasabb szintű analízis, a kép értelmezése egészen eltérő megközelítést igényel, ezért nem tekintjük a jegyzet anyagának.

A Képfeldolgozás tárgyat a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán a Villamosmérnöki, Mérnök informatikus és Mechatronikai mérnök szakos hallgatók hallgatják. Az elméleti alapot a Kommunikációelmélet és Digitális jelfeldolgozás tárgyak nyújtják.

Példáinkban általában kétdimenziós képeken fogjuk elvégezni a feldolgozás lépéseit, a műveletek kiterjesztése színes képekre, vagy a mozgókép egyes képkockáira nem jelent leküzdhetetlen nehézséget.

A szerző köszönetét fejezi ki Jordán Gábor, a JABIL Circuit Hungary munkatársa, az Agilent Technologies, és Molnár László segítségével.

Miskolc, 2007. szeptember

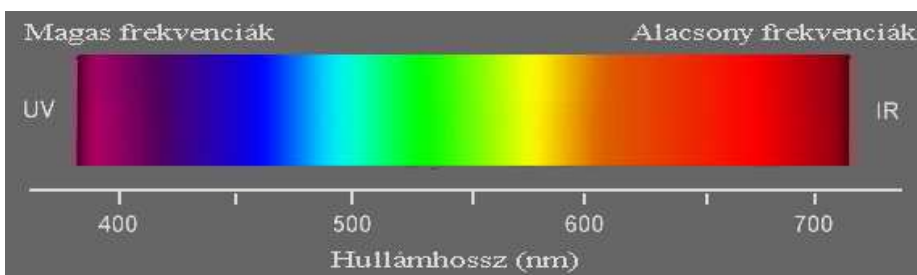
Dr. Czap László, PhD
egyetemi docens

1. Az emberi látás

Ebben a fejezetben a látás képfeldolgozás szempontjából fontos tulajdonságaival ismerkedünk meg. Ezeket a jellemzőket elsősorban a képalkotásnál és képtömörítésnél fogjuk felhasználni.

1.1. Az emberi szem felépítése

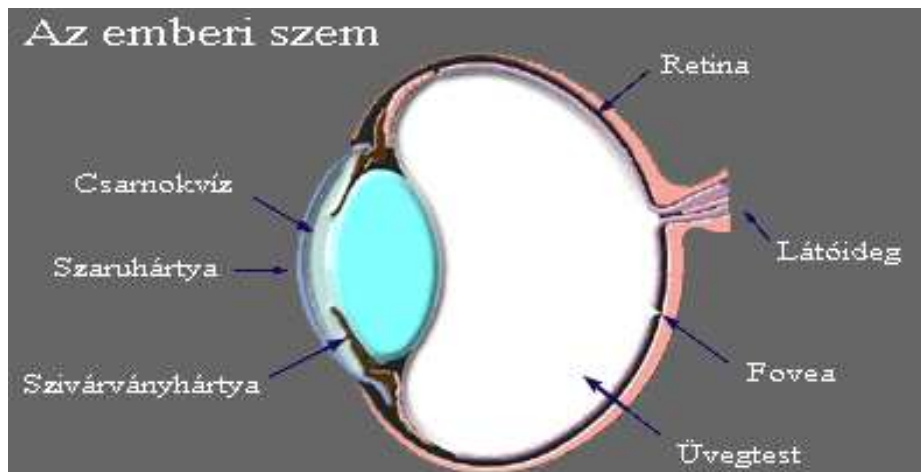
Szemünk az elektromágneses sugárzás kb. 380 és 780 nm közötti hullámhossztartományát képes érzékelni. A különböző hullámhosszú fénysugarakat finoman változó szivárványszíneknek látjuk (**1.1. ábra**). A látható fény hullámhossz tartományát alulról az ultraviola, felülről az infravörös sugárzás határolja. Az infravörös sugárzást hőszugárzásként érzékeljük. Vannak az infravörös tartományban működő hőkamerák, amelyek általában a $1-15$ μm hullámhossztartomány egy részét fedik le.



1.1. ábra. A szemünk által érzékelt színek a hullámhossz függvényében.

A fényképezőgépet az emberi szem mintájára alkották meg. A fényképezőgép sötét kamrája a szem belsejének felel meg. A fény a pupillán keresztül hatol a szemgolyó belsejébe. Ennek átmérője a fény intenzitásának függvényében változik, szabályozva a szembe jutó fény mennyiségét. A fényképezőgép fényrekesze (blende) hasonló funkciót lát el. A pupillán átjutó fénysugarakat a szemlencse fókuszálja a szemgolyó hátsó falát belülről borító ideghártyára (retina). Közeleli tárgyak figyelésekor a szemlencse domború, távolra nézéskor lapos. A közelpont kb. 15 cm, a távolpont $6-8$ m. Ezen a tartományon kívül nem tudjuk tovább domborítani, illetve lapítani a szemlencsét. A fényképezőgép objektív a lencsék mozgatásával éri el a fókuszba állítást. A szemlencse a retinán fordított állású képet hoz létre,

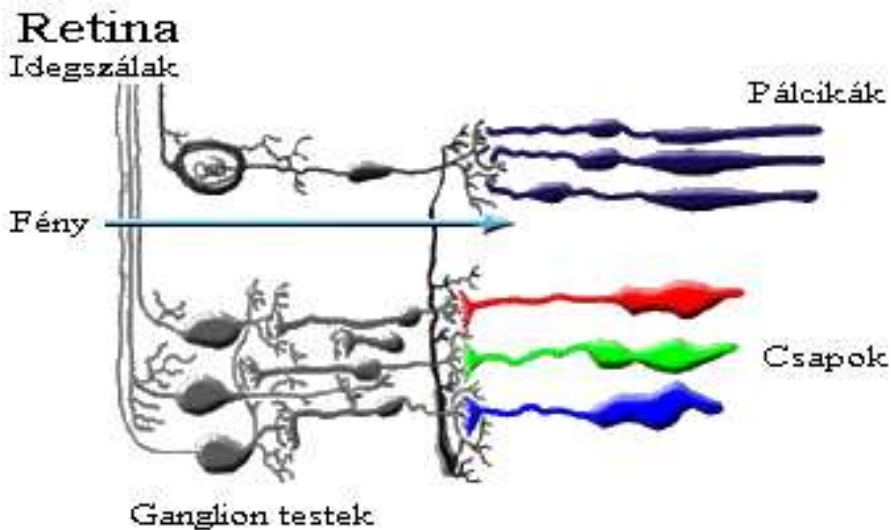
az agy gondoskodik róla, hogy ne fejjel lefele lássuk a világot. A szemgolyó metszetét az **1.2. ábra** mutatja.



1.2. ábra. Az emberi szem felépítése.

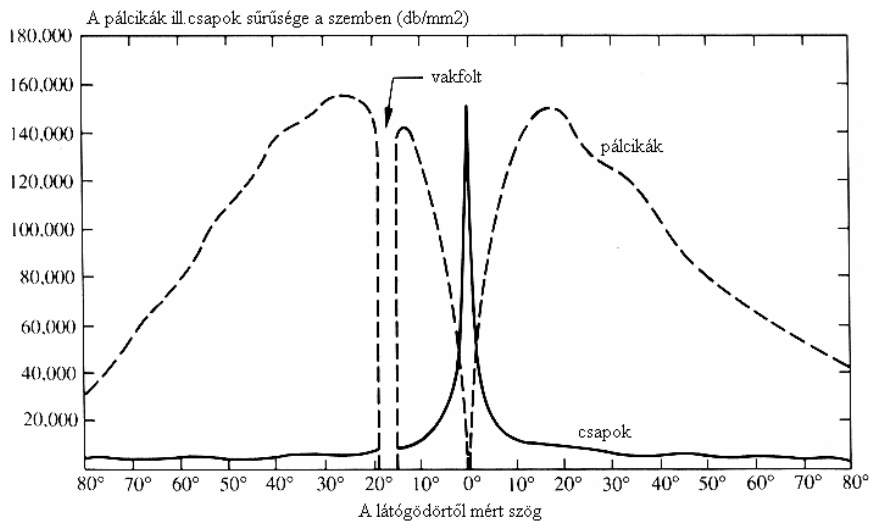
Az ideghártya legérzékenyebb része a sárgafolt, ezen belül is a látógödör. Ide vetítjük a szem mozgásával és fókuszálással a megfigyelt terület centrumát. A retina fényérzékítő sejtjeinek eloszlása jelentősen eltér a fényképezőgép filmjétől és a digitális fényképezőgépek képérzékítőjétől. A képérzékítők azonos sűrűséggel helyezkednek el a felületen, a retinán azonban a fényérzékítő sejtek (fotoreceptorok) eloszlása jelentős eltéréseket mutat.

A fényenergia csomagjait (fotonok) a fotoreceptorok alakítják elektromos idegi jelekké. Kétféle fényérzékítő sejtet ismerünk: a csapot és a pálcikát. Nevüket alakjukról kapták. (**1.3. ábra**) A csapok jó megvilágítás mellett a finom részletek és a szín látásáért felelősek. Gyenge fényben a pálcikák működnek hatékonyan, de csak szürke árnyalatos képet tudnak alkotni.



1.3. ábra. A szem fényérzékelő sejtjei.

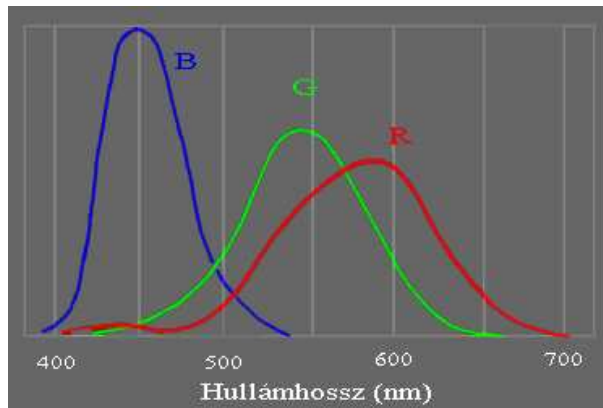
A csapok foglalják el a látógödör legérzékenyebb területét. A látómező széle felé jelentősen ritkúlnak, a periférikus látásunk színérzékelése gyenge. A csapok a látógödör közelében helyet engednek a pálcikáknak, amelyek itt helyezkednek el a legsűrűbben. A látómező széle felé a pálcikák is ritkúlnak. A látóidegek kilépési pontja a vakfolt, itt sem csapok, sem pálcikák nem találhatóak. A csapok és pálcikák eloszlását az **1.4. ábra** mutatja. Egy szemünkben kb. 6,5 millió csapocska és mintegy 120 millió pálcika gondoskodik az éjszakai és nappali látásról. A szemben lezajló kémiai folyamatok teszik lehetővé a sötétben alkalmazkodást. Sötétben mintegy $\frac{3}{4}$ óráig a látásunk egyre javul, egészen addig, hogy a pálcikát egyetlen foton is képes gerjeszteni.



1.4. ábra. A csapok és pálcikák sűrűsége.

Az emberi látás legalább két szempontból felülmúlja a fényképezőgépek képességeit: Az egyik a térlátás, a másik a mozgás detektálása. A két szem nézőpontja kissé eltérő, ez teszi lehetővé a mélység érzékelését. A szemünk még a gyenge felbontású periférikus területen is kitűnően érzékeli a mozgást, ami a túlélés fontos feltétele (pl. közlekedés).

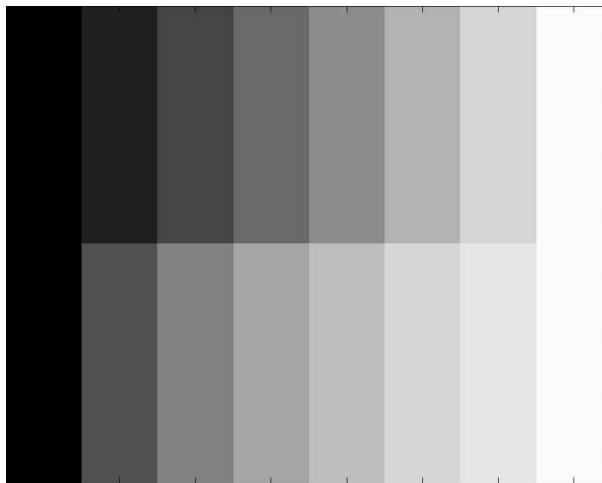
Háromféle csap gondoskodik a színes látásról. Ezek érzékenységi görbéjének maximuma a vörös (R, Red, 580 nm), a zöld (G, Green, 540 nm) és a kék (B, Blue, 450 nm) színek hullámhossztartományába esnek. A csapok az 1.5. ábra szerinti érzékenységi görbe szerinti súlyozással integrálják az őket érő fényt. Szerencsére nem tudunk különbséget tenni a monokromatikus és az összetett fény által keltett ingerület között, ez teszi lehetővé a képmegjelenítő eszközök megalkotását.



1.5. ábra. A háromféle csap érzékenységi görbéje.

1.2. Látásunk tulajdonságai

Világosság érzékelésünk jellemzője, hogy karakterisztikája logaritmikus. Lineárisan változó világosság esetén a sötét oldalon kisebb változást látunk, a világos oldalon nagyobb ugrást tapasztalunk.



1.6. ábra. Felül lineárisan, alul logaritmikusán változó világosság skála.

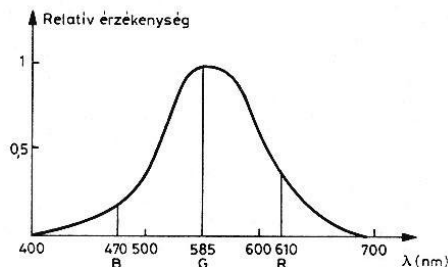
A pupilla mérete és a szemünkben lezajló kémiai folyamatok gondoskodnak róla, hogy alkalmazkodni tudjunk a környezet megvilágításához. A tűző napsütésben egy szürke felületről sokkal több fény jut a szemünkbe,

mint árnyékban egy fehér felületről. Az alkalmazkodó képességünk beállítja a helyes érzékeléshez szükséges „munkapontot”.

Szemünk érzékenysége a hullámhossz függvényében változó. Általában elmondható, hogy a látható fény hullámhossztartományának közepén látásunk érzékenysége meghaladja a szélein tapasztalható érzékenységet. Ezen azt értjük, hogy az érzékenységi görbe maximumánál található zöld színből több – világosabb és sötétebb – árnyalatot tudunk megkülönböztetni, mint pl. a kevésbé érzékeny tartományban található kékből.

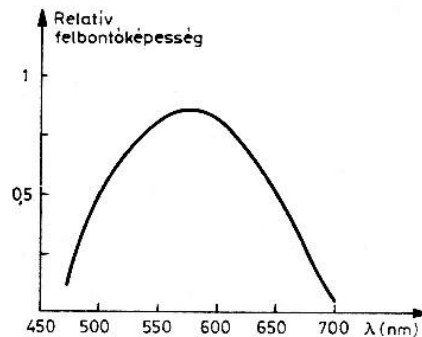
Látásunknak ez a jellemzője pl. az YUV színrendszer világosság meghatározásánál fog szerepet kapni.

A *relatív érzékenységet* a hullámhossz függvényében az **1.7. ábra** mutatja.



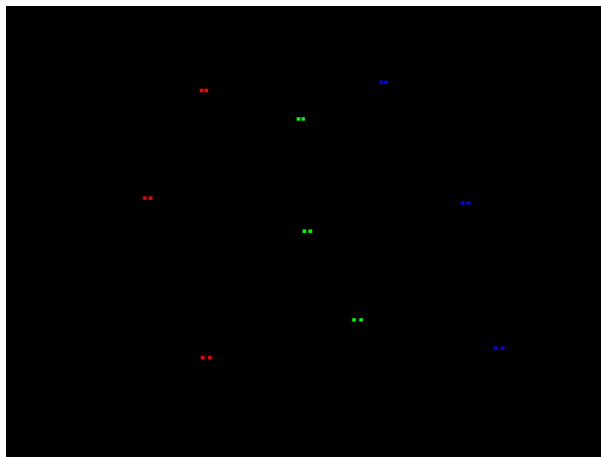
1.7. ábra. Szemünk relatív érzékenysége a hullámhossz függvényében.

A szemünk *relatív felbontóképessége* szintén hullámhosszfüggő, és a látható fény hullámhossztartományának közepén maximális. A felbontóképességtől függ, hogy két pontot különállónak látunk, vagy összemosisodik a képük.



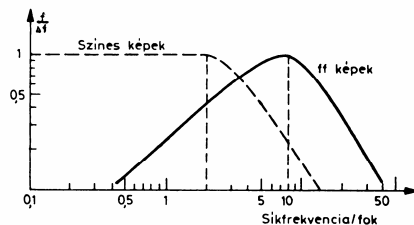
1.8. ábra. Szemünk relatív felbontóképesége.

Található olyan távolság, hogy az **1.9. ábrán** látható kék pontok összeolvadnak, míg a zöldek elkülönülnek.



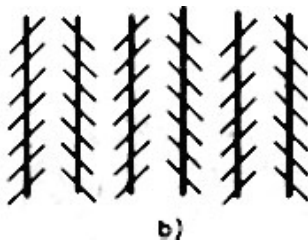
1.9. ábra. Tesztábra a relatív felbontóképeség érzékeltetéséhez.

Rendkívüli fontossággal bír látásunk *síkfrekvenciás érzékenysége*. Ebben a vonatkozásban síkfrekvencián az egy látószögfokra eső periódusok számát értjük. Eltérő a síkfrekvencia szerint változó érzékenységünk a színes és a fekete-fehér képekre.



1.10. ábra. Szemünk érzékenysége a síkfrekvencia változásával.

Fekete-fehér képekre az érzékenységünknek maximuma van. Hajlamosak vagyunk az apró tárgyak és vékony vonalak világosságát hibásan megítélni. Meglepő lehet, hogy a nagy felületek világosságát sem látjuk pontosan. Ezekre a jelenségekre számos optikai illúzió épül.



1.11. ábra. Dülöngélnek a vonalak?

Az **1.11. ábrán** a függőleges vonalak látszólag össze- vagy széttartanak, mert a ferde vonalakra nagyobb síkfrekvenciás érzékenységünk megzavarja a függőleges vonalak érzékelését. Színes képek esetében a kis síkfrekvenciák felé nem romlik az érzékenységünk. Szerencsére nem látunk valamit más színűnek csak azért, mert nagy.

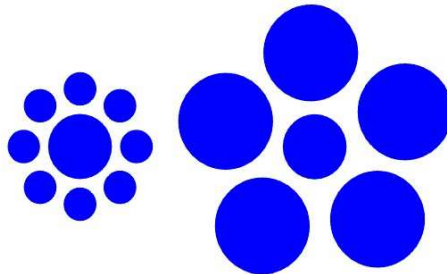
A síkfrekvenciás érzékenységünk jellemzőire építenek a képtömörítő eljárások.

Befolyásolja világosságérzékelésünket a vizsgált terület szomszédsága is. A szemünk és az agyunk az objektumok elkülönítésére rendezkedett be, az objektumok határán erősíteni igyekszik a különbséget. Ezért látjuk eltérőnek az **1.12. ábra** egyébként azonos világosságú szürke négyzeteit.



1.12. ábra. A bal, vagy a jobboldali téglalapok sötétebbek? (A hitetlenek a lap alján láthatják a kép közepének kivágása után kapott képet.)

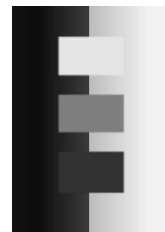
A különbségek erősítését nem csak a világosság terén műveljük, színek, méretek is az elkülönítési törekvés hatása alá kerülhetnek.

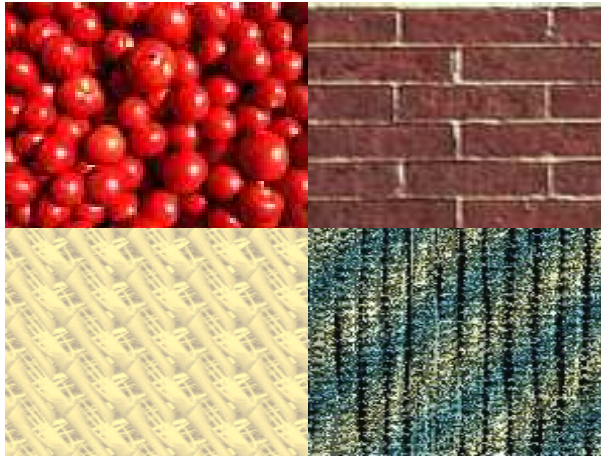


1.13. ábra. Melyik középső kör nagyobb?

A szemünket elég könnyű becsapni. Számos optikai csalódás (csalás) épül látásunk itt nem említett tökéletlenségeire is. Szórakoztató és tanulságos az illúziókat bemutató Internetes oldalak böngészése.

Meg kell még említeni a textúrát, mint jelenséget. Részletek nélkül annyit érdemes tudni róluk, hogy egy felület mintázatát értjük rajta. Sokszor nem tudjuk megfogalmazni a szabályt, ami szerint változik, de a szabály megsértését azonnal észre vesszük. Az objektumokat textúrájuk alapján is elkülöníthetjük.





1.14. ábra. Textúrák.

Eddig az állóképek megfigyelésekor tapasztalható jelenségekről tettünk említést. Külön vizsgálatokat igényel a mozgóképek érzékelése. Két fontos jellemzőt kell figyelembe venni a mozgókép megjelenítésekor:

- A folyamatos mozgás érzetéhez másodpercenként 20-25 mozgásfázist kell megjeleníteni.
- A képernyő vagy vetítővászon villódzásának elkerüléséhez kb. 50-szer kell felvillantani a képet.

Ezeknek a tulajdonságoknak a figyelembevételével alakították ki a kép-megjelenítés szabványos rendszereit. A mozifilm lejátszásakor 24 képet jelenítenek meg másodpercenként. A villódzás elkerülésére egy képet kétszer (esetleg háromszor) villantanak fel.

A televízió kép váltási frekvenciája az elektromos hálózat frekvenciájához igazodott. Ez nálunk 50 Hz. Ez a képernyő felvillanási frekvenciája. 25 képet továbbítanak másodpercenként, a váltott soros letapogatás gondoskodik a frekvencia kétszerezéséről. (Részletek a 3. fejezetben.)

2. Színrendszerek

A színek mindennapi életünkben jelen vannak festékszínként épületeken, papírra nyomtatva vagy elektronikus formában monitoron, TV képernyőjén, videó kamera kijelzőjén stb. A különböző megjelenési formák ugyanazt a valóságot kell, hogy ábrázolják, de az egyik a fény, a másik különböző festékek keverésével állítja elő az adott színt. A színeket másként rögzítik, eltérően dolgozzák fel, továbbítják, és különböző módon adják vissza. A színkezelés feladata, hogy az eszközök különbözősége ellenére, az eredeti kép- és színjellemzők a kimeneten természetes formában jelenjenek meg. Ezért van szükség a különböző színrendszerekre.

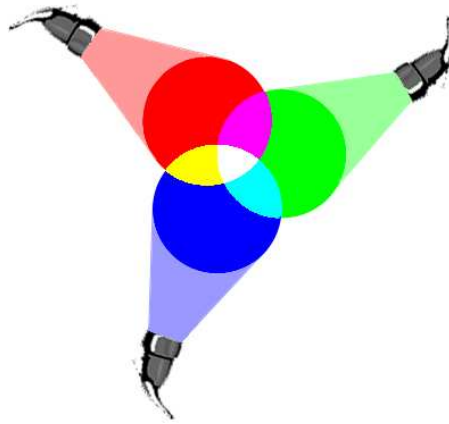
A tudósokat évszázadok óta foglalkoztatja a színek leírása, mérése és megjelenítése. Sokféle színrendszer létezik, az adott célra valamilyen szempontból mindegyik előnyös. Másképp keveredik a fény és a festék, a televíziós műsorszórás színrendszerét úgy alakították ki, hogy a régi fekete-fehér TV-k működőképesek maradjanak. Minden elterjedt színrendszernek vannak előnyei és hátrányai, az alkalmazás dönti el, melyik tulajdonság fontos.

2.1. Az RGB színrendszer

A szemünkben a színek érzékeléséért felelős háromféle csap érzékenységi görbéinek maximuma környékén keltett ingerületek összeadódnak és színérzetet keltenek. A szemünkbe jutó fény komponensei összegződnek (*additív színkeverés*). Az *additív színrendszer* alapszínei a vörös (R), a zöld (G) és a kék (B). A komponensek kezdőbetűiből ered a színrendszer másik elterjedt elnevezése: RGB. A színrendszer elemeinek szabványos hullámhosszát az előállíthatóságuk figyelembevételével állapították meg:

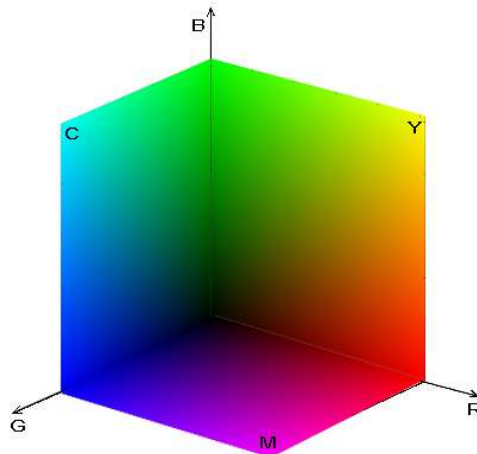
$$R: 700 \text{ nm}, G: 546 \text{ nm}, B: 435 \text{ nm}.$$

A szín megadása a háromdimenziós tér egy pontjának kijelölését jelenti. A számítógépes számábrázolás elterjedése miatt a korábbi 1 helyett 255-re szokás normálni az értékeket, tehát az egyes alapszínek a 0-255 tartományt foglalják el. A három alapszínből mintegy 16 millió szín és árnyalat állítható elő a számítógépes képfeldolgozás során, amelynek szemünk csak töredékét képes megkülönböztetni.



2.1. ábra. A fény összegző keveredése.

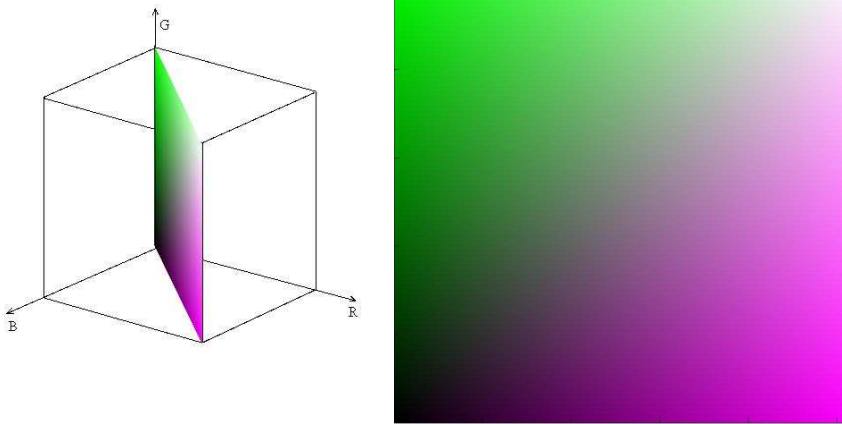
Ha egy adott színt akarunk ábrázolni a háromdimenziós *RGB* térben, a színt a koordinátaival azonosítjuk. Az *R* tengelyen az origótól (fekete) a pirosig, a *G* tengelyen a zöldig, a *B* tengelyen a kékig terjed a skála.



2.2. ábra. Az RGB színtér.

Az RG síkban a kék összetevő nulla. A négyzet origóval szemközi csúcán a sárgát találjuk. Hasonlóan a GB síkban az origótól legtávolabb a kékeszöld helyezkedik el. Az RB síkban a két alapszín maximuma a bíort jelöli ki.

Ha az RB sík átlójából kiindulva a G tengellyel párhuzamosan készítünk egy metszetet, a sík magába foglalja a testátlót, amely az origóbeli feketétől a legtávolabbi csúcs fehér pontjáig a szürkeárnyalatokat fedti le.



2.3. ábra. A metszet átlója az RGB kocka testátlója.



a
b c
d e

2.4. ábra. Színes kép összerakása az RGB alapszínekből.
a., R, b., G, c., RG, d., B, e., RGB

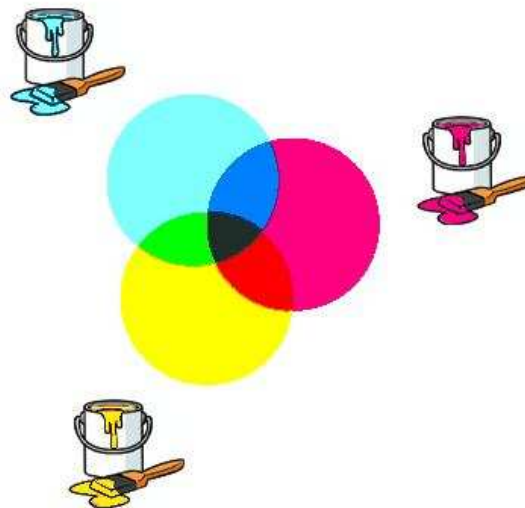
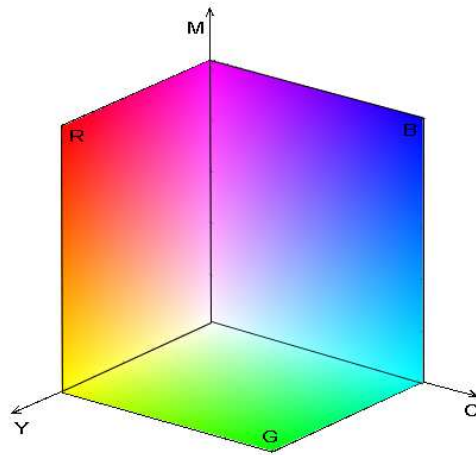
2.2. A CMY és a CMYK színrendszer

Az RGB színrendszerrel szemben – ahol az alapszínek valamelyikében szereplő összetevő az eredőnek is része – a CMY eredőjéből hiányozni fog, ami valamelyik alapszínből hiányzik. Ezért nevezik különbségi (*szubtraktív*) színrendszernek. A CMY színrendszer a festékkeverés színrendszere. A festék által fedett területről – fehér megvilágítás esetén – az a fény jut a szemünkbe, amit a festék nem nyel el. A szubtraktív színkeverés tehát azt jelenti, hogy amit az egyik komponens elnyel, azt az eredő is el fogja nyelni.

A CMY színrendszer is az alapszíneiről kapta a nevét: C – (Cyan) kékeszöld, M – (Magenta) bíbor, Y – (Yellow) sárga. Az RGB színrendszer alapszíneinek kiegészítő színei a CMY színrendszer alapszínei (és fordítva), így egymásba igen egyszerűen átszámíthatók.

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = 255 - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Ha mindhárom alapszín *nulla*, a papír színét (fehér) kapjuk nyomtatás után. A CMY tér origójában tehát a fehér helyezkedik el. Mit látunk, ha pl. az Y komponens nulla, a C és M maximális? A *kékeszöld* elnyeli a fehér fényből a pirosat, a *bíbor* pedig a zöldet, marad a *kék*. A C és M eredője tehát kék. Hasonlóan a C és Y eredője a zöld, az M és Y-é a piros.



2.5. ábra. A CMY színrendszer elemei és a szubtraktív színkeverés.

Ha mindhárom összetevő maximális, feketét kapunk. Mégsem így szokás a feketét nyomtatni, mert

- ez a fekete nem tökéletes,
- a sok színes festék drága,
- és áztatja a papírt.

Ezeket a hátrányokat küszöböli ki a negyedik komponens, a K (black, mivel a B már foglalt a kékre). A fekete a C , M és Y komponensek minimuma.

$$K = k = \min(C, M, Y)$$

Ezzel a CMYK színrendszer elemei (az egyértelműség kedvéért jelöljük őket kisbetűkkel):

$$c = C - K,$$

$$m = M - K,$$

$$y = Y - K.$$

A három szín azonos arányú keverésével – az RGB színrendszerénél tapasztaltakhoz hasonlóan – szürkeárnyalatokat kapunk. Itt azonban az origóban van a fehér és a legtávolabbi csúciban a fekete. A CMY színrendszerénél egy pontra a három összetevő megfelelő mennyisége kerül. Ennek alternatívája: A CMYK színrendszerben először kijuttatjuk a közös szürkét, és hozzátesszük a hiányzó mennyiséget a megfelelő festékekhez. Most is legfeljebb három festék kerül egy pontra, hiszen a minimummal meg egyező komponenshez nem kell hozzátenni. Az alapszínek és a kiegészítő színek fekete összetevője *nulla*. A nyomdai gyakorlatban a festékek felhordásának sorrendje nem kötött.

Kövessük végig egy kép kialakulását az egyes fázisok szerint! A példában a komponensek sorrendje: k, c, m, y .

A **2.6. ábrán** a fekete összetevő intenzitás képét és a fekete festék kijuttatása utáni képet látjuk. Minél nagyobb a fekete összetevő (az intenzitás képen annál világosabb), annál több festék jut a képpontba, annál sötétebb lesz.



a b

2.6. ábra. A fekete (k) összetevő intenzitás képe (a.,) és nyomtatási képe (b.,).



a	b
c	d
e	f

2.7. ábra. A 2.6 ábrán megkezdett „nyomtatás” folytatása.
a., c, b., ck, c., m, d., cmk, e., y, f., cmyk

2.3. Az YUV színrendszer

A PAL és SECAM rendszerű televíziós szabvány megalkotása előtt hosszú évekig vizsgálták a szín hozzáadásának modulációs és megjelenítési lehetőségeit. Úgy kellett megvalósítani a színinformáció továbbítását, hogy

- a meglévő fekete-fehér készülékek változatlanul használhatók legyenek, tehát a világosság az egyik összetevő,
- a színsegédvív hordozza a színinformációt, de a fekete-fehér vételt a lehető legkisebb mértékben zavarja.

A televíziós műsorszórás színrendszerében ezeknek az elvárásoknak megfelelően szétválasztották a világosság (*luminancia*) és szín (*krominancia*) összetevőket. A világosságot az Y összetevő képviseli (jelentése eltér a CMY színrendszerbelitől), figyelemmel a szemünk relatív érzékenységére. Az YUV komponenseket az RGB színrendszerből származtatjuk. A szín összetevők úgynevezett színkülönbségi jelként vannak jelen:

$$U=0,492(B-Y),$$

$$V=0,877(R-Y).$$

Az RGB alapszínekből az alábbi transzformációval kaphatók meg az YUV színrendszer elemei:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,147 & -0,289 & 0,436 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

A vevőkészülékben az YUV elemekből vissza kell állítani az RGB alapszíneket, mert a képernyő vezérlésére ezeket kell használni. Az NTSC televíziós szabvány az YIQ színrendszert használja.

Az YUV színrendszer rokona az YCbCr színrendszer.

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,299 & -0,587 & 0,886 \\ 0,701 & -0,587 & -0,114 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Mint látható, az Y összetevő megegyezik az YUV színrendszer Y -jával. A $Cb=(B-Y)$, a $Cr=(R-Y)$. Az YCbCr színrendszer a digitális rendszerek *luminancia* és *krominancia* komponensei. A nyolcbites számábrázoláshoz

könnyebben adaptálható, mivel az Y csak pozitív lehet, a Cb és Cr dinamikatartománya a *nullára* szimmetrikus, eltolással a $0-255$ tartományba helyezhető.



a	b
c	d

2.8. ábra. Az $YCbCr$ színrendszer elemei.
a., eredeti kép, b., Y , c., Cb , d., Cr

Szemünk érzékenysége a *krominancia* összetevőkre gyengébb, mint a *luminancia* komponensre.

Az $YCbCr$ színrendszer fontos szerepet játszik a képtömörítésben.

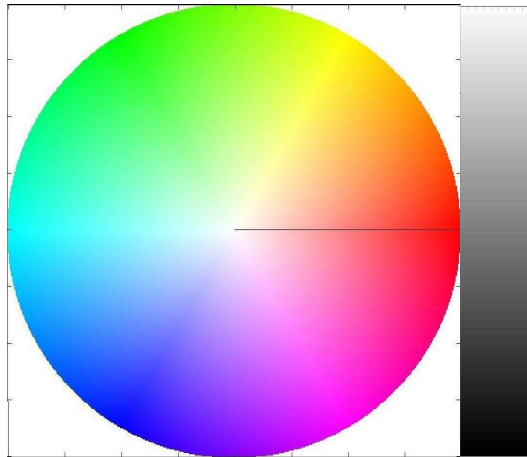
2.4. A HSV színrendszer

Képzeljük el, hogy az *RGB* koordinátarendszer testátlója felől nézzük a kérdéses színnek megfelelő pontot. Az *R* tengely irányát tekintjük *nulla foknak*, ehhez képest határozzuk meg a pont irányát. Ez lesz a *HSV* színrendszer *H* (*Hue, színezet*) komponense. Az *RGB* alapszínek és kiegészítő színek oldalszöge:

H (fok)	Szín
0	piros
60	sárga
120	zöld
180	kékeszöld
240	kék
300	bíbor

2.1. táblázat. Az alapszínek és kiegészítő színek jellegzetes színezete.

A *HSV* színrendszer második eleme az *S* (*Saturation, telítettség*). Ez a jellemző a szín élénkségét fejezi ki. Az alapszínek és kiegészítő színek telítettek, $S=1$. A **2.9. ábrán** az alapszínekkel (*RGB* vagy *CMY*) szemben – 180 fokos különbséggel – helyezkednek el a kiegészítő színeik. A szürke árnyalatainak telítettsége *nulla*. Az ábra baloldalán a színezetet és telítettséget látjuk, maximális világosság mellett. A színezet a piros irányával bezárt szög. A telítettség a kör középpontjában *nulla*, a kerületen *egy*.



2.9. ábra. A HSV színrendszer elemei.

A kétdimenziós ábrán a színrendszer harmadik eleme, a V (*Value, világosság*) nem szerepel. Az ábra jobb oldalán külön sávban látható.

A H komponens magyar megfelelőjét azért nem nevezzük színnek, mert a hétköznapi életben használt *szín* fogalmával nincs teljesen fedésben. Különbözőnek tekintett színek színezete megegyezhet.

A rózsaszín kis telítettségű piros. A barna az okkersárga sötét változata.

Az RGB színrendszer átszámítása a HSV színrendszerbe:

$$\text{Min} = \min(R, G, B), \text{Max} = \max(R, G, B)$$

$$\text{ha } \text{Min} = \text{Max}, \quad S = 0, \quad H = 0,$$

$$\text{ha } R = \text{Max}, \quad H = 60 \frac{G - B}{\text{Max} - \text{Min}},$$

$$\text{ha } G = \text{Max}, \quad H = 120 + 60 \frac{B - R}{\text{Max} - \text{Min}},$$

$$\text{ha } B = \text{Max}, \quad H = 240 + 60 \frac{R - G}{\text{Max} - \text{Min}},$$

$$S = \frac{\text{Max} - \text{Min}}{\text{Max}}, \quad V = \text{Max}.$$

A HSV színrendszernek vannak egyéb változatai is (HSB , HSL). Látásunk érzékenysége eltérő a három komponensre. A világosságból 400-500 árnyalatot, a színezetből mintegy 200 szintet, a telítettségéből kb. 20 fokozatot tudunk megkülönböztetni, ha a másik két jellemző állandó. Ha mindhárom összetevő változik (tónusos kép) összesen mintegy 4000 színárnyalat szükséges a tökéletes kép érzetéhez.

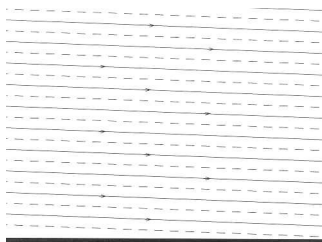
A HSV színrendszer rendkívül hasznos a képfeldolgozásban. A feladatok egy része egyetlen komponens módosításával elvégezhető. A világosság növelése-csökkentése, élesítés, kontraszt növelés-csökkentés és más világosság transzformációk csak a V komponenst érintik. Ennek nem csak azért van jelentősége, mert kevesebb számítást igényel (a képformátum konvertálása is számításigényes). Ennél fontosabb, hogy bizonyos műveletek – pl. az RGB színtérben – színtorzuláshoz vezethetnek, ezek elkerülhetőek a HSV színrendszerben végrehajtott transzformációkkal.

3. A képmegjelenítés és képfelvétel eszközei

A képfeldolgozás kezdeti évtizedeiben a televíziózás eszközei csatlakoztak a számítógépekhez. Ma inkább a számítástechnika eszközei vonulnak be a televíziózásba. Ebben a fejezetben röviden tárgyaljuk a televízió, illetve monitor néhány jellegzetességét. A képfelvételi eszközök közül a régi, elektroncsöves eszközökről nem teszünk említést, csak a félvezető alapú képalkotás alapjait érintjük.

3.1. A televíziók és monitorok képmegjelenítése

A látásunk jellemzőinél már találkoztunk a mozgóképek megjelenítésének szabályaival. Az európai televíziós szabványok másodpercenként 25 kép megjelenítését írják elő. Egy képet két *félképre* bontva, az egyik félképet a páros sorok, a másik félképet a páratlan sorok írásával jeleníti meg. Ez képenként két képernyő felvillanást jelent, tehát a villódzás frekvenciája 50 Hz . A *PAL* és *SECAM* szabvány a képet 625 sorra bontja. Ebből 576 látszik. A maradék 49 sor idején fut vissza a katódsugárcsőes készülékek elektronnyalábja a jobb alsó sarokból a bal felsőbe, de kihasználják mérőjelek, illetve a teletext továbbítására is. A bal felső sarokban kezdett képírás hozta azt a szokást, hogy a képsík origója – a koordináta-rendszernek megszokottól eltérően – a síknegyed bal felső sarkában van. Ez azzal az előnnyel is jár, hogy a kép mátrix reprezentációjának sorszámozásával egybeesik.



3.1. ábra. A televízió képernyő váltottsoros (interlaced) letapogatása.

A TV világosságjel egy soron belül analóg, így a műsorszórásnál nem merül fel a kérdés, hogy egy sor hány pontból, a kép hány oszlopból áll. Fő-

leg régebben, a kamera analóg jelének digitalizálásával nyerték a digitális képet. A digitalizálás során vetődik fel a felbontás kérdése. A hagyományos képernyő méretaránya 4:3. Ha négyzet alakú képpontokat szeretnénk, a digitalizálás során az 576 sor 4/3-szorosára, vagyis 768-ra kell választani a soronkénti pontok számát. Elterjedt a 720 pontos választás is.

Ennél nagyobb felbontásra a televízió nem képes. A korszerű monitoroknál szakítottak a váltottsoros letapogatással, minden felvillanáskor újra rajzolják a teljes képet. A szemünk kímélése érdekében megnövelték a képváltás frekvenciáját is, ma már 100 Hz fölötti az általános.

A televíziós műsor vétele során az YUV színrendszerben vett jelet át kell alakítani a képernyő meghajtására szolgáló RGB alapszínekké. A hagyományos, katódsugarcsöves televíziók és monitorok fénye nem lineárisan változik a vezérlő feszültség függvényében. Az összefüggést exponenciális függvénnyel közelítik:

$$L = U^\gamma$$

Az irodalomban az együtthatóról (γ) gamma korrekciónak nevezik az eljárást. A lineáris változáshoz a meghajtó jelet úgy kell torzítani, hogy a hatványozás után legyen lineáris, vagyis ($1/\gamma$) kitevőre kell emelni. A korrekciót monitorok vezérlése esetén a meghajtó kártyának kell elvégezni. A gamma értéke a gyakorlatban 2,2 és 2,8 közötti. A gamma növelése világosabb, kevésbé telített színekhez vezet. A γ csökkentése sötétebb, telítettebb színeket hoz létre. Nyomdai előkészítő rendszereknél fontos, hogy a monitoron pontosan azt lássuk, amit a nyomtatás után kapunk, amit professzionális eszközökkel lehet teljesíteni. Az olvasó valószínűleg nem pontosan olyannak látja ezt a dokumentumot, mint a szerző.

A gamma korrekció elvégezhető az RGB színtér mindhárom komponensére együtt, vagy egyenként eltérő is lehet.



a	b	c
d	e	f

3.2. ábra. Gamma korrekció. a., eredeti kép, b., $\gamma+$ (RGB), c., $\gamma-$ (RGB), d., $\gamma-$ (R), e., $\gamma+$ (G), f., $\gamma+$ (B)

3.2. Képfelvévő eszközök

A digitális képfelvévő eszközök az érzékelő áramkörök fizikai elhelyezkedése miatt a képsíkban diszkrét pozíciókban érzékelik a fényt. A mintavételezett képpontok számát általában technikai korlátok határozzák meg. Ha egy képet nagyítani akarunk, nincs az a felbontás, amely feleslegesen finom lenne. Ellentétben a hangokkal, ahol a hallható frekvenciatartomány korlátozza a sávszélességet, a képek részletgazdagságának nincs természetes korlátja. Az úrfelvételektől az elektronmikroszkópig sok nagyságrenden át változó felbontással készíthetünk képet ugyanarról a pontról. Ha pl. egy pepita zakót helyesen akarunk ábrázolni, minél távolabbról vagy nagyobb látószöggel fényképezzük, annál nagyobb képfelbontásra van szükség. A fotóriporterek számára készített digitális fényképezőgépek képpont-

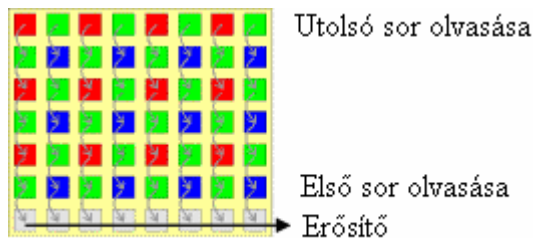
jainak száma tízmilliós nagyságrendű, egy színes képpontot három adat ír le. A képpontokat az angol *picture element* rövidítéseként *pixel* néven emlegetjük. (Egyesek már ezt is túl hosszúnak tartják, megjelent az irodalomban a *pel* elnevezés.)

A katódsugárcsőes képfelvevő eszközök elektromágneses eltérítése túlságosan pontatlan volt a képen végzett mérésekhez. Nagy áttörést jelentett a CCD kamerák megjelenése, ahol a pontosságot a félvezető eszközök elhelyezkedése határozta meg, ami nagyságrendi javulást okozott. Nem beszélve a kisebb méretről és energia felhasználásról, az öregedési jelenségek elmaradásáról, vagy az élettartam növekedéséről.

A CCD (*Charge Coupled Device, töltéscsatolt eszköz*) – talán meglepő módon – nem a képfelvétel új módjáról, hanem a jelek továbbítási eljárásáról kapta a nevét.

Képzeld el, hogy tüzet oltanak, vödörrel. Ahelyett, hogy mindenki odaszaladna a kúttól a tűzhöz a tele vödörrel, láncba állnak és mindenki átönti a vizet a szomszéd vödörbe.

Hasonló módon továbbítják a CCD áramkör elemei a töltéseket a kimenetre.



3.3. ábra. A CCD áramkör töltéstovábbítása.

Az RGB alapszínekre érzékeny cellák elhelyezkedésénél nem lehet szó nélkül elmenni azon sajátosság mellett, hogy a *zöld* cellákból rendszerint kétszer annyit találunk, mint *vörös* és *kék* társaikból (*Bayer szűrő*). Ismét a szemünk relatív érzékenységi görbéje bukkan fel.

Az utóbbi időben növekvő népszerűségnek örvend a CMOS képfelvévő áramkör. Tovább csökkenő fogyasztás mellett minden egyes képpontja külön címezhető, akárcsak a memóriák.



3.4. ábra. A CMOS képérzékelő felépítése.

Az érzékelő cellák elhelyezkedhetnek egy vonalban, ilyen áramkörök működnek a szkennerekben. A fényképezőgépek és kamerák érzékelői az ábrán látható mátrix alakzatba rendeződnek.

3.2.1. Képfelvétel az elektronikai gyártásellenőrzésben

A vizuális ellenőrzést az elektronikai gyártásban az 1970-es és 80-as években manuálisan, emberi szemek végezték. A 90-es években fokozatosan vette át szerepüket az automatizált optikai ellenőrzés (AOI, Automatic Optical Inspection). Az alkatrész sűrűség és a beültetési sebesség növekedése egyre nehezebbé tette a korábbi módszerek alkalmazását, ami a manuális ellenőrzés hibaarányának növekedésében mutatkozott meg. Az automatizált optikai ellenőrzés ugyanakkor a számítástechnikai háttér és a képfeldolgozás rohamos fejlődésével egyre megbízhatóbbá és gyorsabbá vált.

A felületszerelt technológia egyeduralkodóvá válásával szaporodtak az alkatrész alatt keletkezett, az optikai ellenőrzéssel felderíthetetlen hibák. A megbízhatóság további fokozásának igénye hívta életre az automatikus röntgen ellenőrzést (AXI, Automatic X-Ray Inspection).

Optikai képfelvétel

Az elektronikai szerelésben kialakított technológia lehetővé teszi a képfelvétel kontrollált körülményeinek kialakítását. A külső fény kizárása és a

megvilágítás gondos megtervezése és kialakítása állandó minőségű képalkotást garantál.

A megvilágító fej feladata a vizsgált terület rész homogén megvilágítása az előírt szögben, a megfelelő színekkel.

A **3.5. ábrán** látható megvilágító fej főbb jellemzői:

- hét LED gyűrű egymás fölött szegmentáltan,
- szegmentált megvilágítás-vezérlés („égtájak szerint”), különböző szögben beállított LED-ek.

A megfelelő színű megvilágítás alkalmazásával, az alkatrészbe gravírozott felíratok is vizsgálhatóvá válnak. A megfelelő megvilágítás beállítása próbálgatással lehetséges, a beállítást egy konfigurációs állományból olvassa ki a teszter az ellenőrzés során. A megvilágítás iránya meghatározza a felderíthető hibák típusát is.

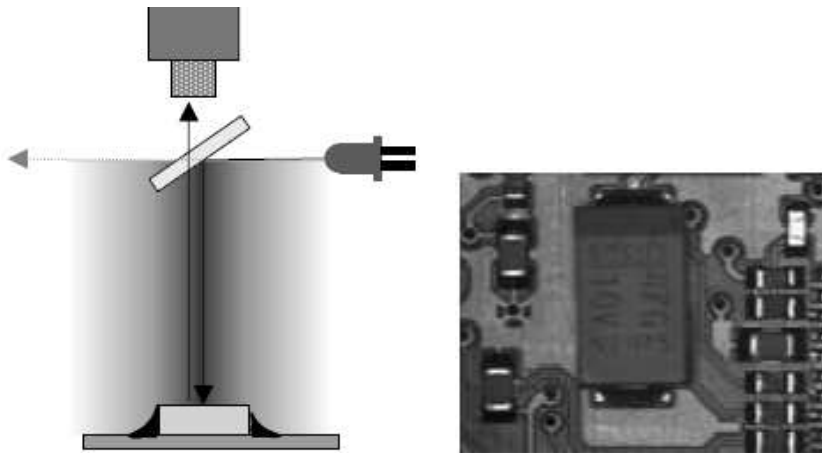


3.5. ábra. Megvilágító fej hét LED gyűrűvel.

A teszterekben és a beültető gépekben különféle megvilágítási módokat alkalmaznak, ami különböző szög alatti és különböző színű megvilágításokat jelent. A főbb megvilágítási módok:

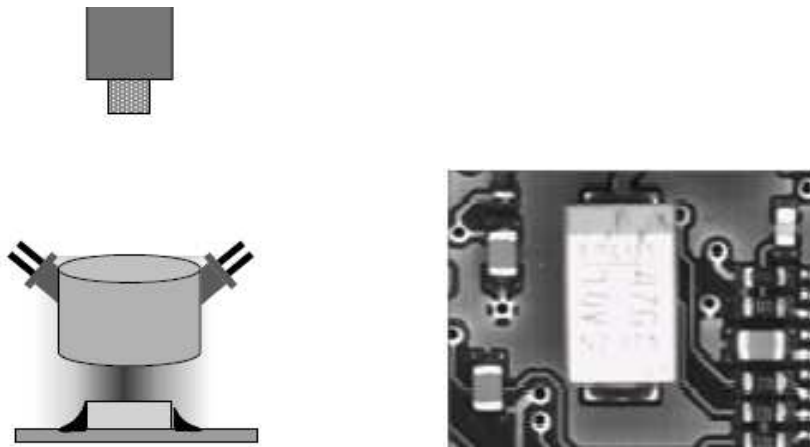
- direkt megvilágítás
- indirekt, diffúz megvilágítás
- szög alatti diffúz megvilágítás

A közvetlen, vagy direkt megvilágítás alkalmazása esetén a fényterelő elem (plán parallel lemez vagy fémbevonatú üveglap néhány % reflexióval) középpontja az optika tengelyével esik egybe. A módszer elvi rajza és egy így kapott kép a **3.6. ábrán** látható.



3.6. ábra. A közvetlen megvilágítás.

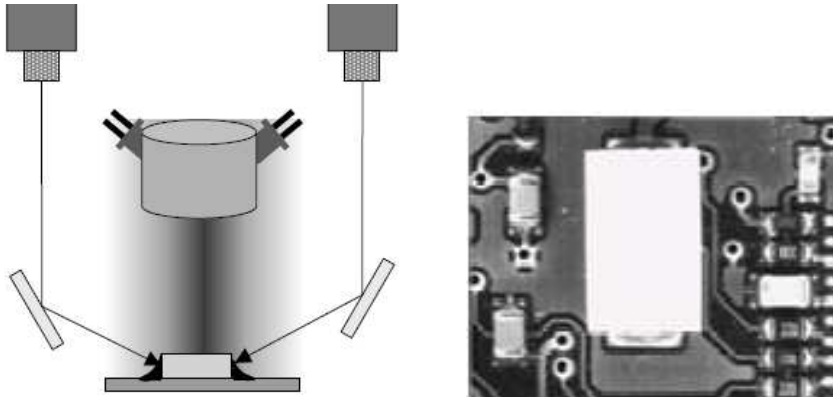
Az indirekt diffúz megvilágítás alkalmazása esetén a világítódiodák olyan szögben vannak az optikai egységbe helyezve, hogy annak törésmutatója a fénysugarakat a vizsgált területre szórtan, merőlegesen vetíti.



3.7. ábra. Diffúz megvilágítás.

A szög alatti diffúz képfelvételt elsősorban a forrasztott csatlakozások vizsgálatára alkalmazzák, 4 vagy 8 kamerával, tükrök segítségével, szög

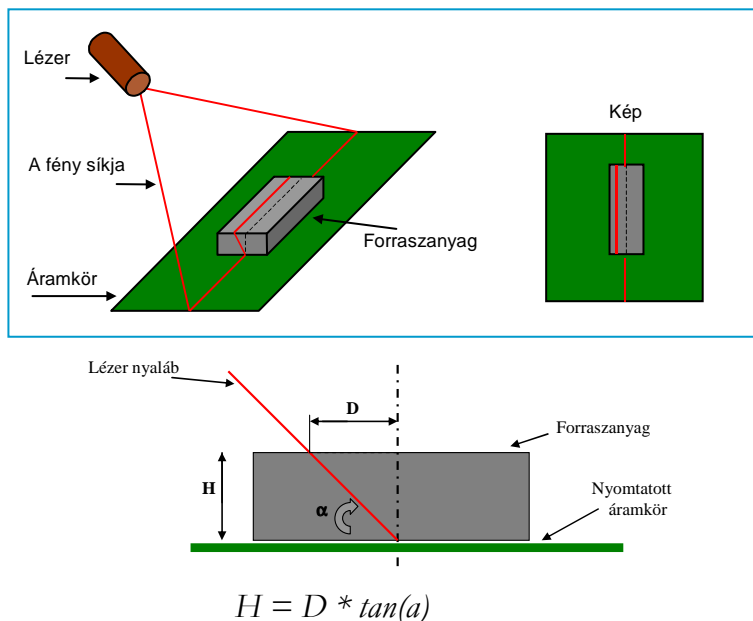
alatti nézetből vizsgálja a forrasztást. A kamerák 4 kamerás rendszerben 90° -ra, míg 8 kamera esetén 45° -ban helyezkednek el egymástól.



3.8. ábra. Szög alatti diffúz képfelvétel.

3D képalkotás a látható fény tartományában

Egyes hibák nem deríthetők fel a kép x-y síkjában, szükség van a magasság ellenőrzésére is pl. a forrasztanyag vastagságának mérése céljából. A jól fókuszált ferde fénynyaláb a kamera nézőpontjából a kép síkjában eltolódik.



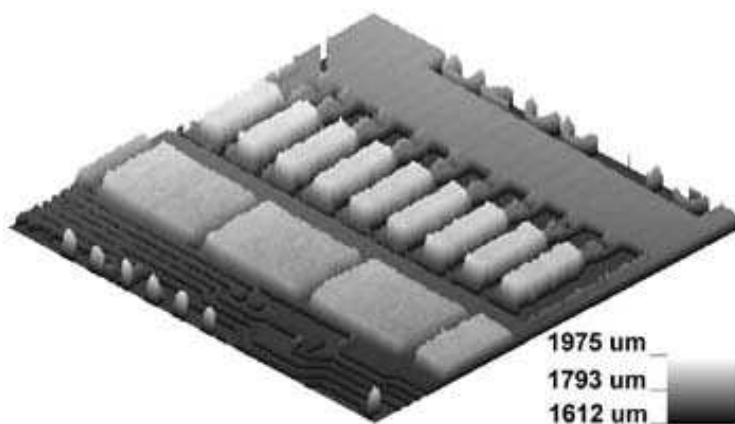
3.9. ábra. Magasságmérés az optikai tartományban. [Agilent]

Ennek az eljárásnak az a hátránya, hogy a kiértékelés sávonként történik, ezért nem áll rendelkezésre a tárgy magasságáról folyamatos információ, így a képalkotás is hosszadalmas. Az ilyen mérésből tulajdonképpen csak ugrásszerű, gyors változások érzékelhetők pontosan. Ez a mérési eljárás alkalmas a rétegvastagságok mérésére, de függőleges tengely mentén való elhelyezkedési hibák detektálására nem. A módszer továbbfejlesztett változatánál egy különleges optikai szűrő segítségével a nyomtatott lapra egyik irányban folyamatos, szinuszos intenzitás-eloszlású fényt vetítenek a kamera teljes látómezejére. Ezzel a mérés rendkívül gyorsan elvégezhető, hiszen a szokásos kétdimenziós feldolgozáshoz szükséges megvilágítások után csupán egy újabb megvilágítási lépést kell beiktatni ahhoz, hogy a teljes képmezőről a rá merőleges irányú méretekhez jussunk. Az így kapott képen bármely pontban meghatározható a magasság az alapszinthez tartozó és a pontban mért világosság eloszlás fázisából.

A mérés tehát a teljes képmezőben folytonos magassági képet állít elő, melynek pontossága kizárólag a fázisdetektálás pontosságától függ. A nagyobb pontosság végett nem egy mérést, egy képet készítenek, hanem egymástól eltérő fázisokkal rendszerint négyet. Ez teszi lehetővé, hogy a

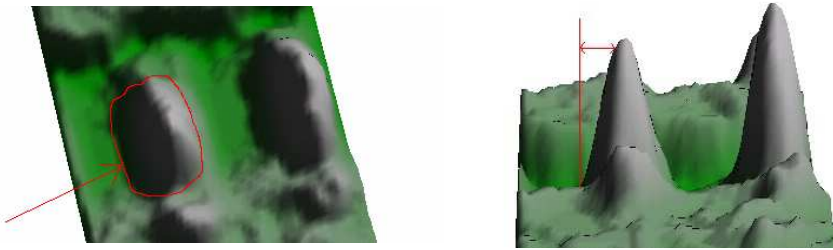
mérést mindig a hullám maximuma környékén végezzék, így a mérés kevésbé függ az alkatrész reflexiós képességétől és a megvilágító szinuszos jel hullámhosszától vagy más zavaró tényezőtől. A folyamat még így is rendkívül gyors, egy 100×200 mm-es mező teljes kiértékelése $10 \mu\text{m}$ pontossággal 10-15 másodpercet igényel.

Az **3.10. ábrán** a rézfólián fekvő forraszanyagról készített háromdimenziós kép látható. A vastagság nem csak képszerűen látszik, hiszen néhány tized milliméter különbség így nehezen fedezhető fel, hanem a felület sötétebb illetve világosabb a vastagság függvényében.



3.10. ábra. A forraszanyag vastagságát ábrázoló kép. [Molnár]

Ez lehetővé teszi, hogy a különböző vastagságú felületeket automatikusan elkülöníthessük. Ez az árnyalat nem csak relatív vastagságot jelöl, hanem abszolút mértékegységben is kalibrálható. Számítással akár a térfogat is meghatározható, ami a felvitel minőségének legfontosabb mutatója. Ha a paszta elegendő, de nem túl vastag, a kemencében az alkatrészek könnyen „felúsznak”, a felületi feszültség szinte a helyükre viszi őket. Ezzel a hibák száma jelentősen lecsökken, a kihozatal javul. Különösen fontos ez a mérés a BGA (Ball Grid Array, ónlabdás tokozás) és μBGA tokok beültetésénél, mert ezekben az esetekben a forrasztás után már csak igen drágán, AXI teszterrel kaphatunk információt a forrasztások minőségéről.

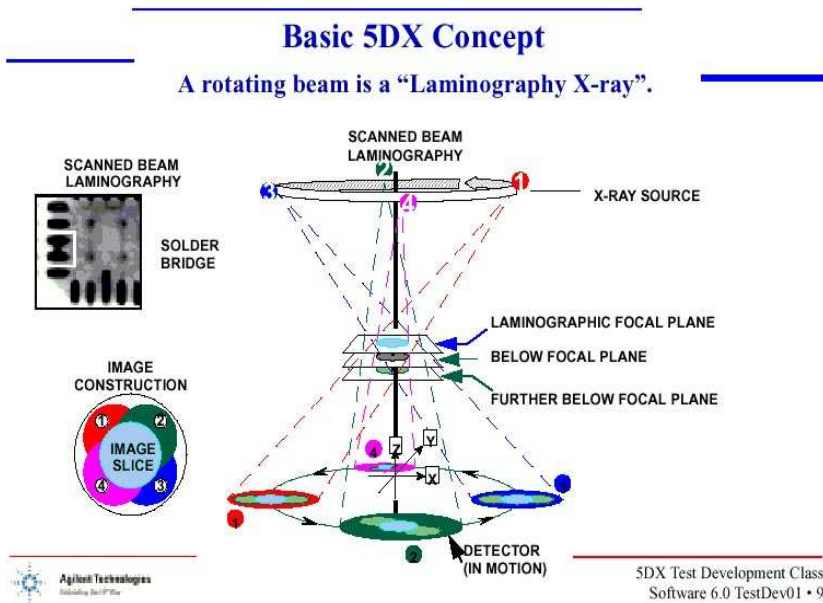


a b **3.11. ábra.** 2D (a.,) és 3D (b.,) ábra ugyanarról a felületről. A kétdimenziós kép csak a forraszanyag jelenlétét mutatja, a háromdimenziós az eloszlását is. [Agilent]

Ezzel a megoldással természetesen nem csak a rétegvastagság ellenőrizhető, hanem az alkatrészek magassága és felületi illeszkedése is. Pontos, értékelhető adatokat kaphatunk például, hogy az egyes alkatrészek mennyire párhuzamosan fekszenek a lapon. Elválaszthatók az azonos alpméretű, de különböző magasságú alkatrészek, újabb adattal segítve az optikai ellenőrzés hatáskörét.

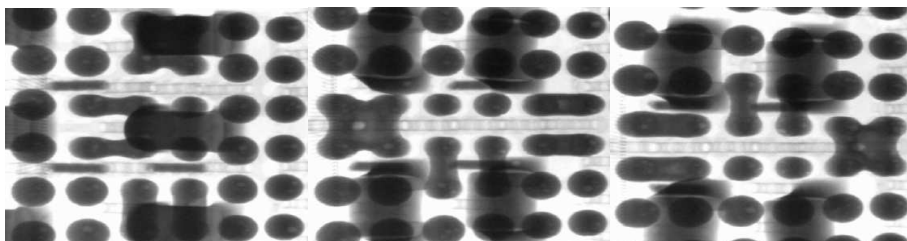
3D képkalkotás a röntgensugaras tartományban

A röntgensugaras képfelvétel célja a háromdimenziós képkalkotás, amely nem csak a felületi, hanem az alkatrészek alatti és a furatokon belüli viszonyok mérésére is alkalmas. A röntgensugaras megvilágítás mellett készített képsorozat – a kamera és a képfelvévő eszköz mozgatása révén – más-más pozícióból ábrázolja az átvilágított nyomtatott áramköri lemezt. Az így kapott képekből megalkotható a vizsgált terület 3D modellje. Ennek alapján az alkatrészek alatti forrasztások minősége is ellenőrizhető. Fontos jellemző a furatkitöltés, a furatokba felszívódó forraszanyag magassága, amit más módszerrel nemigen lehet ellenőrizni.



3.12. ábra. Röntgensugaras 3D képalkotás.[Agilent]

A röntgensugaras 3D tesztet a gyártási folyamat végső fázisában célszerű végezni, kiegészítve a látható fény tartományában végzett optikai ellenőrzést.

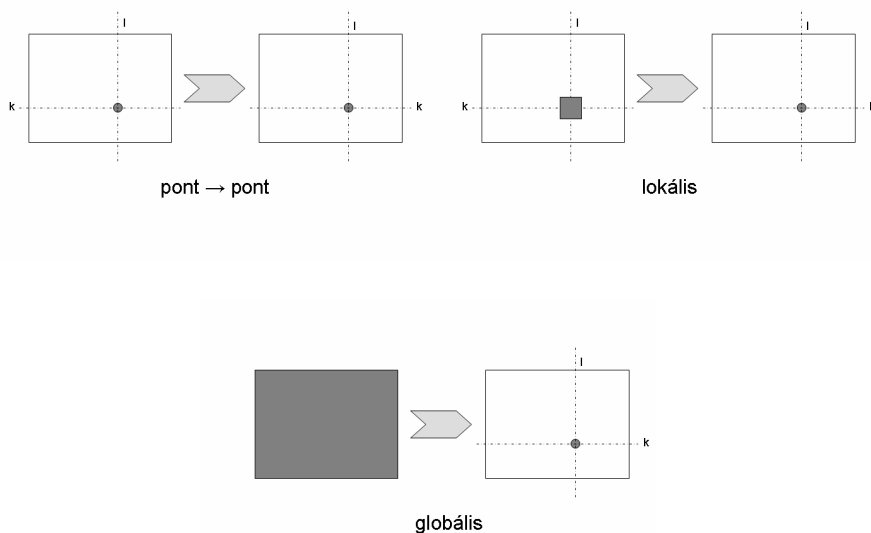


3.13. ábra. Felvételek egy panelnek ugyanarról a területéről. Az árnyékot vető alkatrész egy másik szögből már nem zavaró. [Agilent]

4. Képfeldolgozási műveletek

Több szempont alapján osztályozhatjuk a képfeldolgozási műveleteket. Egyik szokásos felosztás aszerint csoportosítja a műveleteket, hogy a feldolgozás alatt álló pont milyen nagyságú környezete befolyásolja a pont új világosságát. (A példákban rendszerint szürke árnyalatos képekkel fogunk dolgozni és világosság transzformációról beszélünk. Színes képeknél általában háromszor kell elvégezni a műveletet.)

- Pont-pont műveletek: Az adott képpont új világosságát csak ennek a pontnak az eredeti világossága befolyásolja.
- Lokális műveletek: Az adott képpont új világosságára a képpont megadott (pl.: 3*3 pixeles) környezetének van hatása.
- Globális transzformációk: Az adott képpont új világossága a teljes képtől függ.



4.1. ábra. Műveletek típusai a forráskép figyelembe vett környezeté szerint.

A műveletek bonyolultsága, számításigénye eltérő a háromféle képfeldolgozási műveletre. Az egyszerűség kedvéért a képet és a lokális műveletek környezetét négyzet alakúnak tekintve a műveletigényre vonatkozó, nem általános érvényű becslés:

- A pont-pont transzformációk műveletigénye N^2 -tel, a képpontok számával arányos. ($N*N$ a kép mérete.)
- A lokális műveletek egy képpontra számítva P^2 szorzást igényelnek, összességében N^2*P^2 . ($P*P$ a figyelembe vett környezet mérete.)
- A globális transzformáció gyors algoritmust feltételezve kb. $4N^2*\log_2 N$ szorzást igényel.

4.1. Pont-pont műveletek

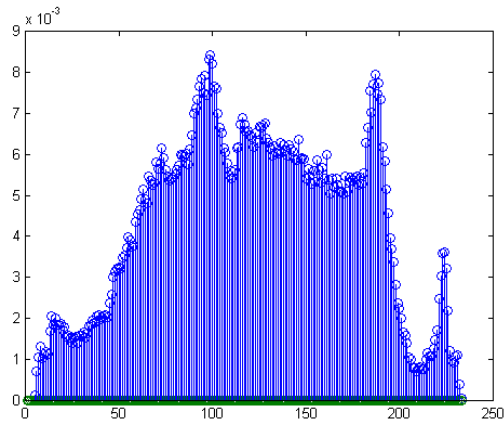
A pont-pont műveletek – mint láttuk – egy képpont új világosságát a többi képponttól függetlenül határozzák meg. Szokás ezeket a transzformációkat look-up-table (LUT) műveleteknek is hívni. Az elnevezés arra a programozási trükkre utal, hogy gyorsabb az összes lehetséges – pl.: 256 – világosságszintre előre elvégezni a műveletet, az eredményeket egy táblázatba helyezve a transzformáció során csak a táblázatból kell kikeresni a kívánt értéket, mint minden egyes képpontra elvégezni az átszámítást.

A pont-pont műveletek egy része a kép világosság eloszlását változtatja meg. Ide soroljuk még tágabb értelemben a két azonos méretű kép adott pozíciójú pontjainak világosság értékeiből aritmetikai vagy logikai műveletekkel kialakított új kép megalkotását is.

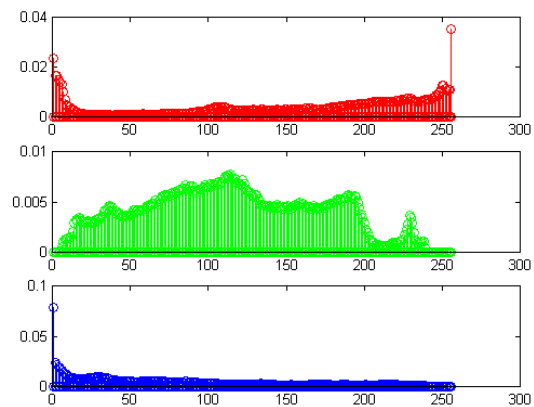
4.1.1. Hisztogram transzformációk

A hisztogram a kép világosságának sűrűségfüggvénye. Értelmezési tartományát a kép világosság skálája képezi. Digitális képek esetében ez diszkrét, véges sokaságú szürke árnyalatot jelent, pl.: 8 bites ábrázolásnál 256 lehetséges érték. A hisztogram felvételekor összeszámoljuk, hogy az egyes világosság szintekhez hány képpont tartozik, és a normálás érdekében elosztjuk a kép pontjainak számával. Így lesz a hisztogram integrálja a teljes tartományra egységnyi, ami a sűrűségfüggvény fontos tulajdonsága. Színes képeknél az egyes összetevők hisztogramját határozhatjuk meg.

$$Hq = \frac{Nq}{N}$$



4.2. ábra. Példa fekete-fehér kép hisztogramjára.



4.3. ábra.. Példa színes kép hisztogramjára

A hisztogram segítségével követhetjük a képfelvétel beállításaira, illetve hibáira.

- Ha a hisztogram a világosság tartománynak csak egy részét tölti ki, a kép kontrasztszegény, nem elég nagy a különbség a világos és sötét területek között.
- Amennyiben a hisztogram a sötét tartományt foglalja el, a kép alulexponált. Ekkor a legsötétebb terület, a fekete gyakorisága kiugróan magas, mivel a legkisebb világosság érték több sötét árnyalatot képvisel. Ezek között azonban nem tudunk különbséget tenni.

- Ha a hisztogram a világos tartományra esik, a kép túlexponált, a legvilágosabb felület gyakorisága lesz túlzott. Ekkor a túl világos területek árnyalatai között nem tudunk különbséget tenni.
- Ha a legvilágosabb és legsötétebb területek gyakorisága egyaránt kiugróan magas, a kép dinamika tartománya meghaladja a képfelvevő eszköz dinamikáját.

A fekete-fehér példáról megállapíthatjuk, hogy a világosság szempontjából az expozíció megfelelő. A színes képen a vörös komponens dinamikatarományja meghaladja a fényképezőgép dinamikatarományát, mivel a vörös maximumánál túlexponálás mutatkozik, de a minimumot is lefedi. A kék összetevő enyhén alulexponált jellegű.

Digitális fényképezőgépeken általában van lehetőség a kép hisztogramjának megjelenítésére. Ezzel ellenőrizhetjük a beállítás helyességét utólag, egyes esetekben felvétel közben is.

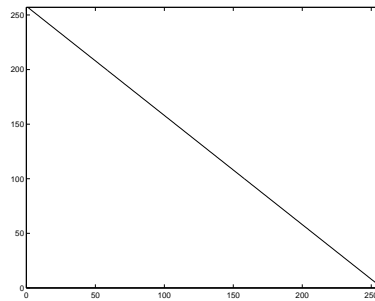
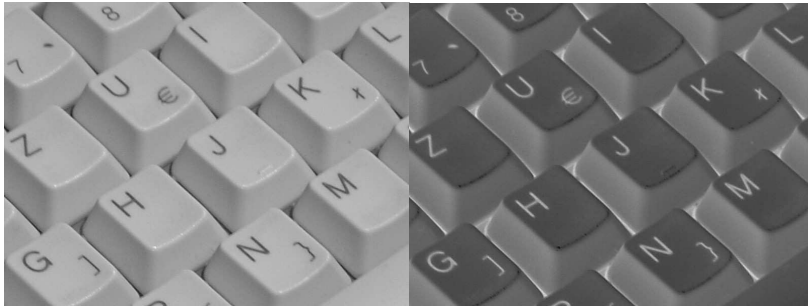
A hisztogram transzformációk során a kép világosság értékeit úgy módosítjuk, hogy a kép hisztogramja a kívánt formát vegye fel.

Invertálás

A kép negatívjának előállításához a világos pontokat sötétre, a sötét területeket világosra kell változtatni. 8 bites számábrázolás esetén a művelet:

$$q = 256 - g ,$$

ahol g az eredeti, q az új világosság.



4.4. ábra. Fekete-fehér kép (a.) és negatívja (b.), a transzformáció grafikus képével (c.)



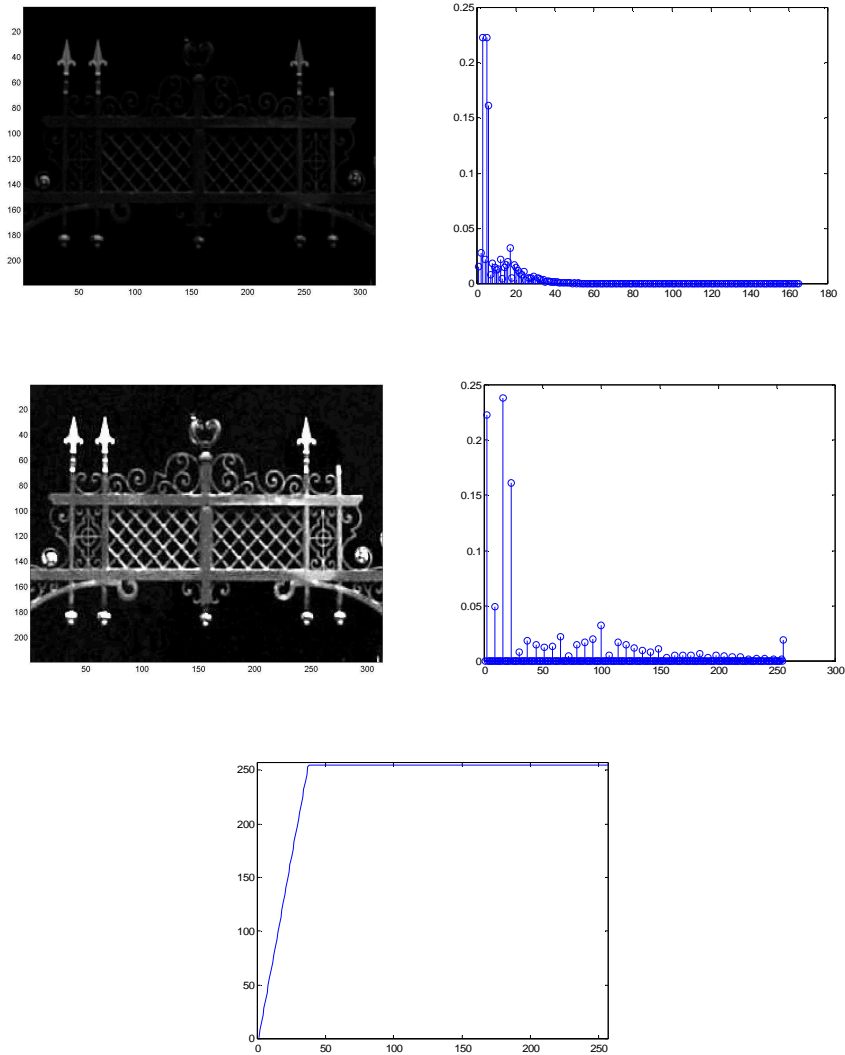
4.5. ábra. Színes kép (a.) és negatívja (b.)

Hisztogram nyújtás

Kontrasztszegény képeknél a hisztogram széthúzásával növelhetjük a kép dinamikatartományát. Az árnyalatok számát nem tudjuk bővíteni, hiszen nem tudunk különbséget tenni a felvétel azonos világosság szintre került pontjai között. A hisztogram nyújtás után tehát egyes szürke árnyalatok nem fognak előfordulni a képen.

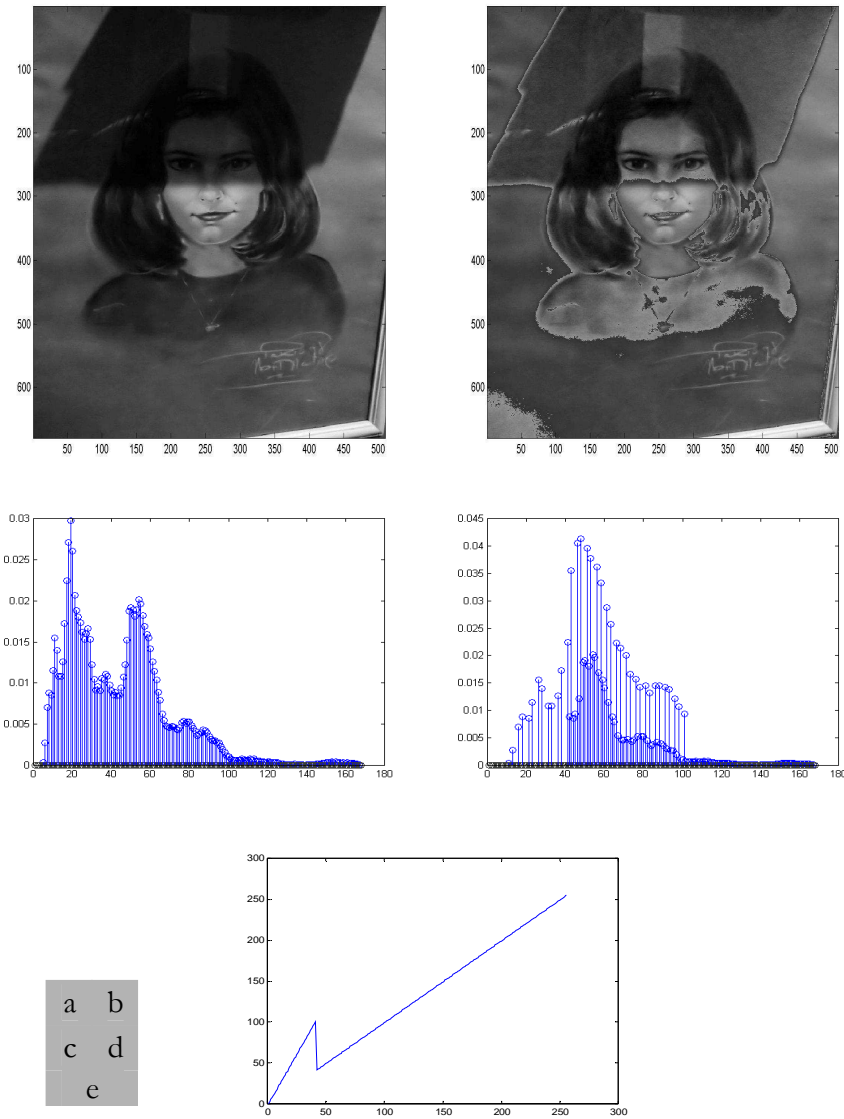
A hisztogram nyújtás paramétereit rendszerint manuálisan, a hisztogram alapján jelöljük ki. A kiválasztott világosság tartományt a rendelkezésre álló dinamikatartományra bővítjük. A feldolgozás eredményeképpen kapott kép legvilágosabb (Q_{max}) és legsötétebb (Q_{min}) árnyalata, valamint az eredeti képen kijelölt legvilágosabb (G_{max}) és legsötétebb (G_{min}) világosságtartomány meghatároz egy szorzótényezőt. A szorzótényezővel növelt világosságértékek minimumát a fekete szintre tolvá kapjuk az eredeti világosság értékből (g) az új árnyalatokat (q):

$$q = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{G_{max} - G_{min}} (g - G_{min})$$



4.6. ábra. Kontraszszegény kép javítása és hisztogramjai.

A hisztogram nyújtás nem feltétlenül terjed ki a teljes képre. Ha a kép fontos részlete nem elég kontrasztos, a széthúzás érintheti csak ezt a világosságtartományt. A kép más területein is előfordulhatnak ebbe a tartományba eső árnyalatok, a transzformáció ezeket is érinteni fogja. A megnyújtott tartomány hisztogramja „ráül” az eredeti hisztogramra.



4.7. ábra. Példa a hisztogram részleges nyújtására.
 a., eredeti kép, b., a sötét terület nyújtásával kapott kép
 c., az eredeti kép, d., a módosított kép hisztogramja
 e., a művelethez tartozó look-up-table

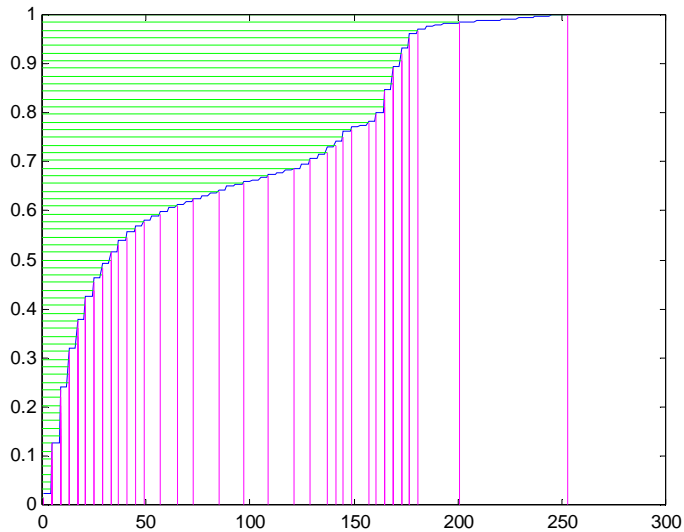
Hisztogram kiegyenlítés

A hisztogram nyújtás nevezetes pontjainak kijelölése nehezen automatizálható. Nem mondhatjuk pl.: hogy a kép legvilágosabb és legsötétebb pontjai közötti világosságtartományt kell bővíteni, mert néhány világos és sötét pixel a tényleges dinamikartartománynál nagyobb világosság területet eredményez, ezáltal a nyújtás a szükségesnél kisebb mértékű lesz.

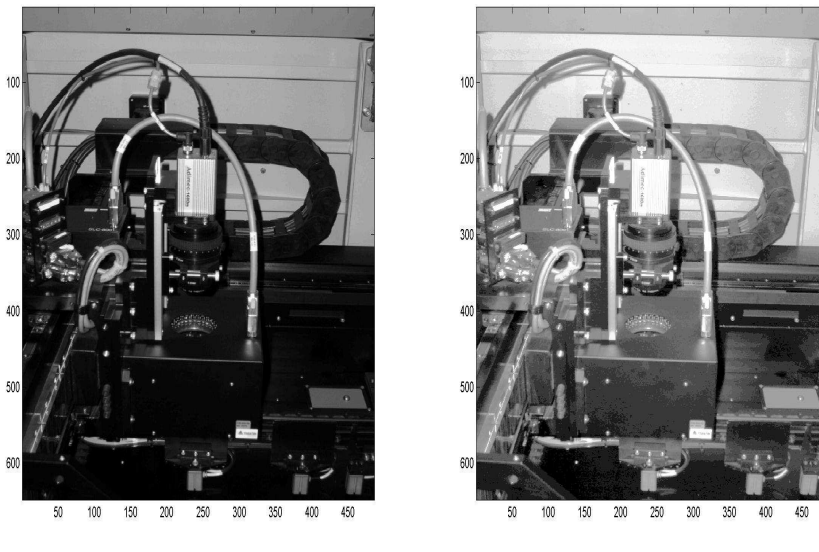
Ha képeket akarunk összehasonlítani, vagy a felvétel beállításainak különbségét akarjuk kompenzálni, hasznos lehet minden kép hisztogramját azonos alakúra gyúrni. Kézenfekvő választás, hogy törekedjünk az egyenletes eloszlásra, vagyis a hisztogram legyen konstans. Ez csak közelítőleg fog sikerülni, hiszen – mint már volt szó róla – az egy világosságszintre került pontokat nem tudjuk elkülöníteni, ezeknek a feldolgozás után is azonos osztályba kell tartozni. A nagy sűrűségű tartományokat szét kell húzni. Itt úgy csökkentjük az átlagot, hogy lesznek üres szintek, a nagy értékek és a nullák átlaga kell, hogy a kívánt érték közelébe kerüljön.

Az algoritmust egy példán keresztül követhetjük: Az egyszerű fejszámolás kedvéért képzeljük el, hogy a hisztogram kiegyenlítés után 32 világosság árnyalatot hozunk létre. Ekkor egyenletes eloszlás esetén a képpontok kb. 3%-a kerülne egy világosság osztályba. Vegyük a fekete (0 világosságú) pontokat. Ha nem érik el a 3%-ot, ugyanebbe a világosság osztályba soroljuk a következő árnyalatokat is, egészen addig, amíg a hisztogram összege el nem éri a 3%-ot. Ezután a következő világosságszinthez soroljuk a teljes hisztogram összeg 6%-áig terjedő pontokat, és így tovább. A kis sűrűségű pontok egy osztályba kerülnek, így közelítik a kívánt átlagot. Ha azonban pl. a fekete pontok aránya 10%, ez lefed több mint 3 osztályt, ezért a következő két szint kimarad. Így keletkeznek az üres szintek.

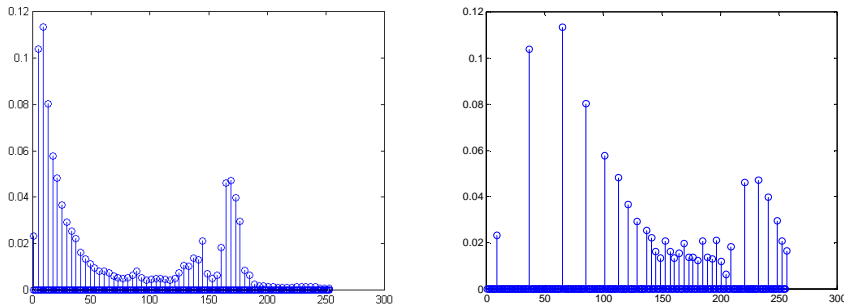
A **4.8. ábrán** vizuálisan követhetjük az eljárást: Hozzuk létre a kép világosság eloszlásfüggvényét! Ez a hisztogram integrálja (kumulatív összeg). Az eloszlásfüggvény 0-1 tartományát egyenletesen elosztva a kívánt számú szintre, a hozzájuk tartozó eredeti világosságértékekre visszavetíthetjük a határokat.



4.8. ábra. A hisztogram kiegyenlítés grafikus illusztrációja. A jobb követhetőség érdekében a forráskép 64 árnyalatot tartalmaz. A célkép 64 lehetséges világosságszintjéből néhány kimarad.



4.9. ábra. Eredeti (a,) és hisztogram kiegyenlítés utáni kép (b,).



a b

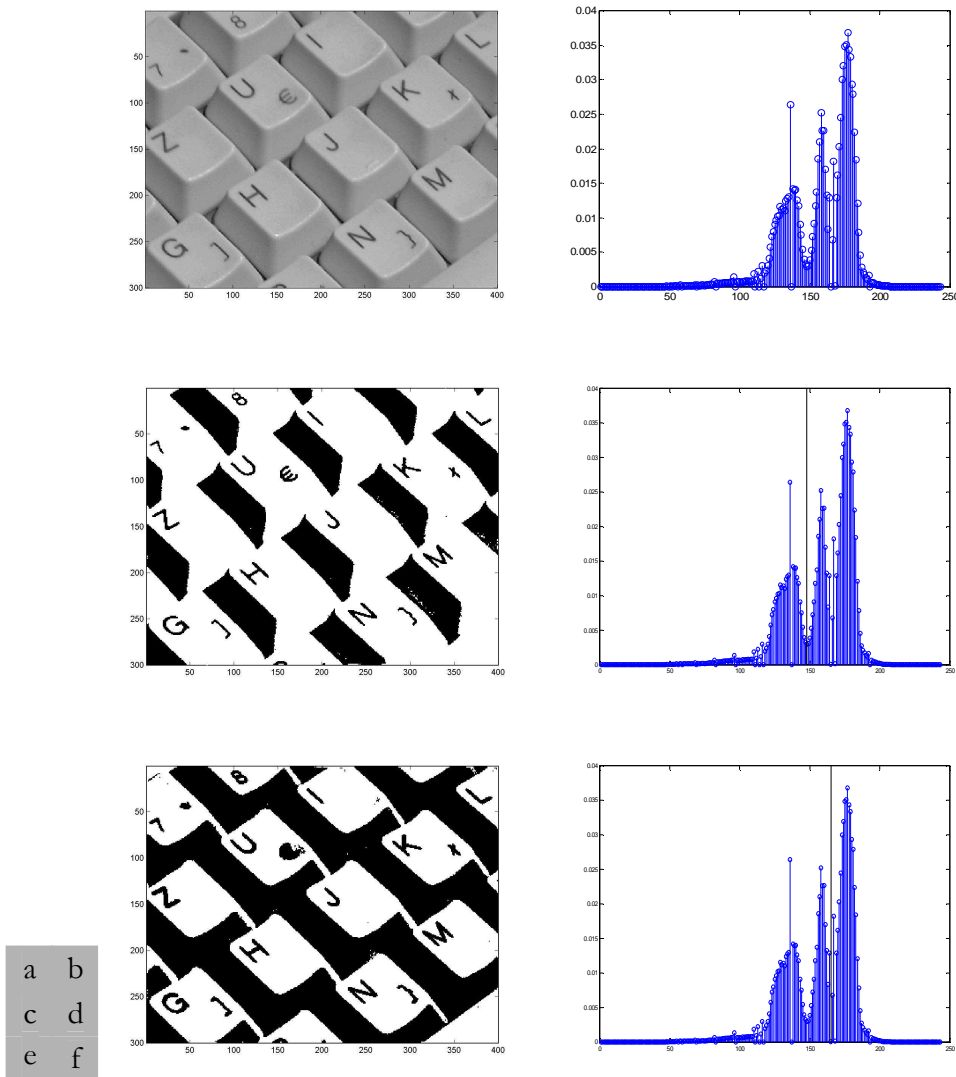
4.10. ábra. Az előző ábrán látható képek hisztogramjai.
a., eredeti kép, b., kiegyenlítés utáni kép hisztogramja

A hisztogram kiegyenlítés nem lineáris művelet. Ez nem csak azt jelenti, hogy a feldolgozott kép nem tükrözi hűen a valóságot, hanem azt is, hogy színes képeknél a komponensenként elvégzett művelet színtorzuláshoz vezethet.

Küszöbölés

Képszegmentálási feladatoknál el kell választani az objektumot a háttértől. Egyik lehetséges megoldás a világosság alapján elvégzett osztályozás. Egy alkalmas világosság küszöb alapján bináris képpé alakíthatjuk a szürke árnyalatos képet. A küszöb kijelölését segíti a hisztogram. Vizuálisan kijelölhetjük az alkalmas vágási szintet. Ennél pontosabb kijelölést tesz lehetővé a hisztogram matematikai elemzése, amellyel pl. Bayes döntési algoritmussal minimalizálhatjuk a hibás osztályba került pontok számát.

A **4.11. ábrán** a kettős küszöbérték módszer (Dual Threshold Method) néven emlegetett eljárás alkalmazását látjuk. A módszert az elektronikai szerelés optikai ellenőrzésében pl. az *alkatrész*, a *forrasztópaszta* és a *forrasztásgátló maszk* elkülönítésére használják.



4.11. ábra. Szürke árnyalatú kép bináris képpé alakítása histogram küszöböléssel. Eredeti kép (a.,) és histogramja (b.,). A histogram első minimumával küszöbölt kép (c.,) és a küszöb helye (d.,). A histogram második minimumával küszöbölt kép (e.,) és a küszöb helye (f.,).

Hisztogram transzformáció függvény szerint

A hisztogram nyújtás és küszöbölés szakaszonként lineáris, illetve lépcsős függvénnyel írható le. Tetszőleges függvény leírhatja a transzformációt. A logaritmikus világosságérzékelésünk leképezésére használhatunk logaritmikus és exponenciális függvényeket. A gamma korrekció szintén exponenciális függvénnyel valósítható meg. Ne feledkezzünk meg itt sem arról, hogy a nemlineáris műveletek színtorzuláshoz vezethetnek.

Átszínezés

A pont-pont műveletet leíró look-up-table alkalmas arra is, hogy a világossághoz három változót rendeljen, minden szürke árnyalatot egy színre képezzen le. Így hozhatunk létre egy színpalettát, aminek a segítségével a korlátozott színválasztékot (általában 256-4096 közötti a paletta árnyalatainak száma) és a hozzá tartozó (8-12 bites) kódot megfeleltetjük.



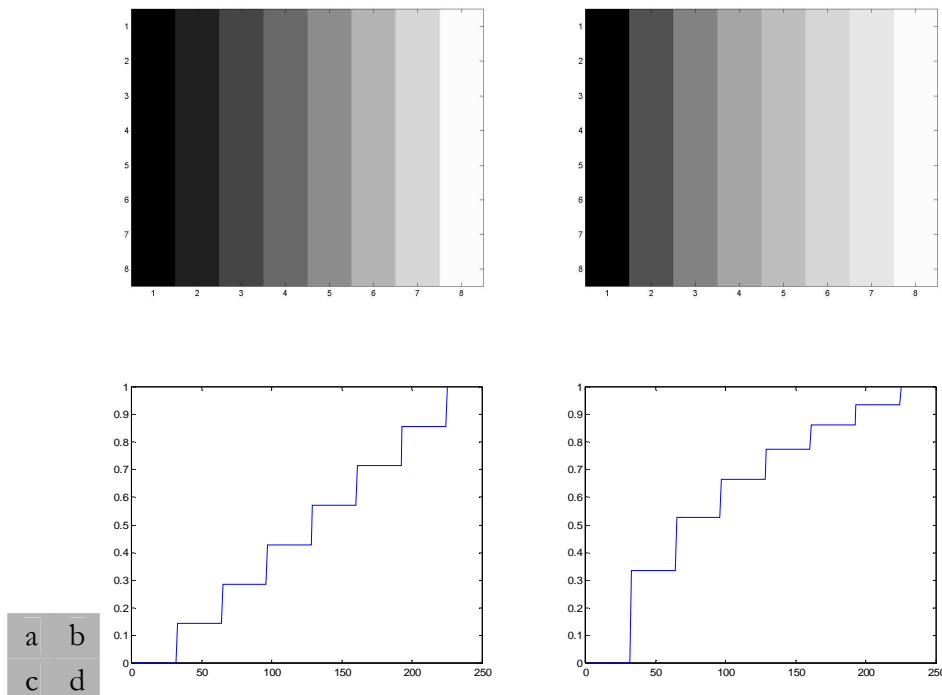
4.12. ábra. Hőkamera intenzitás képe különböző színpalettákkal megjelenítve. a., szürkeárnyaltos kép, b., a hőkamera saját színskálájával c., a MATLAB cool és d., copper színpalettájával

a	b
c	d

Az intenzitásképek átszínezése után kapott színnek semmi köze a felület eredeti színéhez, tekinthetjük a műveletet álszínezésnek is. Az ábrázolás értelme, hogy könnyebben felismerhetők az azonos intenzitású felületek és a különbségek nem csak világosságban, hanem színben is megnyilvánulnak.

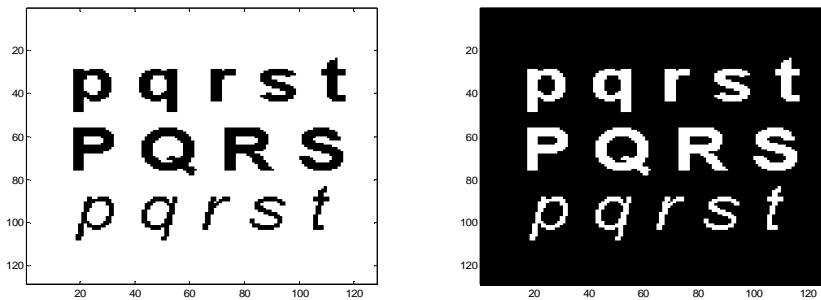
4.1.2. Aritmetikai és logikai műveletek

Az aritmetikai és logikai műveleteknek lehet egy vagy több operandusa. Az egy operandussal dolgozó műveletek a klasszikus look-up-table alapú hisztogram transzformációk. A **4.13. ábrán** lineáris és logaritmus skála szerint változó világosságú oszlopokat látunk. A lineáris a világosabb, a logaritmus a sötétebb tartományban változik meredekebben.



4.13. ábra. Lineárisan (a.,) és logaritmusosan (b.,) változó világosságú oszlopok, a hozzájuk tartozó lineáris (c.,) és logaritmusos (d.,) skálával.

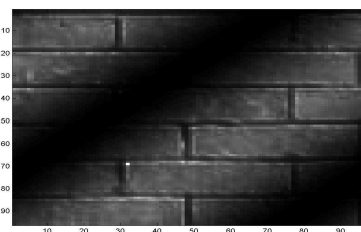
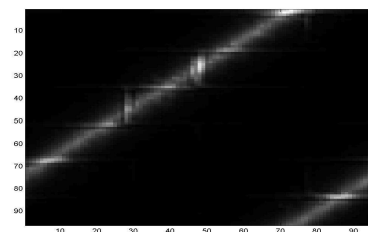
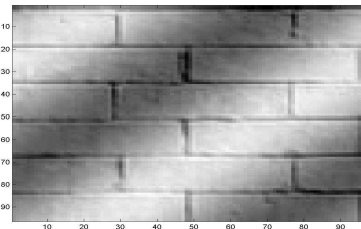
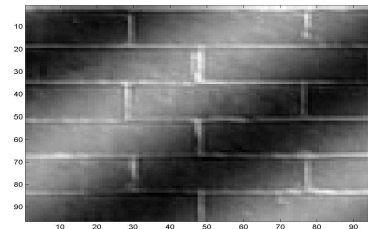
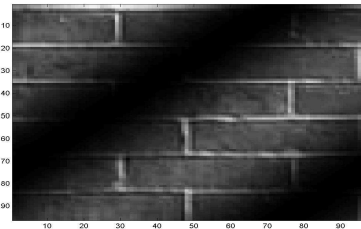
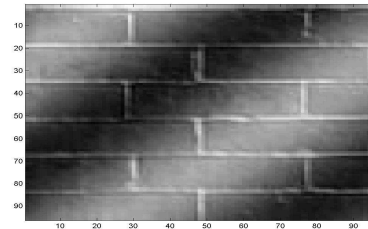
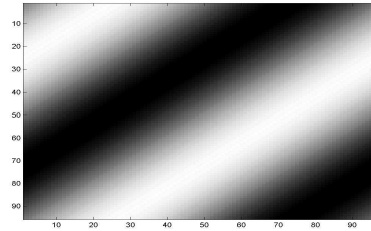
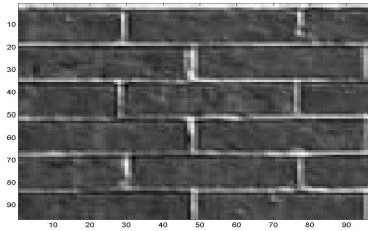
Az egy operandussal rendelkező logikai műveletek tipikus példája a negáció, ami a bináris képek negatívját állítja elő.



a b

4.14. ábra. Bináris kép (a.,) és negáltja (b.,).

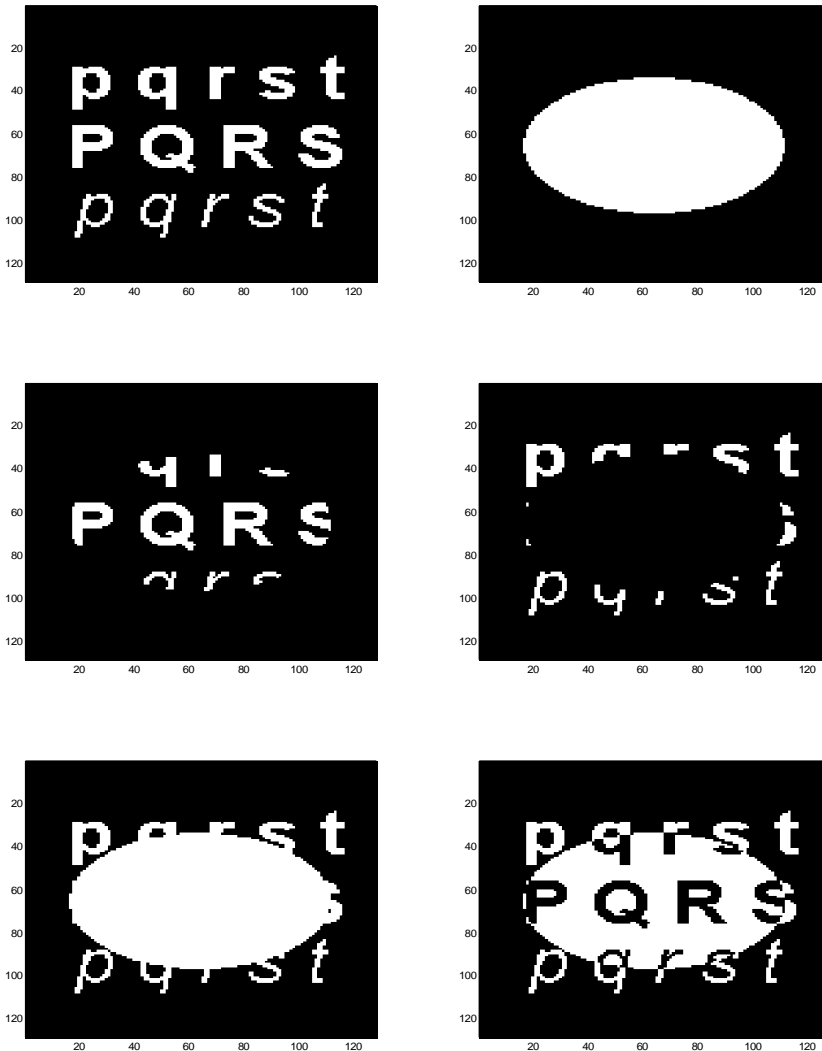
Két azonos méretű árnyaltos képen elvégezhetők a szokványos számtani műveletek. A kép manipulálása – pl. textúra ráültetése – válik lehetővé ezekkel az átalakításokkal. A könnyen értelmezhető műveleteknek van előre jól látható eredménye. Minden művelet után el kell végezni a szintillesztést, hiszen a világosság tartomány – pl. a szorzásnál és osztásnál – drasztikusan megváltozhat.



a	b
c	d
e	f
g	h

4.15. ábra. Aritmetikai műveletek. a., első forráskép: $i1$, b., második forráskép: $i2$, c., $i1+i2$, d., $i1*i2$, e., $i1-i2$, f., $i2-i1$, g., $i1/(i2+1)$, h., $i2/(i1+1)$

A két operandusú logikai műveletek a logikai és, vagy, kizáró vagy és társai. Ha feltételezzük, hogy az egyik logikai állapot az objektumnak, a másik a háttérnek felel meg, a logikai függvények az objektumokkal végzett műveleteket testesítik meg.



- a b
- c d
- e f

4.16. ábra. Logikai műveletek bináris képeken. a., $i1$, b., $i2$, c., $i1 \text{ÉS} i2$, d., $i1 \text{ÉS} (\text{NEM} i2)$, e., $i1 \text{VAGY} i2$, f., $i1 \text{XVAGY} i2$.

4.2. Lokális műveletek

A lokális műveletek eredménye nem csak a képpont eredeti világosságától, hanem a szomszédos képpontoktól is függ. A képpont új világosságát a transzformációnál figyelembe vett környezet mérete és a kijelölt művelet határozza meg. A lokális műveletek közül a konvolúciót és a pontok világosságának sorrendjén alapuló rank szűrést – különös tekintettel a medián szűrésre – fogjuk tárgyalni.

4.2.1. Konvolúción alapuló műveletek

Konvolúción a képpont és környezete világosságának súlyozott összegét értjük. A súlyozó együtthatókat a konvolúció operátora tartalmazza. Szigorúan véve a képpont környezetét tükrözni kellene, így kerülne párba az operátor és az operandus egy-egy eleme:

$$q(k, l) = \sum_{r=-R}^R \sum_{s=-S}^S p(r, s) g(k - r, l - s),$$

ahol p az operátor, g ill. q a képpont eredeti és új világossága. Az indexek megválasztása jelzi azt a gyakorlatot, hogy az operátor rendszerint páratlan számú sort és oszlopot tartalmaz, így van középső eleme. A képpont környezetének tükrözése helyett tükrözhetjük az operátort is, ugyanazok az elemek fognak párba kerülni:

$$q(k, l) = \sum_{r=-R}^R \sum_{s=-S}^S p(-r, -s) g(k + r, l + s)$$

Vezessünk be egy új operátort! Legyen t a p vízszintes és függőleges tengelyre tükrözött változata!

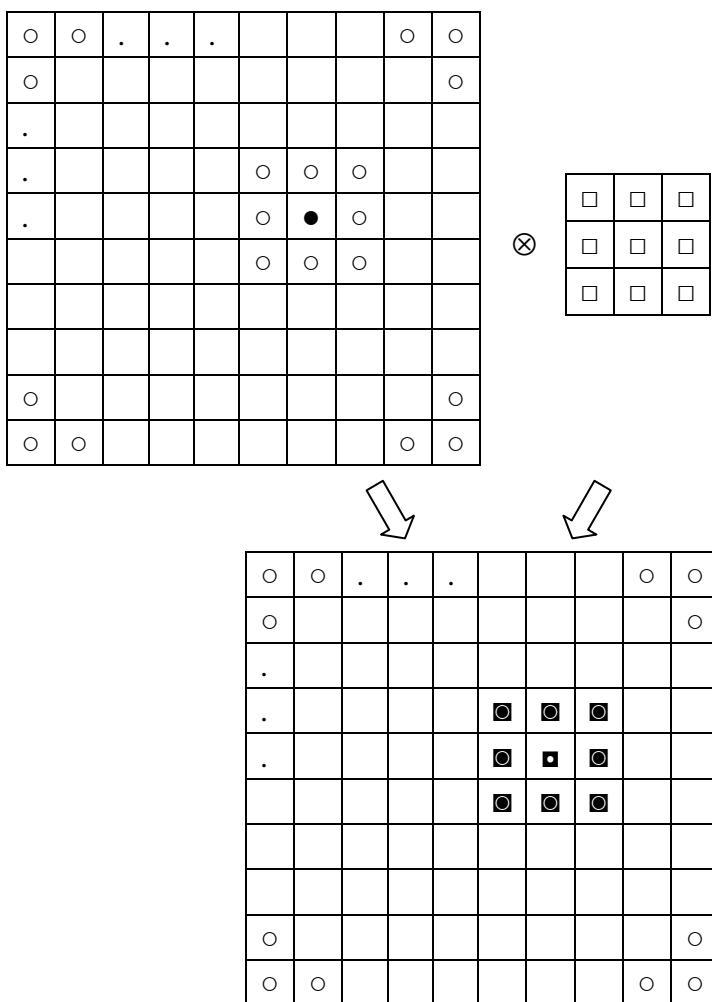
$$t(r, s) = p(-r, -s)$$

Nem megy az általánosság rovására, ha ezt a tükrözött alakot tekintjük a konvolúció operátorának.

Ezzel:

$$q(k, l) = \sum_{r=-R}^R \sum_{s=-S}^S t(r, s) g(k + r, l + s)$$

Ez a kifejezés lehetővé teszi a konvolúció szemléletes bemutatását: Vesszük a kép egy pontját (k -edik sor, l -edik oszlop). Eltoljuk az operátort úgy, hogy középső eleme az adott pontot, az operátor a pont $(2R+1) \times (2S+1)$ pixeles környezetét fedje. Összeszorozzuk az operátor elemeit az alattuk lévő képpontok világosságával és összegezzük a szorzatokat. Ez lesz a képpont új világossága. Elvégezzük ezeket a műveleteket az összes képpontra.



4.17. ábra. A konvolúció szemléltetése

Zajszűrés

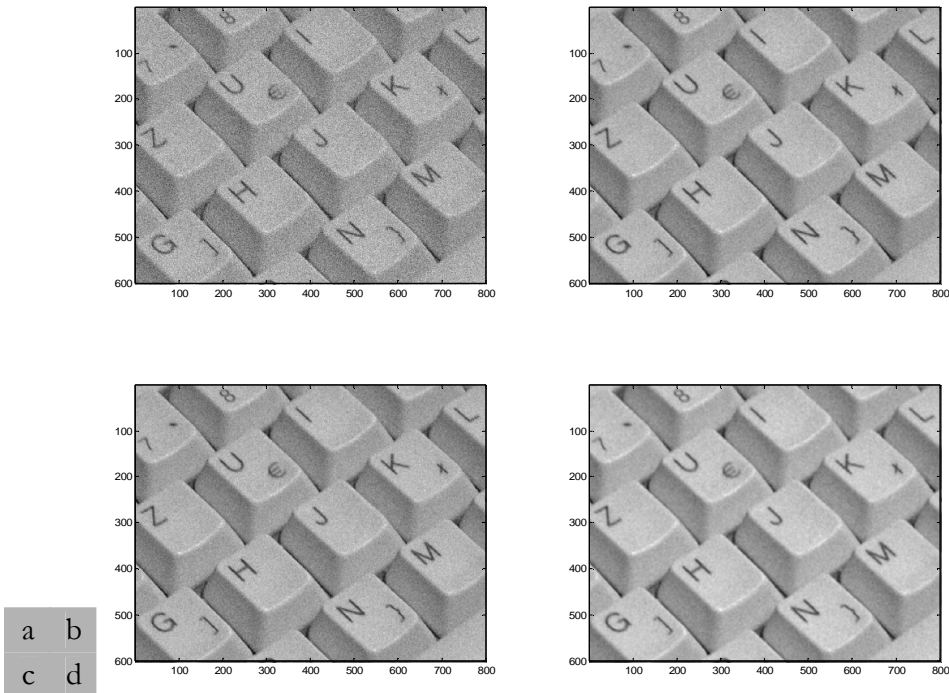
A képfelvétel során a homogén területek – különösen gyenge megvilágítás mellett – nem egészen azonos világosságú és színű képpontokat eredményeznek. Ezt úgy modellezhetjük, hogy a hibátlan képhez véletlen változó zaj adódik. A képjavítás egyik fontos feladata a zaj csökkentése. Ha egy képpont világosságához zaj adódik, világossága eltér a környezetétől. Ezt a különbséget csökkenthetjük, ha a képpont világosságát környezete átlagával helyettesítjük. Az átlagolás alkalmas a zaj redukálására. A zajcsökkentő operátorok fontos tulajdonsága, hogy elemeinek összege *egy*. Ha nem így lenne, a kép átlagos világossága eltolódna.

Példák 3x3 méretű zajszűrő operátorra:

$$z_1 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad z_2 = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

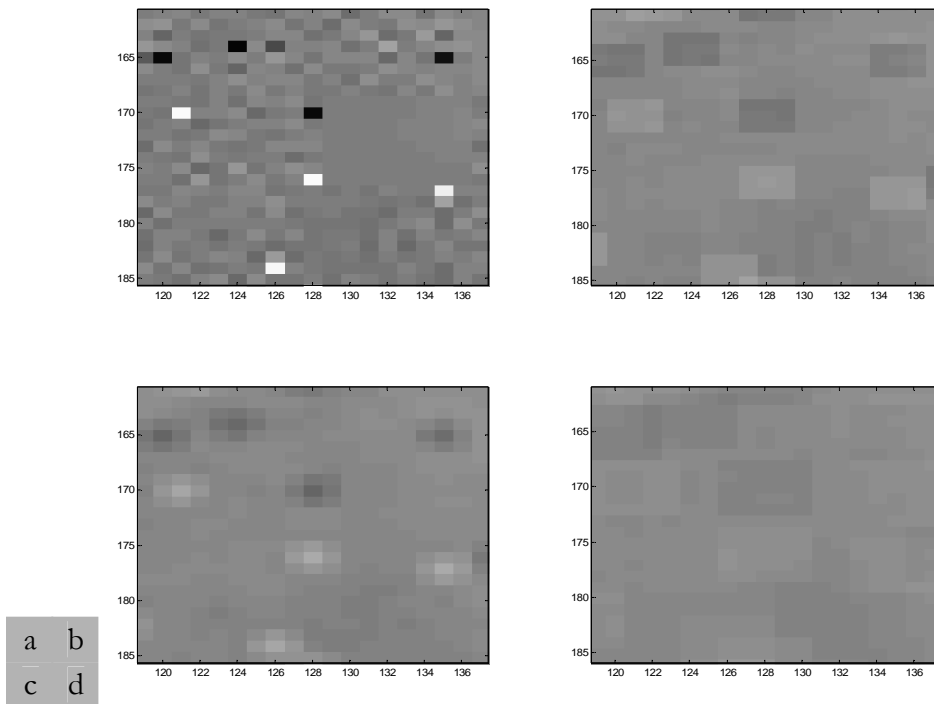
Egy 5x5 méretű zajszűrő operátor:

$$z_3 = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



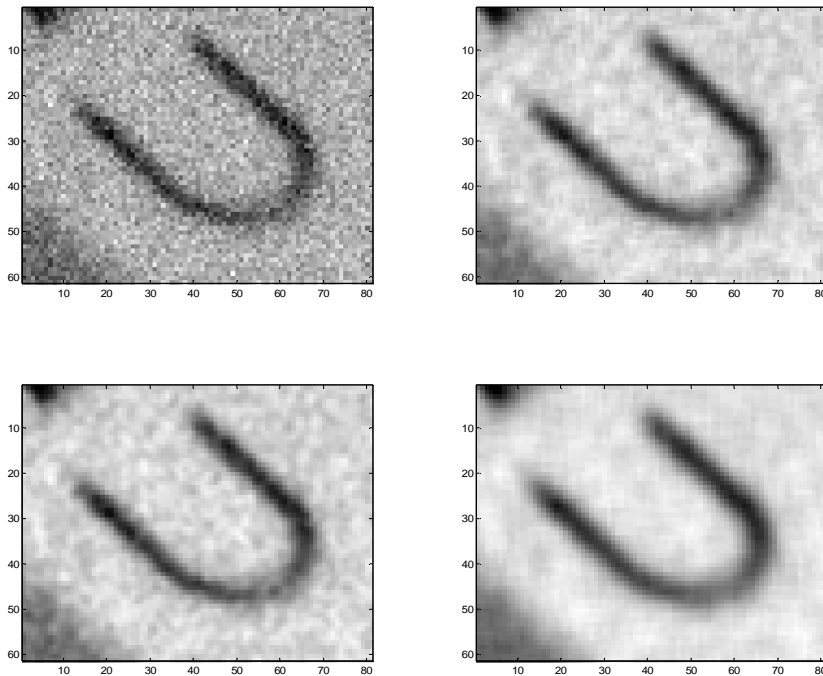
4.18. ábra. Zajsűrés átlagolással a., eredeti zajos kép, b., $i \otimes \chi_1$
c., $i \otimes \chi_2$, d., $i \otimes \chi_3$

Az átlagolás csökkenti az eltérést a környezet világosságától, de a kiugró folt területe nő. A szétterülő folt mérete megegyezik az operátor méretével. Teljesen homogén környezetben az azonos együtthatójú operátorok (pl. χ_1 , χ_3) a kiugró világosságú pontot homogén foltta terjesztik szét. Ha az operátor súlyozó együtthatói eltérőek, ez megjelenik a folt intenzitás különbségében is.



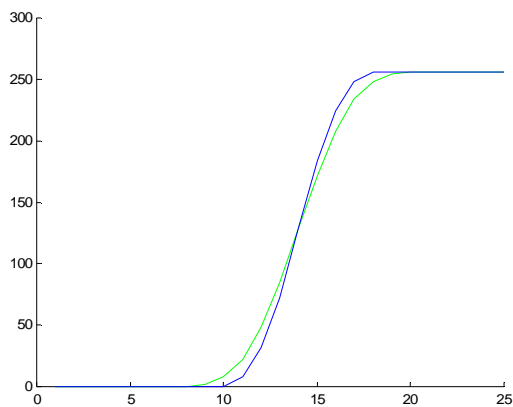
4.19. ábra. A környezettől eltérő világosságú pont „elkenődése” a zajszűrés hatására a., eredeti kép (i), b., $i \otimes \chi_1$, c., $i \otimes \chi_2$, d., $i \otimes \chi_3$

Az átlagolás akkor is megtörténik, ha nem szeretnénk, így a zajszűrés tompítja az élek meredekségét. Minél erősebb a zajszűrés, annál jobban érvényesül a meredekség csökkenés, lágyabb lesz a kép. A **4.20. ábrán** kinagyítva látjuk a **4.18. ábra** részletét. Ezen lemérhetjük a zajszűrés hatását és mellékhatását egyaránt.



a	b
c	d

4.20. ábra. Az élék tompulása az átlagolás „mellékhatása”
a., eredeti kép (i), b., $i \otimes \chi_3$ c., $i \otimes \chi_2$, d., $i \otimes \chi_3$



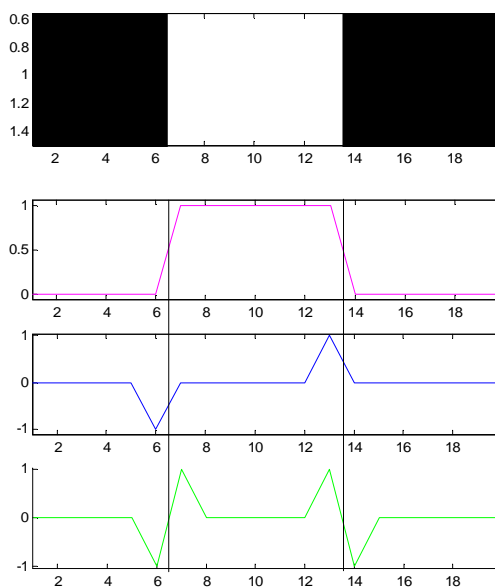
4.21. ábra. Egy lehetséges világosság profil (---),
az átlagolás tompítja az éléket (—),

Élkiemelés, élesítés

Képfeldolgozási feladatoknál hasznos lehet az objektumok határvonalának kijelölése (edge detection). Akkor tudjuk az objektumot a háttértől elválasztani, ha világossága (színe, textúrája) eltérő. Ott keresünk éleket, ahol világos és sötét területek érintkeznek. Az élek keresése élkiemelést, és az élkijelölést jelenti. Élesítésről (sharpening) akkor beszélünk, ha hangsúlyosabbá akarjuk tenni az éleket, keményebbé akarjuk tenni a képet.

A különbségképzés alkalmas az élkiemelésre, hiszen homogén foltoknál nulla, és annál nagyobb, minél nagyobb a világosságok közötti különbség. A vízszintes és függőleges irányú változásokat parciális differencia képzésével emelhetjük ki. Függőleges éleknél például vízszintes irányban tapasztalunk világosság változást.

$$d(k,l) = \frac{\Delta g}{\Delta x}_{k,l} = g(k,l+1) - g(k,l)$$



4.22. ábra. Függőleges élek és a vízszintes irányú parciális differencia. Vízszintesen 20 pixelből álló képrészlet (a.), világosság változás (b.,---), első differencia (b.,---), második differencia (b.,---)

Amint az ábrán látható, a különbség lehet pozitív és negatív, aszerint, hogy balról jobbra haladva nő vagy csökken a világosság. A pozitív és negatív előjelű differencia egyesítésére két megoldás alakult ki:

- A második differencia mindkét irányú változásnál egyaránt ad pozitív és negatív eredményeket. (Laplace operátorok)
- A vízszintes és függőleges irányú differenciából meghatározható a **gradiens** nagysága és iránya. (Roberts, Prewitt, Sobel operátorok)

A Laplace operátorok

Figyeljük meg a **4.22. ábrán**, hogy a differencia az él bal oldalán lesz nagy abszolút értékű. Az él valójában az $(l+1)$ -edik és az l -edik minta között található, de ott a digitális kép nincs értelmezve. Az élt képviselő különbséget az élnek vagy a baloldali, vagy a jobboldali szomszédjához tudjuk rendelni. Az első differencia tehát az élt eltolja fél pixellel balra.

Ha a második differenciát ugyanígy értelmeznénk, az él újabb fél pixellel balra tolná, ami az él egy pixeles eltolódásához vezetne. A második differencia értelmezésénél ezért a különbséget a jobboldali szomszédhoz rendeljük:

$$\begin{aligned} dd(k,l) &= -\frac{\Delta d}{\Delta x}\Big|_{k,l} = d(k,l-1) - d(k,l) = \\ &= g(k,l) - g(k,l-1) - [g(k,l+1) - g(k,l)] = \\ &= -g(k,l-1) + 2g(k,l) - g(k,l+1) \end{aligned}$$

A vízszintes irányú második differenciát az együtthatók alapján az

$$l_h = [-1 \quad 2 \quad -1]$$

operátorral végzett konvolúció eredményeképpen kapjuk. A függőleges irányú második differenciát az

$$l_v = \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{bmatrix}$$

operátor képviseli. A vízszintes és függőleges él együttes megjelenítésére a két operátor összege alkalmas:

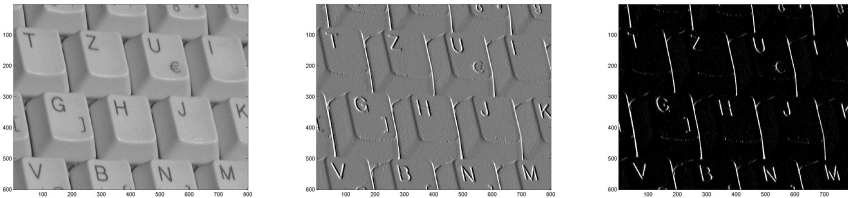
$$l_4 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Mivel a ferde éleknek is van vízszintes és függőleges összetevője, az l_4 operátor a ferde éleket is jelzi. Átló irányú különbségekkel finomíthatjuk az operátor irányérzékenységét:

$$l_8 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Az l_b , l_v , l_4 , l_8 operátorokat Laplace operátoroknak nevezzük. Felmerül a kérdés, hogy a Laplace operátorokkal végzett konvolúció eredményét hogyan ábrázoljuk. A homogén foltok helyén nullákat (kis értékeket), az éleknél nagy pozitív vagy negatív számokat kapunk. Ha a legnagyobb értéket a fehérnek, a legkisebbet a feketének feleltetjük meg (bipoláris ábrázolás), a homogén foltok középszürkék lesznek. Ez az ábrázolás az objektumokat sötét és világos vonallal is körberajzolja (4.23. b., ábra.).

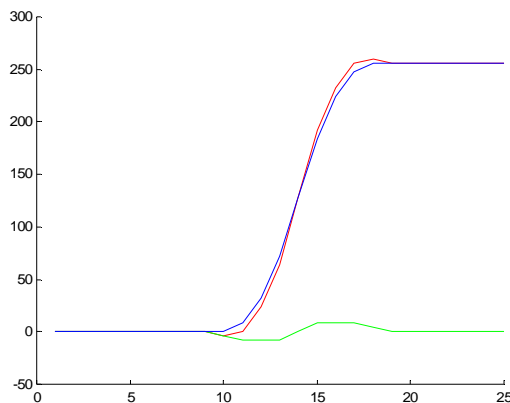
A következőkben tárgyalandó élkiemelési módszereknél abszolút értéket kapunk. Ekkor a homogén foltok feketék, az élek fehérek lesznek. Ehhez az ábrázoláshoz hasonlít a Laplace operátorral végzett élkiemelés unipoláris ábrázolása: A nulla szintet feleltetjük meg a feketének, ennél feketébb a negatív értékű pont sem lehet, ezért csak a világos körvonalakat fogjuk látni. 4.23. c., ábra.



a b c

4.23. ábra. A Laplace operátor eredményének ábrázolási lehetőségei
a., eredeti kép, b., bipoláris, c., unipoláris él megjelenítés

Vizsgáljuk meg a **4.24. ábrán** a világosság változását! Az él meredekségét növelhetjük, ha az eredeti világossághoz hozzáadjuk az élkimelés eredményének egy részét.



4.24. ábra. Egy lehetséges világosság profil (---), az élkimelés eredménye (---), ezek összege (---) meredekebb éleket eredményez

A Laplace operátor definíciójából következik, hogy az első differencia dinamikatartománya a kép dinamikatartományának kétszerese lehet, a második differenciáé négyszerese. Ha a képhez az éleket hozzáadnánk, igen durva éleket kapnánk, ezért az éleket skálázva keményebbé tehetjük a képet. A kép másolására alkalmas az identikus operátor:

$$id = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ez nem tesz mást, mint minden képpontot – hosszas számítással – önmagával helyettesít. Mérete azért 3×3 , hogy megegyezzen a Laplace operátor méretével. Az önmagában értelmetlen identikus operátor arra jó, hogy egy másik operátorral összeadva, az eredményhez hozzáadja az eredeti képet. Pl.:

$$id + h_4 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

operátor az élekhez egy művelettel hozzáadja az eredeti képet. Az $id + kh_4$ operátor k skálátényezője alkalmas a kép élesítésének hangolására. A **4.25. ábrán.** $k = 1/16, 1/8$ és $1/4$.



a b 4.25. ábra. Kép élesítése különböző tényezőkkel: a., eredeti kép: id ,
c d b., $id+l_4/16$, c., $id+l_4/8$, d., $id+l_4/4$

Gradiens számításon alapuló élkimelés

A gradiens számításon alapuló élkimelési módszerek közös jellemzője, hogy két, egymásra merőleges irányban számol gradienst, mindkettőnek megvan a saját operátora. A kétirányú gradiensből szokványos módon határozható meg a gradiens nagysága és iránya. A Roberts operátorok az átlók irányában képeznek különbségeket.

$$r_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad r_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$R_1 = i \otimes r_1; \quad R_2 = i \otimes r_2$$

$$Gr = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}; \quad \Phi = \arctg \frac{R_1}{R_2}$$

A kijelölt műveletek nem mátrixszorzást és osztást, hanem elemenként végzett számításokat jelentenek. Mivel a Roberts operátor átlós különbségeket számol, a Φ szög a gradiens 45 fokos iránnyal (↗) bezárt szögét jelenti.



a b **4.26. ábra.** Élkiemelés Roberts operátorral. a., eredeti kép,
c d b., a gradiens nagysága, c., a gradiens iránya, d., vonalvastagság

A gradiens iránya grafikusan nehezen értékelhető. Az ábrázolás a -90 foknak a feketét, a 90 foknak a fehéret felelteti meg.

A Roberts operátor azon kivételek közé tartozik, amelyeknél az operátor páros számú sort és páros számú oszlopot tartalmaz. A Prewitt operátor 3×3 méretű, van középső eleme, amelyhez a különbséget rendeljük.

$$p_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad p_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$P_1 = i \otimes p_1; \quad P_2 = i \otimes p_2$$

$$Gr = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}; \quad \Phi = \arctg \frac{P_1}{P_2}$$

A Prewitt operátorral végzett élkiemelés jellemzői:

- Vízszintes és függőleges különbségeket képez, a Φ szög a 0 fokos irányhoz (\rightarrow)viszonyítva értendő.
- A középső, nullával kitöltött sor illetve oszlop miatt az élek két pixel vastagságúak lesznek. Ha pl. egy függőleges él mentén ugrásszerűen változik a világosság, ugyanazt az eredményt kapjuk a határnak akár a világos, akár a sötét oldalát fedi a csupa 0 oszlop.

-1	0	1	-1	0	1
-1	0	1	-1	0	1
-1	0	1	-1	0	1

- A három 1 , illetve -1 együtthatóval lefedett foltra átlagolást végez az operátor. Valójában tehát két, egyenként hárompixeles folt átlagvilágosságának különbségét kapjuk.



a b **4.27. ábra.** A Prewitt operátorral végzett élkiemelés eredménye:
a., a gradiens nagysága, b., vonalvastagság

A Sobel operátor abban különbözik a Prewitt operátortól, hogy az elemzés alatt álló pont sorát illetve oszlopát kétszeres súllyal veszi figyelembe.

$$s_1 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \quad s_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$S_1 = i \otimes s_1; \quad S_2 = i \otimes s_2$$

$$Gr = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}; \quad \Phi = \arctg \frac{S_1}{S_2}$$



a b

4.28. ábra. Prewitt és Sobel operátorral végzett élkimelés összehasonlítása. a., Prewitt, b., Sobel

A képfeldolgozási műveleteket nagy felbontású képeknél több millió pont-ra kell elvégezni, ezért nagy jelentősége van a számítást gyorsító egyszerűsítéseknek. A gradiens nagyságát a négyzetösszegek négyzetgyöke helyett szokás az abszolút értékek összegével közelíteni. A kifejezést a Sobel operátorral kapott eredményre írjuk fel, de használható a Roberts és a Prewitt élkimelés alkalmazásakor is.

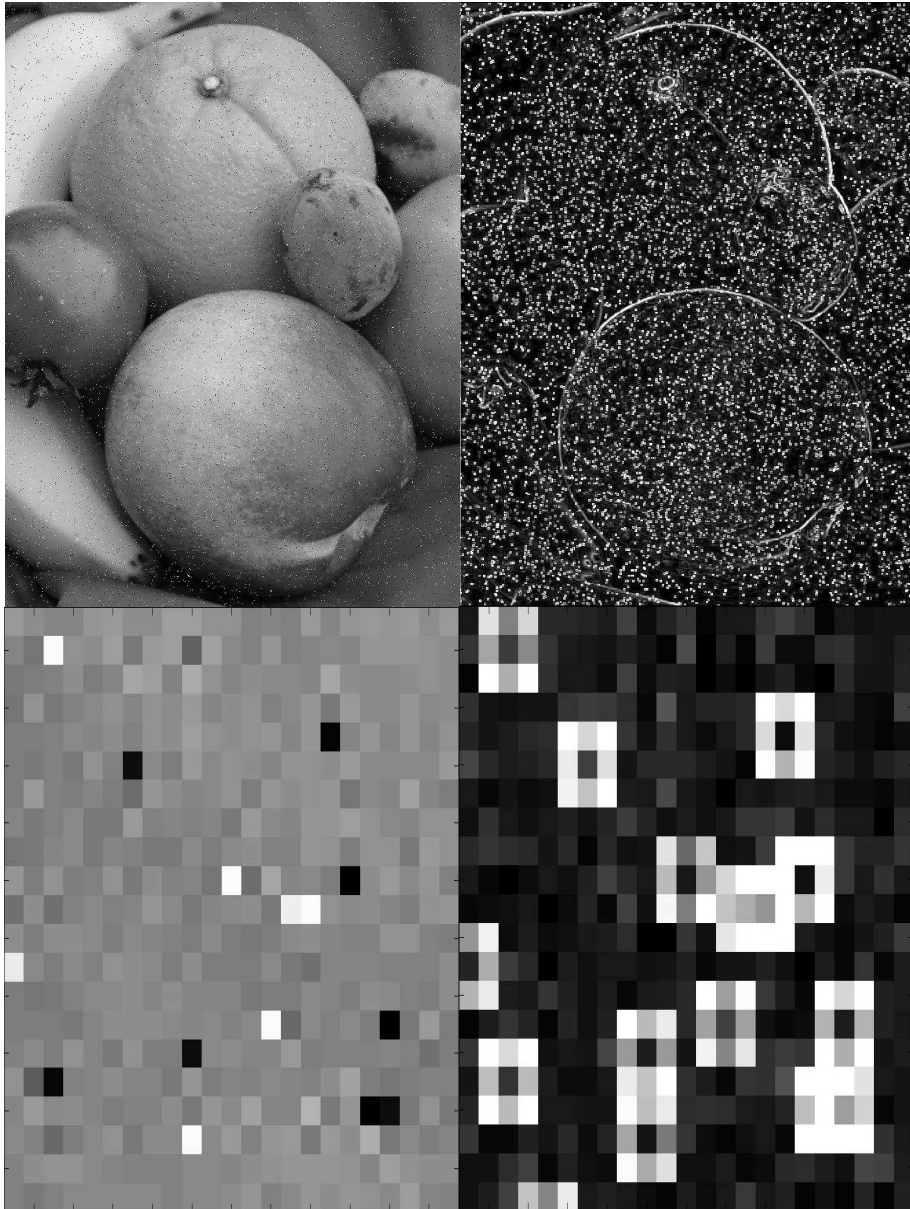
$$Gr \cong |S_1| + |S_2|$$



4.29. ábra. Élkiemelés a definíció szerinti (a.) és a közelítő gradiens számítással (b.).

A két eredmény nem egyezik meg, de alig látszik különbség, elfogadhatónak tűnik a közelítő eredmény is.

Rossz minőségű (zajos) képeknél az élesítés alkalmazása kifejezetten ellenjavallt, mert felerősíti a hibákat. A só és bors (salt and pepper) jellegű zajokra az élkiemelés akkurátusan körberajzolja a hibákat.



a b
c d

4.30. ábra. Só és bors zajjal terhelt kép élkiemelése. a., eredeti kép, b., Prewitt operátorral végzett élkiemelés eredménye, c., eredeti kép részlete, d., élkiemelt kép ugyanazon részlete

Gyenge minőségű képek esetében is szükség lehet az élek kijelölésére. Ilyenkor célszerű a zajelnyomást és az élkiemelést egyesíteni. Ha a Prewitt operátor átlagoló területét megnöveljük, erősíthetjük a zajcsökkentő funkciót.

$$p_{7a} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$p_{7b} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



a	b
c	d

4.31. ábra. Zajos kép élkiemelése a zajszűrés erősítésével
a., zajos eredeti kép, b., Roberts, c., Prewitt,
d., átlagoló Prewitt operátorral.

Az előbbieken felsorolt operátorok egy adott irányba eső gradienst számolják. Ha elég finoman letapogatjuk az irány-gradienseket, kicsi lesz a különbség a gradiens valódi iránya és a legközelebbi irány-gradiens szöge között. Ha pl. 45 fokként meghatározzuk a gradienst, 22,5 foknál nagyobb eltérés nem fordulhat elő. A Robinson operátorok nyolc irányban számolnak gradienst. Egy pontban a nyolc irány-gradiens maximumát tekintjük a gradiens nagyságának, a maximumhoz tartozó szöget a gradi-

ens irányának. A Robinson operátorok a Sobel operátor forgatásával keletkeznek.

$$n_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad n_4 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$n_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad n_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$n_3 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \quad n_6 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$n_4 = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}; \quad n_7 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{bmatrix}$$

A számításigény szempontjából nem közömbös, hogy a Laplace élkiemelés *egy* operátora, illetve a gradiens abszolút értékét és fázisát meghatározó élkiemelések *két* operátora helyett *nyolc* operátorral kell számolni. Ha észrevesszük, hogy az egy sorban lévő Robinson maszkok egymásnak mínusz egyszeresei, akkor is marad *négy*. Arról sem feledkezzünk meg, hogy a maximumkeresés sem megy gyorsan sok-sok képpontra. A megoldás gyakorlati haszna megkérdőjelezhető.

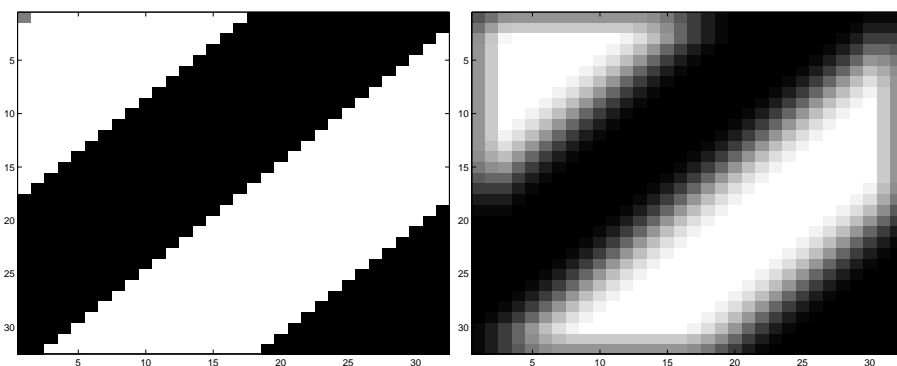
4.2.2. A konvolúció néhány tulajdonsága

A konvolúció végrehajtása során felmerül a kérdés, hogy mit tegyünk a kép szélein elhelyezkedő képpontokkal. Azokra a képpontokra ugyanis, amelyek a kép széleitől mért R soros illetve S oszlopos sávba esnek, az operátor egy része a képen kívülre esik. Három lehetőség közül választhatunk:

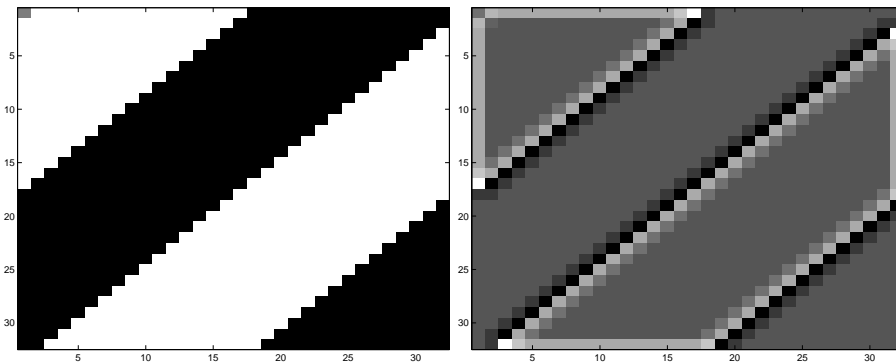
- csak az érvényes területtel számolunk
Hátránya: A kép $2R$ sorral és $2S$ oszloppal kisebb méretű lesz, mintegy körbe nyírjuk a képet.

- kiegészítjük a képet nullákkal
Hátránya: Zajszűréskor a világos képszél sötétedik. Élkereséskor a kép szélén világos helyeken élt kapunk.
- tükrözzük a kép széleit úgy, hogy a megnövelt kép érvényes területe éppen az eredeti kép méretével egyezzen meg

A kép bal és jobb oldalán egy-egy S oszlopos függőleges sávot és a kép alján és tetején egy-egy R soros csíkot tengelyesen tükrözzük a kép szélső oszlopára, illetve sorára. A kép négy sarkának $R \times S$ méretű területeit középpontosan tükrözzük a kép sarkain lévő képpontra. Ezzel „sima” átmenetet képezünk a kép szélein és elkerüljük az előző megoldásoknál fellépő hibákat.



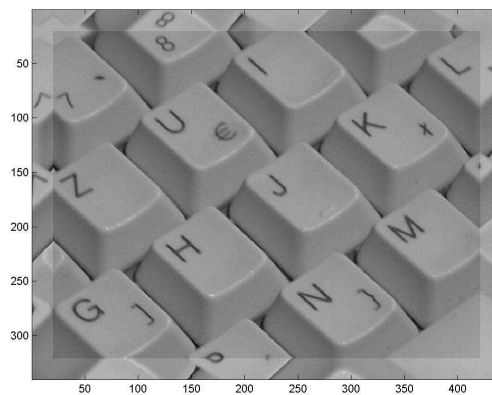
4.32. ábra. A kép széleit nullákkal kiegészítve zajszűrés után a világos terület a kép szélén sötétedik.
a., eredeti kép, b., 5×5 méretű (\bar{x}_3) átlagoló operátor eredménye



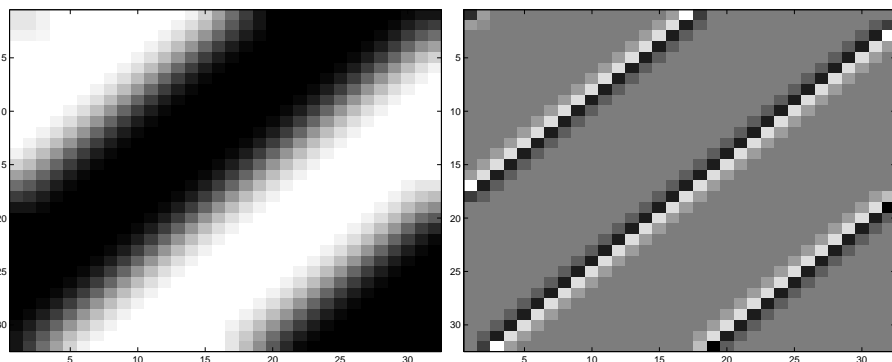
4.33. ábra. A kép szélét nullákkal kiegészítve élkiemelés után a világos terület szélé hamis élként jelenik meg.

a b

a., eredeti kép, b., élkiemelés \mathcal{L}_8 Laplace operátorral



4.34. ábra. A kép széleinek tükrözése konvolúcióhoz:
Tükrözéssel körben 20-20 pixellel megnövelt kép
(a szemléltetés kedvéért az eredeti kép sötétebb).



a b

4.35. ábra. A tükrözéssel végzett konvolúció eredménye a 4.33. ábra példáira a., átlagolás, b., élkiemelés

A konvolúció számításának egyszerűsítésére felhasználhatjuk a művelet matematikai jellemzőit pl. asszociativitását, linearitását. A konvolúció asszociatív művelet:

$$A \otimes (B \otimes C) = (A \otimes B) \otimes C$$

Vagyis, ha A és B operátorok, C a kép, akkor a B operátorral végzett konvolúció eredményére alkalmazott A operátor egyenértékű a két operátor konvolúciójával elvégzett egyetlen konvolúcióval. Pl.: Ha kétszer egymásután alkalmazunk a 3×3 méretű átlagoló szűrőt, az eredmény megkapható egy 5×5 méretű szűrő használatával:

$$z_1 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad z_1 \otimes z_1 = \frac{1}{81} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 3 & 6 & 9 & 6 & 3 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

A konvolúció lineáris művelet, érvényes rá a szuperpozíció elve.

$$A \otimes C + B \otimes C = (A + B) \otimes C$$

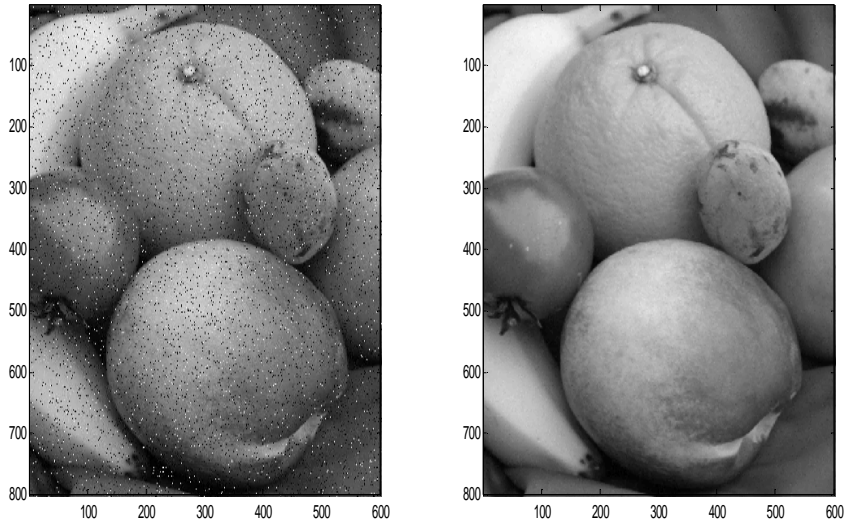
Vagyis, ha a két operátorral végzett művelet eredményét összeadjuk, az operátorok összegével végzett konvolúciót kapjuk. Pl.: Az l_b és l_v Laplace operátorok eredményeinek összege megegyezik az l_d operátorral végzett művelet eredményével.

Érdeemes átgondolni a műveleti időket. Két $n \times n$ méretű mátrix konvolúciója $(2n-1) \times (2n-1)$ méretű lesz, pl. két 3×3 méretű operátorból 5×5 méretű keletkezik. Mivel a konvolúció komplexitása az operátor elemeinek számával arányos ebben az esetben $2 \cdot 9 \cdot N^2$ szorzás áll szemben a $25 \cdot N^2$ szorzással. A másik egyesítési példánkban az operátorok összegzésével $2 \cdot 3 \cdot N^2$ műveletet kell összevetni $9 \cdot N^2$ művelettel. (Az egydimenziós operátoroknál ráadásul tovább gyorsítható az algoritmus a gördülő összegzés kihasználásával.) Ezek az esetek azt mutatják, hogy az operátorok integrálása a végrehajtási idő növekedéséhez vezet. Az operátorok integrálása helyett tehát inkább a dekompozícióval, a nagyobb méretű operátorok kisebb méretű operátorokra bontásával érdemes próbálkozni.

4.2.3. Sorrendi szűrések

A sorrendi szűrések (rank) a lokális transzformációk speciális változatát képviselik. A konvolúciótól eltérően nem lineáris műveletek. Sorrendi szűréskor a feldolgozás alatt álló képpont megadott (pl. 3×3 pixeles) környezetének világosságait nagyság szerint sorba rendezzük, a képpont új világossága a rangsor adott pozíciójában található érték lesz.

Ha a rangsor középső elemét választjuk, medián szűrésről beszélünk. A medián szűrés a kis kiterjedésű, nagyon elütő világosságú (salt and pepper, só és bors) zajok csökkentésének igen hatékony eszköze. Figyelemre méltó, hogy a zajszűrés nem jár az élek meredekségének csökkenésével, nem válik homályossá a kép. Egy $P \times P$ méretű szűrés a $(P^2-1)/2$ pixelnél kevesebb képpontból álló foltokat képes a környezetébe olvasztani.

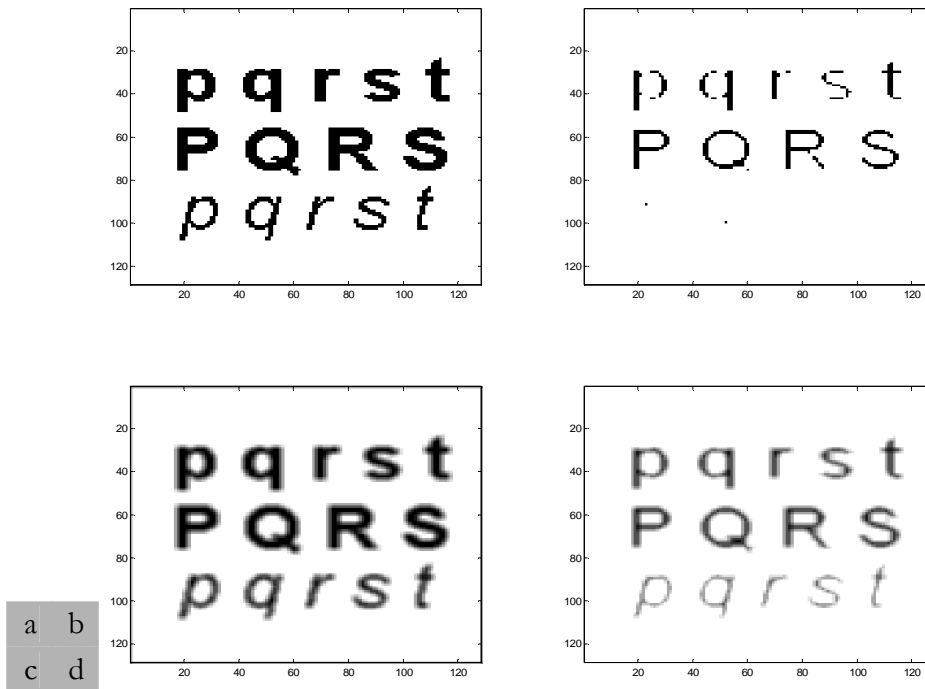


a b

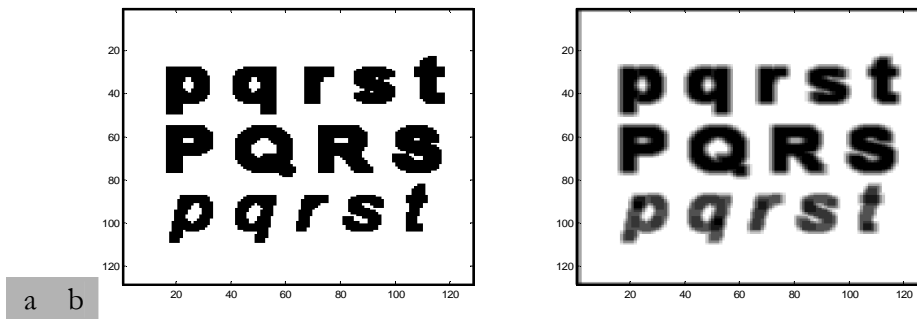
4.36. ábra. Impulzusszerű hibák javítása medián szűréssel.
a., eredeti kép, b., medián szűrés után kapott kép

Emlékezzünk vissza, hogy az átlagoló szűrés „elkenete” a hibákat és homályossá tette a képet. A Gauss eloszlású zajra viszont a medián szűrés nem hatékony.

A rangsorból választhatjuk a minimumot és a maximumot is. A minimum a sötét területeket növeli (a világosokat csökkenti). A maximum a világos területeket növeli (a sötéteket csökkenti).



4.37. ábra. Sorrendi maximum szűrés bináris (a., b.) és árnyaltos képekre (c., d.). a., c., eredeti kép, b., d., a rank szűrés eredménye



4.38. ábra. Sorrendi minimum szűrés az előbbi bináris és árnyaltos képekre. a., bináris, b., árnyaltos képekre

4.3. Műveletek a síkfrekvencia tartományban

Az eddigi műveleteket a képsíkban, a látható képpontokon végeztük. A globális műveletek a síkfüggvények tartományában a komponensek amplitúdóját illetve fázisát módosítják, ennek hatására változik meg a kép. A globális műveletek lépései:

- Meghatározzuk a kép Fourier transzformáltját.
- A Fourier transzformált szűrésével egyes komponenseket erősítünk, illetve csillapítunk.
- Inverz Fourier transzformációval előállítjuk a módosított képet.

Az időfüggvényekre ismert a Fourier integrál

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt,$$

és az inverz Fourier integrál:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega.$$

Ezek diszkrét idejű változata (DFT):

$$A(n) = \sum_{k=0}^{N-1} a(k)e^{-jkn\frac{2\pi}{N}},$$

és (IDFT)

$$a(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A(n)e^{jkn\frac{2\pi}{N}}.$$

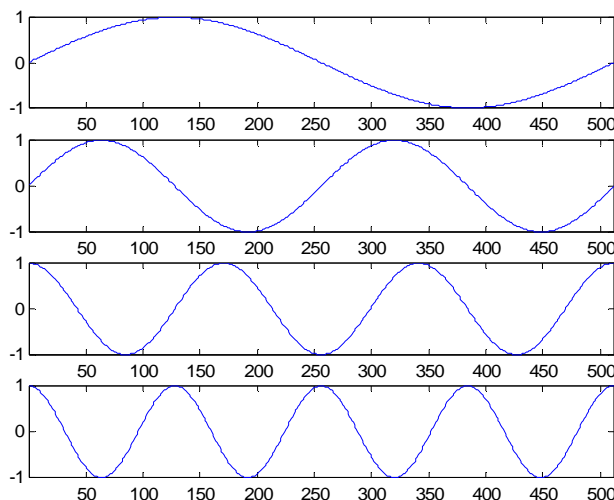
Néhány megjegyzés a kifejezések értelmezéséhez:

- A transzformáció az időtartománybeli N darab $a(k)$ valós mintához a frekvencia tartományban N darab $A(n)$ komplex számot rendel. Ez $N/2$ független komplex számot, vagyis N független adatot jelent, hiszen $A(n)=A(N-n)^*$ (*=komplex konjugált), amiről meggyőződhetünk, ha a DFT egyenletébe n helyére $(N-n)$ -t helyettesítünk.
- Mindkét tartományban N minta szerint periodikus jelet kapunk, hiszen $A(n)=A(n+N)$ és $a(n)=a(n+N)$. Tehát a transzformált időintervallu-

mon kívül nem nullát kapunk, hanem az időfüggvény ismétlődését, periodikus folytatását. Ugyanez igaz a frekvenciatartományban, ahol a Fourier transzformált $2\pi/T$ periódus körfrekvenciával ismétlődik (T a mintavételi idő).

- Az utóbbi tulajdonság következménye a kétdimenziós esetre, hogy a kép jobb szélének periodikus folytatása a kép bal oldalához csatlakozik, és fordítva. Hasonlóan, a kép alja és teteje kerülnek egymás mellé. Nem az a baj, hogy a kép területén kívül nem nullát kapunk, hiszen úgysem helyettesítjük be csak a képen belüli értékeket. Akkor merül fel probléma, amikor a kép egymás mellé került széleinél világosság ugrás lép fel. Ez a Fourier transzformáltban idegen, a képhez nem tartozó spektrális komponensek megjelenéséhez vezet, ami a szűrés után torzítást okozhat.
- A diszkrét Fourier transzformáció kifejezéseiből látható, hogy nincs szükség IDFT algoritmusra. Ha a DFT elvégzése után vesszük az eredmény komplex konjugáltját és elosztjuk a minták számával, megkapjuk az IDFT-t.

Az időfüggvény spektruma harmonikus (szinuszos, koszinuszos) függvények sokaságát tartalmazza.



4.39. ábra. A Fourier sor néhány összetevője.

A Fourier transzformáció értelemszerűen kiterjeszthető kétdimenziós (2D) függvényekre (csak a diszkrét változatot írjuk fel):

$$G(m, n) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} g(k, l) e^{-jkm \frac{2\pi}{M}} e^{-jln \frac{2\pi}{N}}$$

$$g(k, l) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} G(m, n) e^{jkm \frac{2\pi}{M}} e^{jln \frac{2\pi}{N}}$$

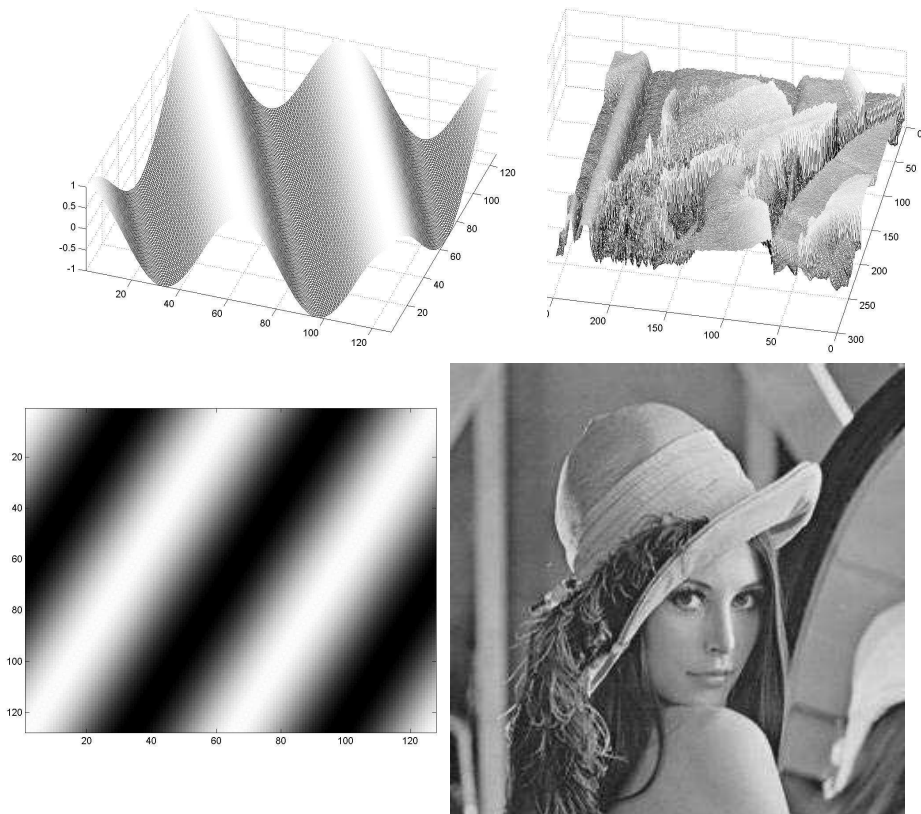
Ha az összegzés sorrendjét megváltoztatjuk

$$G(m, n) = \sum_{k=0}^{M-1} \left[\sum_{l=0}^{N-1} g(k, l) e^{-jln \frac{2\pi}{N}} \right] e^{-jkm \frac{2\pi}{M}}$$

$$g(k, l) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} G(m, n) e^{jln \frac{2\pi}{N}} \right] e^{jkm \frac{2\pi}{M}}$$

Ha megvizsgáljuk a szögletes zárójelben lévő kifejezéseket – mivel k és m állandó – az egydimenziós diszkrét Fourier transzformációra ismerhetünk. Más szavakkal: A kétdimenziós diszkrét Fourier transzformációt visszavezethetjük az egydimenziós DFT-re: Elvégezzük először a mátrix soraira, majd az eredményül kapott mátrix oszlopaira az egydimenziós DFT-t. Ugyanarra az eredményre jutunk, ha először oszlopok szerint, utána sorok szerint transzformálunk. Ugyanez elmondható a kétdimenziós inverz diszkrét Fourier transzformációra. A Fourier transzformáció rövid idejű végrehajtásához az előbbiek szerint elegendő, ha az egydimenziós DFT-re rendelkezünk hatékony megoldással. Erre fejlesztették ki a gyors Fourier transzformációt (FFT – Fast Fourier Transform).

A kétdimenziós függvények angol elnevezése (spatial function) síkfüggvényt és térfüggvényt is jelent. A fogalmak tisztázásához vizsgáljuk meg, hogyan ábrázolhatunk egy kétdimenziós függvényt. Az egyik ábrázolási mód szerint a függvény egy felületet ír le, az x, y koordináták által jelölt helyen a függvényérték a felület magasságát (z koordináta) adja meg. Egy másik lehetséges ábrázolási mód a koordináták által megjelölt helyen a függvény értékével arányos világosságú pontot jelenít meg.



a b **4.40. ábra.** Harmonikus függvény (a., c.,) és a közismert Lena kép (b., d.,)
c d felületi (a., b.,) és intenzitás (c., d.,) ábrázolása.

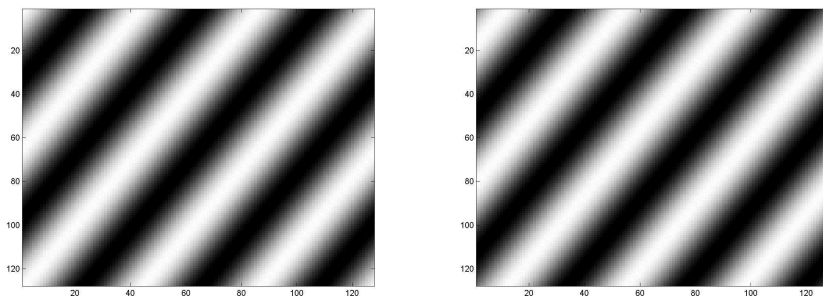
A magyar terminológia meghatározásához természetes választásnak tűnik, ha a felületi ábrázolást térfüggvénynek, a világosság ábrázolást síkfüggvénynek nevezzük. Mivel a képek ábrázolása rendszerint a képpontok világosságával történik, a síkfüggvény kifejezést fogjuk használni.

Felmerül a kérdés, hogy milyenek a kétdimenziós Fourier transzformáció bázisfüggvényei. Az Euler összefüggés alapján az e^{jx} koszinuszos valós és szinuszos képzetes összetevőket takar.

$$e^{jx} = \cos(x) + j \sin(x)$$

A kétdimenziós DFT kifejezésének kiértékelése alapján megállapíthatjuk, hogy k, l indexű tag függőlegesen k , vízszintesen l periódust tartalmazó

koszinusz és szinusz függvény. A koszinuszos tag az origóban (a kép bal felső sarka) egyet tartalmaz, a szinuszos tag nullát. Ha a -1 és $+1$ között változó harmonikus függvényeket úgy ábrázoljuk, hogy a -1 -nek a feketét, $+1$ -nek a fehéret feleltetjük meg, a koszinuszos bázisfüggvények bal felső sarkában fehéret, a szinuszos tagok origójában szürkét látunk. (4.41. ábra) Figyeljük meg azt is, hogy – pl. az első oszlopban és sorban – a harmonikus függvények k , illetve l periódusát találjuk.



a b

4.41. ábra. $k=2$, $l=3$ indexű koszinuszos (a.,) és szinuszos (b.,) bázisfüggvények

A kétdimenziós diszkrét Fourier transzformáció kifejezése szerint – mivel az index tartomány megegyezik a sorok illetve oszlopok számával – az árnyaltos képet a Fourier transzformáció a kép pontjainak számával megegyező számú koszinuszos és ugyanennyi szinuszos összetevőre bontja, vagyis a képet $2 \cdot M \cdot N$ bázisfüggvény összegeként állítja elő. Az egyes

bázisfüggvények hullámhossza a vízszintes $\left(\lambda_h = \frac{N}{l} \right)$ és függőle-

ges $\lambda_v = \frac{M}{k}$ összetevők hullámhosszából számolható (pixeleken mérve):

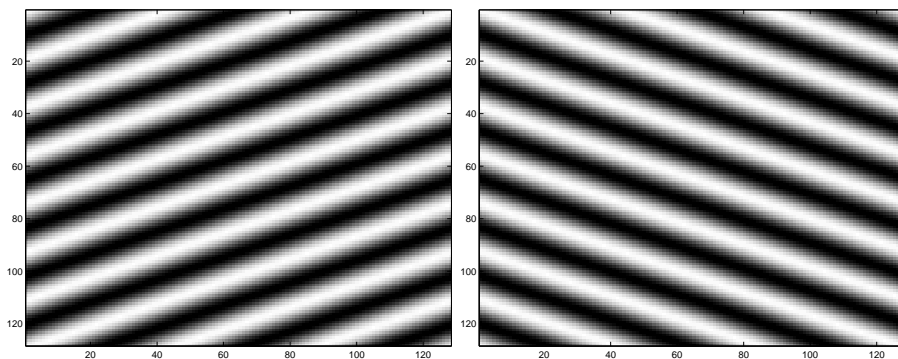
$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 &= \left(\frac{1}{\lambda_v}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_h}\right)^2 = \\ &= \left(\frac{l}{N}\right)^2 + \left(\frac{k}{M}\right)^2 = \\ &= \frac{l^2 M^2 + k^2 N^2}{M^2 N^2} \end{aligned}$$

Ezzel:

$$\lambda = \frac{MN}{\sqrt{l^2 M^2 + k^2 N^2}} \text{ (pixel).}$$

A hullámhossz reciproka a síkfrekvencia.

A (k,l) és $(k,N-l)$ indexű bázisfüggvények nem függetlenek egymástól. A hullámfront iránya megváltozik, a két bázisfüggvény egymás függőleges tengelyre tükrözött képe.



a b 4.42. ábra. A $k=7, l=3$ (a.) és $k=7, l=125$ (b.) indexű bázisfüggvény, a kép mérete: 128x128 pixel

A Fourier transzformáció elvégzése után a $(0,0)$ indexű tag tartalmazza a kép egyenkomponensét, átlagos világosságát. Ha a transzformáció eredményét akarjuk ábrázolni, talán legcélszerűbb a Fourier transzformált abszolút értékét megjeleníteni kép formájában, hiszen a fázis vizuálisan nehezen értékelhető. Ha a képet lineáris világosság skálán ábrázolnánk, leg-

többször egy fehér pontot kapnánk a bal felső sarokban $(0,0)$, a kép többi része fekete lenne. Ennek az az oka, hogy az összetevők abszolút értékében nagyságrendi eltérések vannak. Az abszolút érték ábrázolását ezért legtöbbször logaritmikus léptékben ábrázoljuk: a világosság a Fourier komponens abszolút értékének logaritmusaival arányos. (Hamar rájövünk, hogy a logaritmus képzés előtt egy kis pozitív számot célszerű hozzáadni a 0 -k logaritmusaának elkerülése végett.)

A 2D DFT kifejezéséből kiderül, hogy a (k,l) , a $(k,N-l)$, az $(M-k,l)$, és az $(M-k,N-l)$ indexű tagok abszolút értéke megegyezik. (Az e^{jx} abszolút értéke mindig *egy*, a felsorolt indexű tagok másban nem térnek el.) Az

$$A(m,n) = |G(m,n)|$$

abszolút érték képként ábrázolva az egyes komponenseket az **4.43. ábrán** megadott sorrendben kapjuk. (Az indexekbe az előző bekezdés szerint 0 - $(M/2-1)$ és a 0 - $(N/2-1)$ tartományt helyettesítettük.)

0,0	0,1	0,2					0, n-1	0,n						0,2	0,1
1,0	1,1	1,2												1,2	1,1
2,0	2,1	2,2												2,2	2,1
m-1 ,0							m-1 ,n-1	m-1 ,n							m-1 ,1
m							m ,n-1	m,n							m,1
2,0	2,1	2,2												2,2	2,1
1,0	1,1	1,2					1, n-1	1,n						1,2	1,1

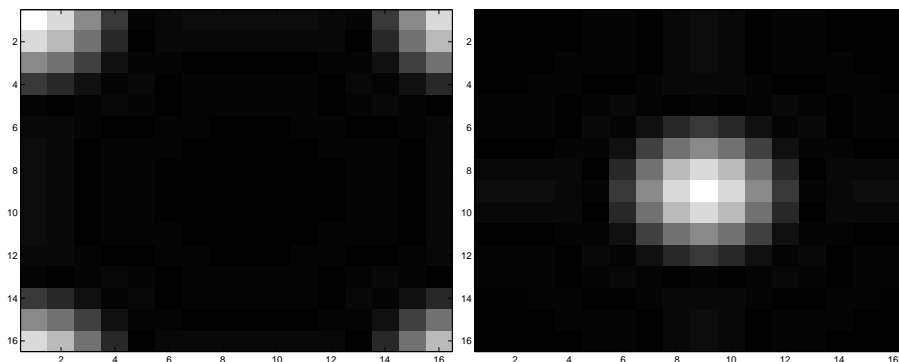
4.43. ábra. A kép Fourier transzformáltja abszolút értékének sorrendje ($M/2=m, N/2=n$).

Az ábrázolás sajátossága, hogy a síkfrekvencia a sarkaktól a középpont felé haladva nő. Az azonos abszolút értékű és azonos síkfrekvenciájú komponensek nehezen párosíthatók. Megkönnyíthetjük a vizuális kiértékelést, ha a síknegyedeket átlósan megcseréljük.

m,n						m,1	m									m,n-1
						2,2	2,1	2,0	2,1	2,2						
1,n						1,2	1,1	1,0	1,1	1,2						1,n-1
0,n						0,2	0,1	0,0	0,1	0,2						0,n-1
						1,2	1,1	1,0	1,1	1,2						
						2,2	2,1	2,0	2,1	2,2						
m-1,n						m-1,1	m-1,0									m-1,n-1

4.44. ábra. A Fourier transzformált felcserélt sorrendje.

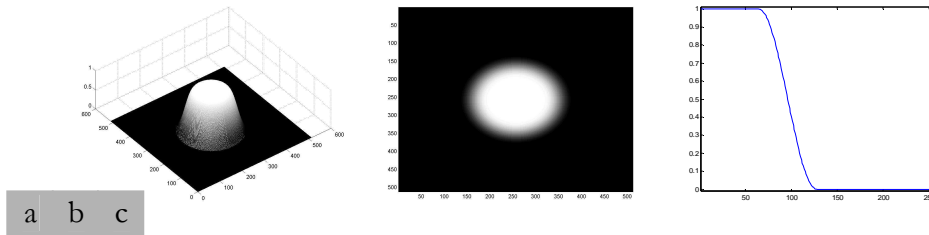
A felcserélt sorrendű mátrixban az origó, az egyenkomenst képviselő $(0,0)$ indexű összetevő „középre” került. (Páros számú sor illetve oszlop esetén nincs középső elem.) Távolodva tőle a síkfrekvencia nő. Az azonos síkfrekvenciájú komponensek a középponttól azonos távolságra, egy kör mentén helyezkednek el. Egy aluláteresztő szűrő karakterisztikáján láthatjuk a kétféle ábrázolást. Figyeljük meg, hogy az eredeti sorrendnél a sarkakban eltérő minták vannak, ezért igen körültekintően kell a szűrőt megtervezni. Egyszerűbb a dolgunk a felcserélt sorrendű változattal, ahol a középpont körül körkörösen változik az együttható.



a b **4.45. ábra.** Aluláteresztő szűrő karakterisztikája eredeti (a.,) és felcserélt (b.,) sorrend esetén.

A Fourier transzformáltban a nagy homogén területeket a kis síkfrequenciájú, az apró objektumokat és az éleket a nagy síkfrequenciájú komponensek képviselik. A síkfrequencia tartományban is megfogalmazhatók azok a feladatok, amelyeket konvolúcióval el tudunk végezni. A zajcsökkentés a nagy síkfrequenciájú komponensek csillapításával, az élesítés ugyanezen komponensek erősítésével érhető el.

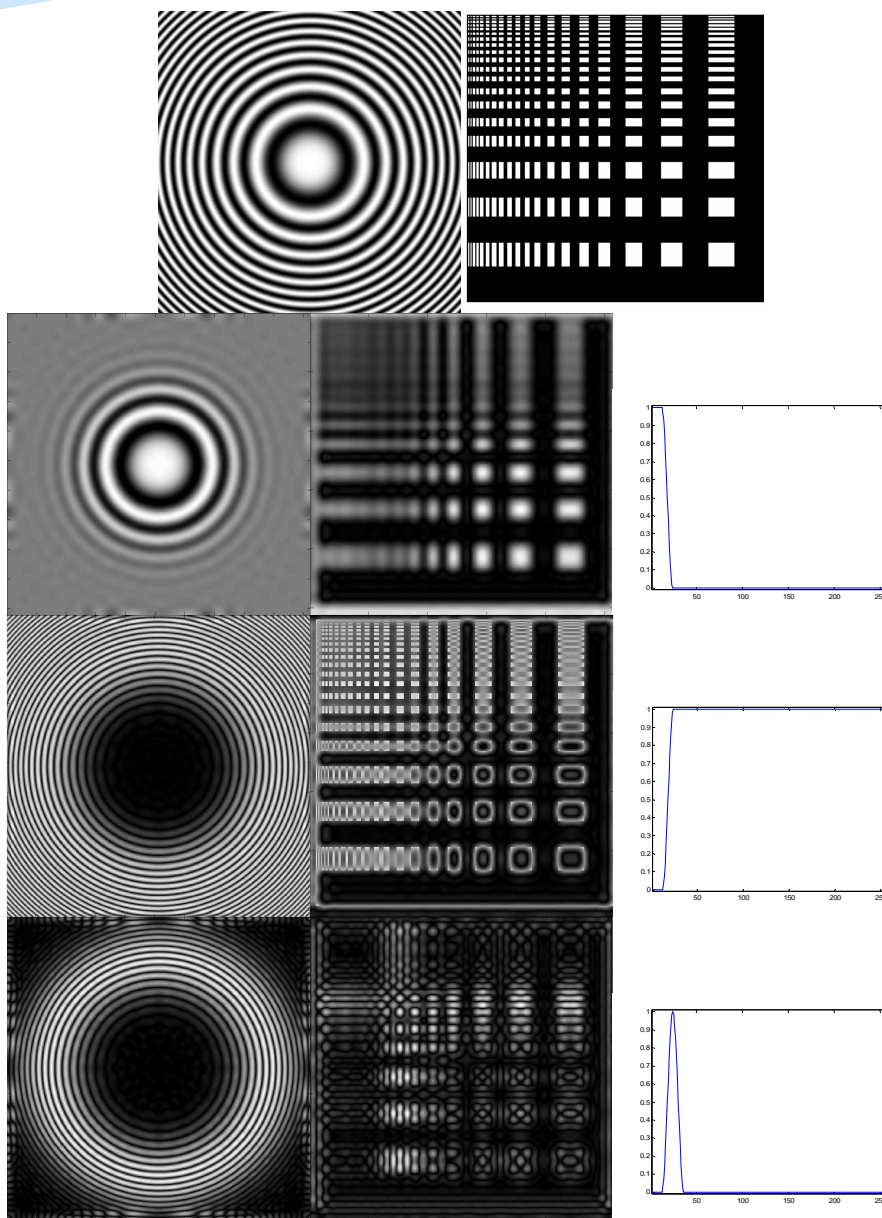
A kétdimenziós szűrőtervezésre nem térünk ki. Általában körkörösen szimmetrikus a szűrő karakterisztikája. A teljesen kiszűrt komponens együtthatója *nulla*. A változatlanul átvitt komponensek együtthatója *egy*. A kiemelt komponensek együtthatója *egynél nagyobb*. A szűrő karakterisztikája több módon ábrázolható. A felcserélt sorrendű megjelenítésnél az egyenkomponens helyezkedik el középen, távolodva nő a síkfrequencia. Szemléletes a háromdimenziós nézeti kép és intenzitás ábra, de nehezen olvashatók le az értékek. A szűrőprofil függvényszerű ábrázolása lehetővé teszi a nevezetes síkfrequenciák és erősítések-csillapítások leolvasását.



4.46. ábra. A szűrőkarakterisztika ábrázolási módjai:
a., 3D, b., intenzitás, c., profil

A pontosabb értelmezés érdekében a példánál a szűrőprofil fogjuk megadni.

Vizsgáljuk meg egy tesztképen az aluláteresztő, feluláteresztő és sávát-
eresztő szűrők hatását!

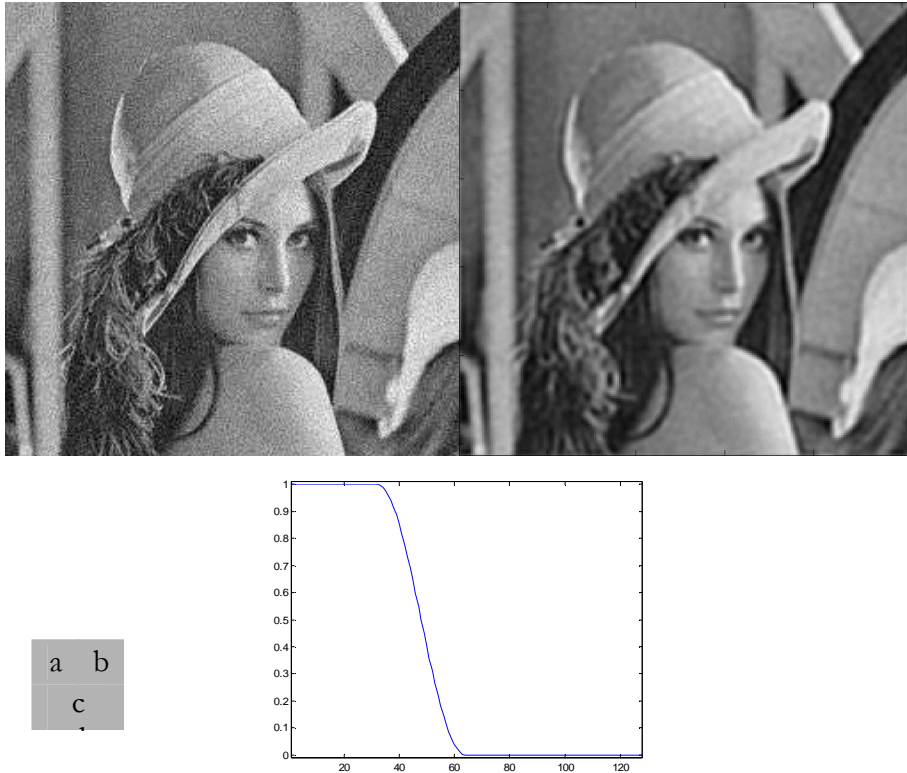


a	b
c	d e
f	g h
i	j k

4.47. ábra. Szűrés tesztképeken. a., b., eredeti tesztképek, c., d., aluláteresztő szűrés eredménye, e., szűrőkarakterisztika, f., g., feluláteresztő szűrés eredménye, h., szűrőkarakterisztika, i., j., sáváteresztő szűrés eredménye, k., szűrőkarakterisztika,

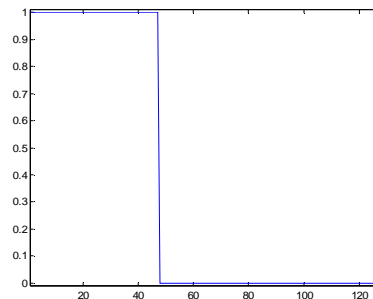
Aluláteresztő szűrés

Aluláteresztő szűréssel a zaj csökkentését, illetve enyhe csillapítással a kép lágyítását érhetjük el. A **4.48. ábra** zajos kép síkfrekvencia tartománybeli zajszűrését mutatja. Természetesen a „mellékhatás” – az élek meredekségének csökkenése – nem marad el.



4.48. ábra. Zajcsökkentés aluláteresztő szűréssel.
a., eredeti zajos kép, b., szűrt kép, c., szűrőkarakterisztika

A határfrekvencia (a 0,5 erősítésű síkfrekvencia) változatlanul hagyása mellett szűkítsük minimálisra az átmeneti tartományt!



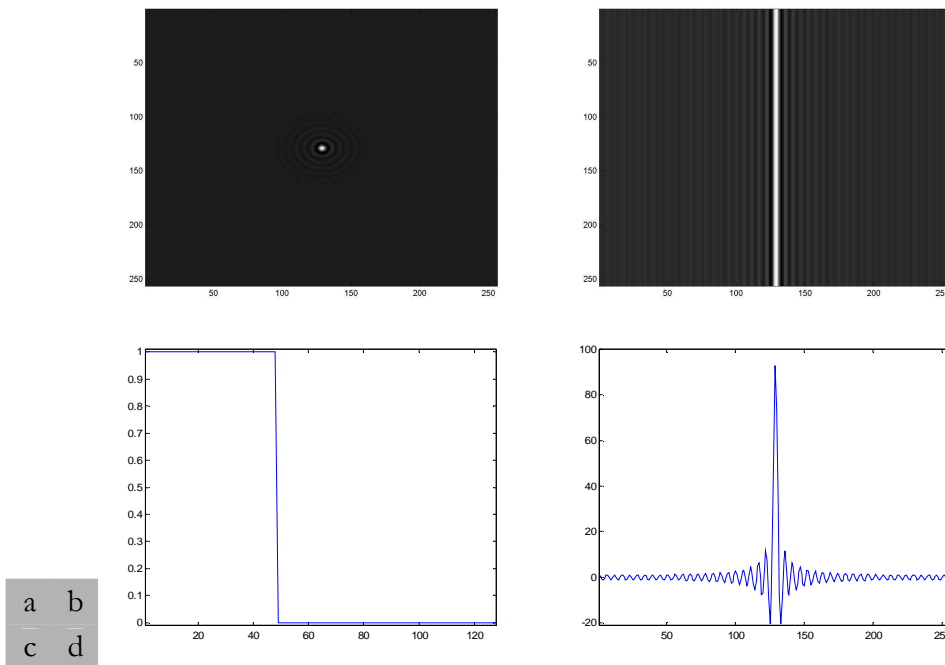
a b **4.49. ábra.** Aluláteresztő szűrés „ideális” aluláteresztő szűrővel.
a., szűrt kép, b., szűrőkarakterisztika

A hasonló zajcsökkentő hatás mellett feltűnő változás az előző szűrt kép-
hez képest az élek tovaterjedése, fodrozódása. Ennek oka, hogy a négy-
szögimpulzus keresztmetszetű szűrő karakterisztikájának inverz Fourier
transzformáltja $\frac{\sin(x)}{x}$ alakú. A rendszerelmélet szerint ilyen alakú az egy-

ségimpulzusra – esetünkben egy pontra – adott válasz. A $\frac{\sin(x)}{x}$ első ne-
gatív félhulláma és az azt követő pozitív félhullám elég jelentős amplitúdójú
ahhoz, hogy sötét és világos sávként látható legyen. Amennyiben a képen
él látható, ezzel párhuzamosan fog megjeleneni a $\frac{\sin(x)}{x}$ hullámmozgása. A

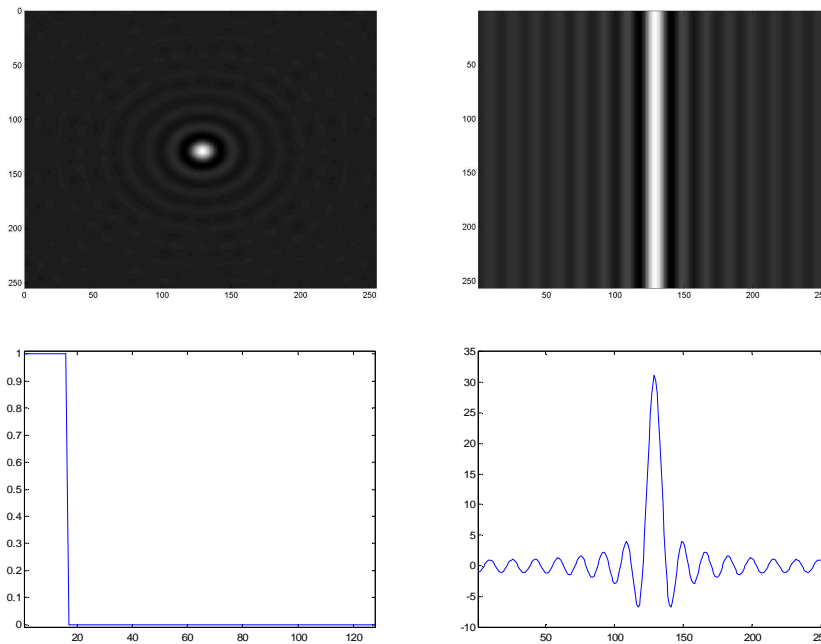
szűrő sáv szélessége és a $\frac{\sin(x)}{x}$ hullámhossza ellentétesen változik: Minél

kisebb a szűrő sáv szélessége, annál szélesebbek a fodrozódó sávok. A
4.50. ábrán a határfrekvencia 48. Vagyis azt a síkhullámot, amelynek 48,
vagy kevesebb periódusa esik a kép szélességére, változatlanul hagyja, az
ennél kisebb hullámhosszú síkhullámokat pedig nem engedi át.



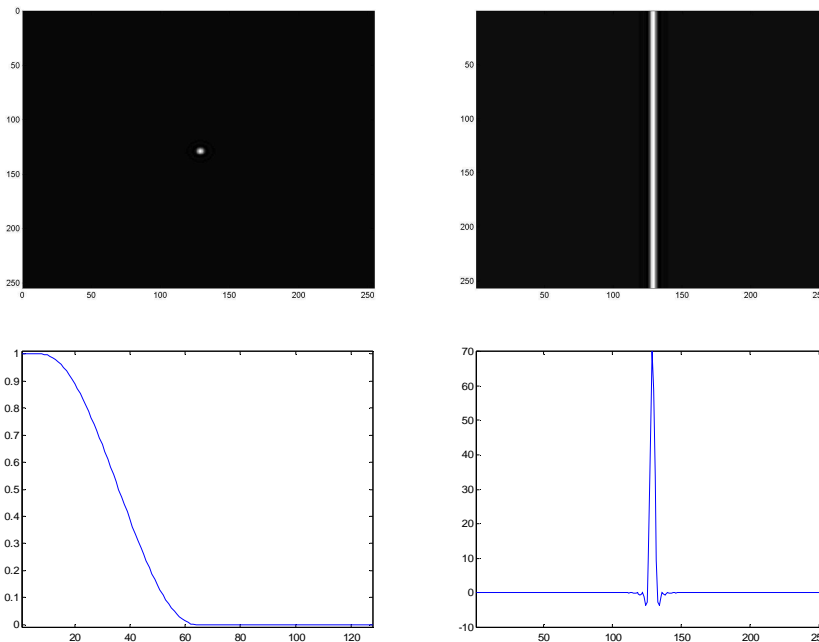
4.50. ábra. Ideális aluláteresztő szűrő válasza. a., pontszerű gerjesztésre, b., vonalszerű gerjesztésre, c., szűrőkarakterisztika, d., $\frac{\sin(x)}{x}$ alakú válasz

A **4.51. ábrán** a határfrekvencia 16 . Figyeljük meg a $\frac{\sin(x)}{x}$ hullámhossz-
szának növekedését!



a b **4.51. ábra.** Keskenyebb ideális aluláteresztő szűrő válasza.
c d a., pontszerű gerjesztésre, b., vonalszerű gerjesztésre,
 c., szűrőkarakterisztika, d., $\frac{\sin(x)}{x}$ alakú válasz

A lágy átmenettel rendelkező szűrők kisebb amplitúdójú hullámzást okoznak, úgy célszerű megválasztani a szűrő karakterisztikáját, hogy a hullámzás ne legyen látható.



a	b
c	d

4.52. ábra. Széles átmeneti tartományú aluláteresztő szűrő válasza.
 a., pontszerű gerjesztésre, b., vonalszerű gerjesztésre,
 c., szűrőkarakterisztika, d., a válasz hullámzása minimális

Vegyük észre, hogy a pont, illetve vonal az aluláteresztő szűrés hatására szétterül, de fodrozódás nem látható.

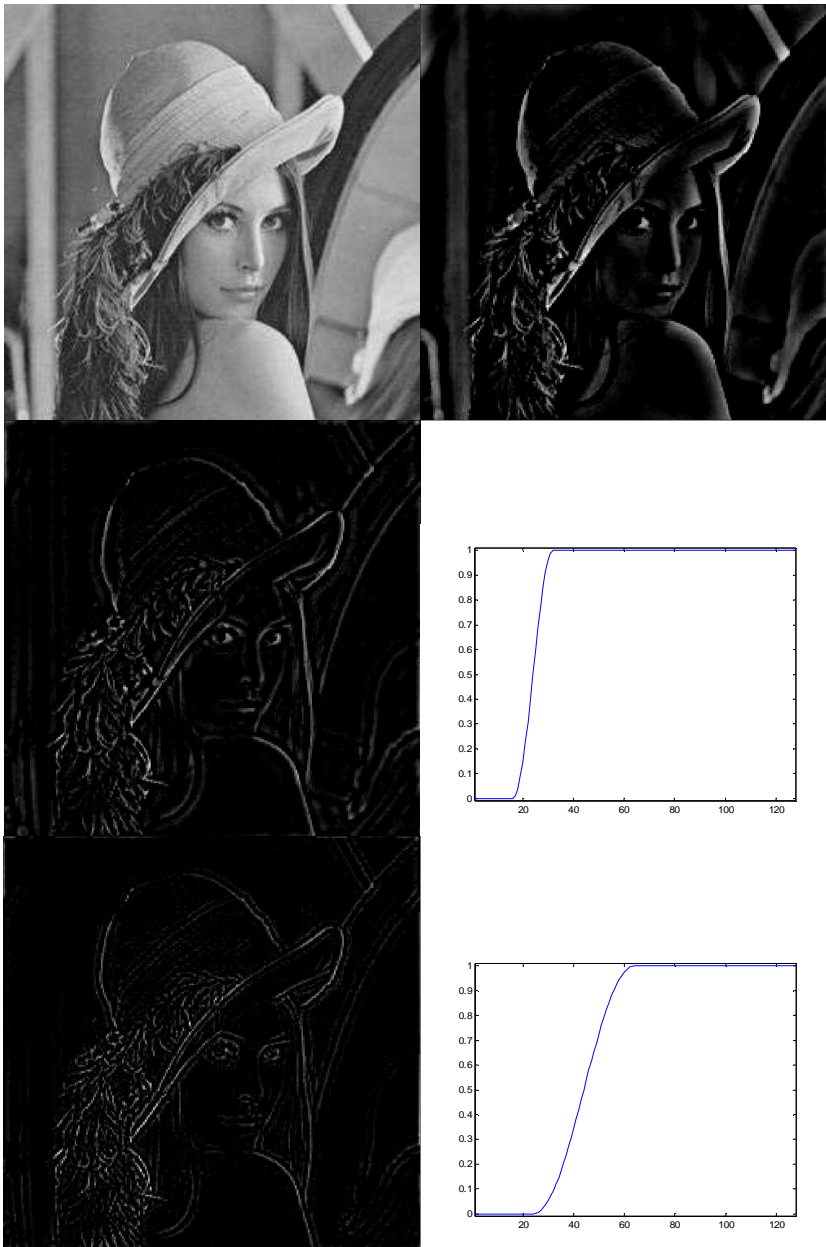
A síkfrequencia tartománybeli szűréseknél kerüljük a meredek karakterisztikájú szűrők alkalmazását!

Felüláteresztő szűrés

A felüláteresztő szűrést kétféleképpen szokás tervezni:

- a kis síkfrequenciák kiszűrésével, a nagyobb síkfrequenciák változatlanul hagyásával,
- a kis síkfrequenciák változatlanul hagyásával, a nagy síkfrequenciák erősítésével.

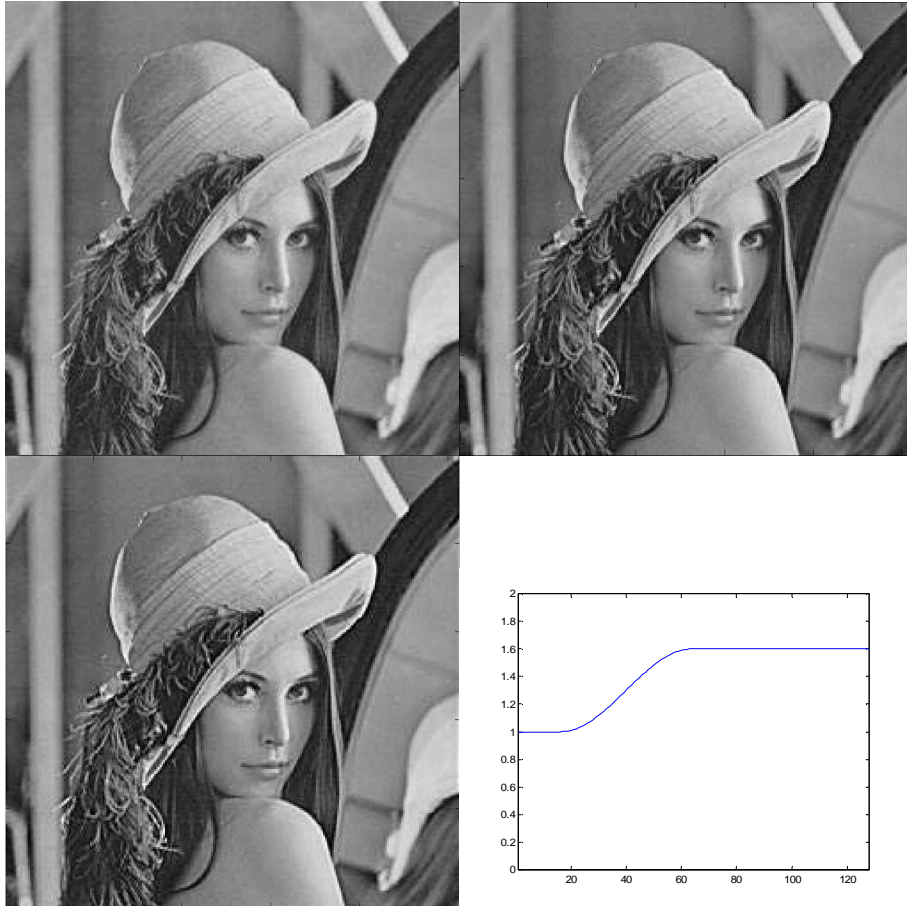
Előbbi az élkeresésre, utóbbi az élesítésre alkalmas. A következő ábrán különböző határfrekvenciájú felüláteresztő szűrések eredményeit látjuk. Figyeljük meg a határfrekvencia és a vonalvastagság kapcsolatát!



a	b
c	d
e	f

4.53. ábra. Élkeresés célú felüláteresztő szűrés. a., eredeti kép, b., alacsony határfrekvenciájú felüláteresztő szűrés, c., közepes határfrekvenciájú szűrt kép, d., szűrőkarakterisztika, e., magasabb határfrekvenciájú szűrés eredménye, f., szűrőprofil

A kép élesítése (keményítése) céljából a magasabb síkfrekvenciájú komponeket kiemeljük, erősítjük. A síkfrekvencia tartományban végzett élesítésre is igaz, hogy a kép hibáit kiemeli.

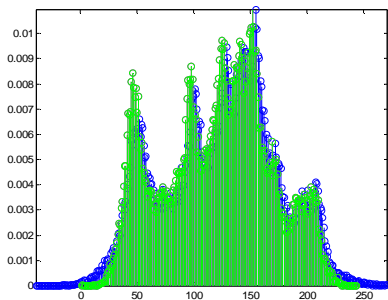


a b
c d

4.54. ábra. Élesítés a síkfrekvencia tartományban. a., eredeti kép, b., kiemelés 1,3 tényezővel, c., kiemelés 1,6 tényezővel, d., az utóbbi szűrő profilja

Említést érdemel az élesített képek megjelenítése. A hisztogram nyújtásnál arra törekedtünk, hogy a kép világosság tartománya kitérje a fekete és fehér közötti tartományt. A legsötétebb árnyalat legyen fekete, a legvilágosabb fehér. Az élesítés kiterjeszti a világosság dinamikatartományát. A

4.55. ábra a kép élesítés utáni és az elemásolt eredeti histogramját mutatja. A vízszintes tengelyen jól látható a dinamikatartomány változása. Ha az új dinamikatartományt a fekete-fehér skálára zsugorítjuk, a kép kontraszt szegényebbé válik. Az élesített képet az eredeti dinamikatartomány megtartásával célszerű ábrázolni.



a
b c

4.55. ábra. Élesített kép ábrázolási lehetőségei.
a., eredeti és új histogram, b., változatlan világosságskála,
c., az új dinamikatartományhoz igazított skála

A síkfrekvencia tartományban végzett felüláteresztő szűrő karakterisztikájára is elmondható az aluláteresztő szűrőkre vonatkozó figyelmeztetés, hogy tartózkodjunk a meredek karakterisztikájú szűrők alkalmazásától. A felüláteresztő szűrő karakterisztikája (F_{hp}) előállítható – az egyenkomponens egy esetleges szorzótényezőtől eltekintve – egy megfele-

lő aluláteresztő (F_{lp}) karakterisztikából: $F_{hp} = 1 - F_{lp}$. Ennek síkfüggvény összetevői tehát megegyeznek az aluláteresztő szűrő komponenseivel, de ellentétes előjellel. Vagyis a fodrozódás az éleknél ugyanúgy felléphet, mint az aluláteresztő szűrő alkalmazásakor.



a b

4.56. ábra. A hasonló élkiemelést végző lankás (a.) és meredek (b.) szűrő eredményein jól látható a különbség.

4.3.1. A síkfrekvencia tartományban végzett szűrés és a konvolúció kapcsolata

Egy képfeldolgozási feladat megoldása során azt a megoldást választjuk, amellyel közelebb juthatunk a célhoz. A megrendelő számára közömbös, hogy ezt a képsíkban vagy a síkfrekvencia tartományban végezzük. A zajszűrés vagy az élesítés elvégezhető többféle módszerrel. A konvolúció és a frekvencia tartományban végzett műveletek kapcsolatát az egyszerűség kedvéért egydimenziós, folytonos idejű függvényekre mutatjuk be. Az u gerjesztésre a h súlyfüggvénnyel rendelkező rendszer y válasza az időtartományban a gerjesztés és a súlyfüggvény konvolúciója:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

az inverz Fourier integrál alapján $h(t - \tau)$ helyére a frekvenciatartománybeli megfelelője, $H(\omega)$ inverz Fourier transzformáltját írhatjuk:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{j\omega(t-\tau)} d\omega \right) d\tau.$$

Az integrálás sorrendjének felcserélésével:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \left(\int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \right) e^{j\omega t} d\omega$$

A zárójeles kifejezésben a Fourier transzformáció alapján az $u(\tau)$ Fourier transzformáltjára, $U(\omega)$ -ra ismerünk.

$$y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) U(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Tehát $y(t)$ a $H(\omega)U(\omega)$ inverz Fourier transzformáltja. Vagyis az $y(t)$ Fourier transzformáltja:

$$Y(\omega) = H(\omega)U(\omega)$$

Más szavakkal: Az időtartománybeli konvolúciónak a frekvenciatartományban a súlyfüggvény Fourier transzformáltjának (átviteli karakterisztika) és a gerjesztés Fourier transzformáltjának – dimenziókénti – szorzása felel meg.

A rendszer gerjesztésre adott válaszát két módon kaphatjuk meg:

- Az időtartományban a gerjesztés és a súlyfüggvény konvolúciója adja a válasz időfüggvényét.
- A frekvencia tartományban a Fourier transzformáltak szorzata adja a válasz Fourier transzformáltját. A válasz időfüggvénye ennek inverz Fourier transzformáltja.

A második megoldás a maga három Fourier transzformáltjával bonyolultabbnak tűnik, de a Fourier transzformáltra létezik gyors algoritmus, a konvolúcióra nem.

Kétdimenziós esetre a súlyfüggvényt a konvolúció operátora képviseli. Ennek Fourier transzformáltja a szűrő karakterisztika. A síkfrekvencia tartományban végzett szorzáshoz a két tömbnek azonos méretűnek kell lennie. Ezt úgy érjük el, hogy

- létrehozunk egy, a képpel megegyező méretű mátrixot,
- ennek középebe eltolva bemásoljuk a konvolúció operátorát,
- elvégezzük a kétdimenziós diszkrét Fourier transzformációt.

Ezzel a szűrővel dimenzióként szorozzuk a kép Fourier transzformáltját. Az eredmény inverz Fourier transzformáltja lesz a feldolgozott kép. Egy sebességteszt alapján az 512x512 pixeles képre a 17x17 méretű operátorral végzett konvolúció volt a közvetett módszerrel azonos sebességű. Kisebb méretű operátorokra a konvolúció, nagyobb méretűekre a síkfrekvencia tartományban végzett szűrés gyorsabb.

Itt kell kitérnünk arra is, hogy a fejezet bevezetőjében említett periodikus folytatás illesztetlenséget okozhat a széleken. Az ennek következtében fellépő idegen komponensek miatt a kép szélein hibás sávot kaphatunk. Felmerül a kérdés, hogy ez milyen területre terjed ki. A választ nem a síkfrekvencia tartományban, hanem a képsíkban kaphatjuk meg.

Ahogy a 4.2.2. alfejezetben a konvolúció tulajdonságainál láttuk, a konvolúciós operátor méretétől függően a kép szélein hibás eredményt kapunk. Ezt az ismeretet használhatjuk fel a síkfrekvencia tartományban végzett műveletek helyességének ellenőrzéséhez:

Meghatározzuk a szűrőkarakterisztika inverz Fourier transzformáltját, ez fogja megadni az operátor méretét. A komponensek sajátos eredeti sorrendjének köszönhetően a bal felső sarokban az egyenkomponeus miatt vízszintesen és függőlegesen is éppen eggyel nagyobb méretű foltot látunk a hibás oszlopok, illetve sorok számánál. A hibát úgy tudjuk kiküszöbölni, hogy ezzel a mérettel körben megnöveljük a képet, a művelet elvégzése után eredményül kapott képet pedig „körbenyírjuk” ugyanezzel a mérettel.

5. Morfológiai műveletek

A morfológiai műveleteket a szegmentálás előzi meg. Ennek során bináris képet alakítunk ki, amelyen elkülönül az objektum és a háttér. A szegmentálás történhet világosság, szín, vagy éppen a textúra alapján.

A morfológiai műveletek a kép előkészítését jelentik az alakzatfelismerésre. Egy részük a szegmentálási hibák korrigálására alkalmas:

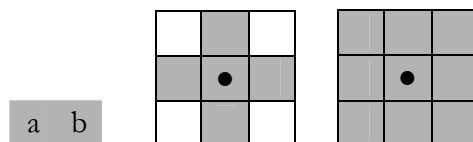
- El lehet tüntetni a háttér területén az objektumhoz sorolt pontokat, apró alakzatokat.
- Be lehet foltozni az objektumon támadt lyukakat, az objektumhoz lehet rendelni a tévesen háttérhez sorolt pontokat.
- Össze lehet olvasztani véletlenül szétesett objektumokat.
- Szét lehet választani összeérő, eltérő objektumokat.

A morfológiai műveletek másik része már a lényegkiemeléshez tartozik. Az objektumokat olyan formára hozza, amelyen az alakzatfelismerés könnyebben, nagyobb biztonsággal elvégezhető.

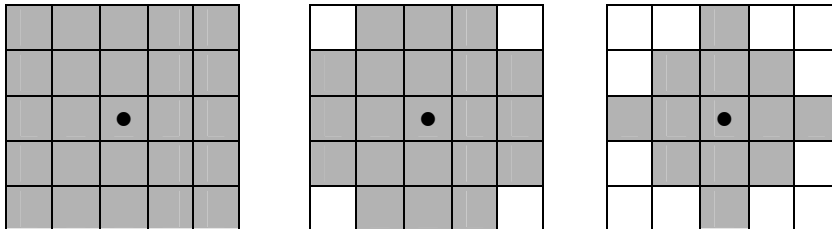
5.1. Szegmentálási hibák korrigálása

Az objektumok méretének csökkentésével az apró alakzatok elfogynak. A szegmentálási hibák korrigálására szolgáló műveletek közös tulajdonsága, hogy tartozik hozzá egy strukturáló elem (structuring element).

A strukturáló elem határozza meg azt a környezetet, amelyre a morfológiai művelet vonatkozik. Strukturáló elemként az esetek többségében egy adott sugarú kört szeretnénk választani, digitális képeknél ennek megvalósítása csak közelítőleg sikerül.



5.1. ábra. 3×3 méretű strukturáló elemek. a., négyes szomszédok, b., nyolcas szomszédok



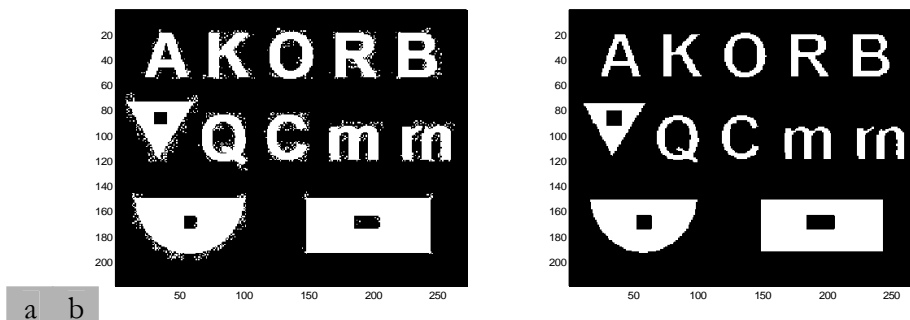
5.2. ábra. 5x5 méretű strukturáló elemmel sem közelíthető jól a kör.

Erózió

Az *erózió* az objektum körbenyírását jelenti, a strukturáló elem sugarával csökken minden irányban az objektum mérete. Nevezik még hámozásnak és fogyasztásnak is.

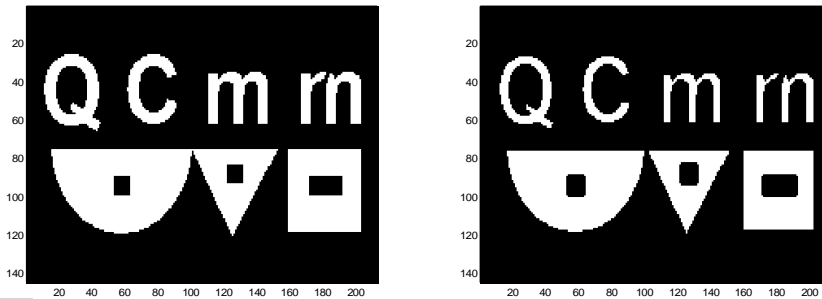
Az erózió végrehajtása során az objektumnak azok a képpontjai maradnak meg továbbra is az objektum részeként, amelyekre ráhelyezve a strukturáló elemet, annak minden pontja az objektumhoz tartozó képpontot fed. Más szavakkal: Az objektum azon pontjait, amelyekre ráhelyezve a strukturáló elemet, annak valamely pontja a háttérhez tartozó képpontot takar, a háttérhez kell sorolni.

Az erózió hatékonyan tünteti el az apró objektumokat.



5.3. ábra. Erózió 3x3 méretű, nyolcas szomszédságú operátorral.
a., eredeti kép, b., az erózió eredménye

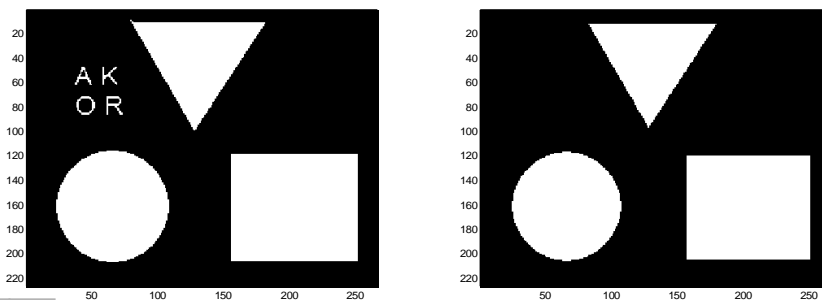
Az erózió alkalmas az összeolvadt objektumok szétválasztására. A strukturáló elem határozza meg, hogy vízszintesen és függőlegesen hány pixelt farag le az objektumból. Az oszlopszerű strukturáló elem az egymás melletti, a vízszintes pálcikaszerű elem az egymás alatti objektumokat választja el hatékonyan.



a b

5.4. ábra. A háromszög és a félkör szétvált a 3×3 méretű, négyes szomszédságú strukturáló elemmel végzett erózió során.
a., eredeti kép, b., erodált kép

Az erózió visszafordíthatatlan művelet. Az objektumok sarkai lekerekednek, ezeket nem lehet visszaépíteni. A vékony alakzatok el is tűnhetnek, ezeket lehetetlen visszanyerni.



a b

5.5. ábra. Az erózió irreverzibilis művelet.
a., eredeti kép, b., az erózió eredménye

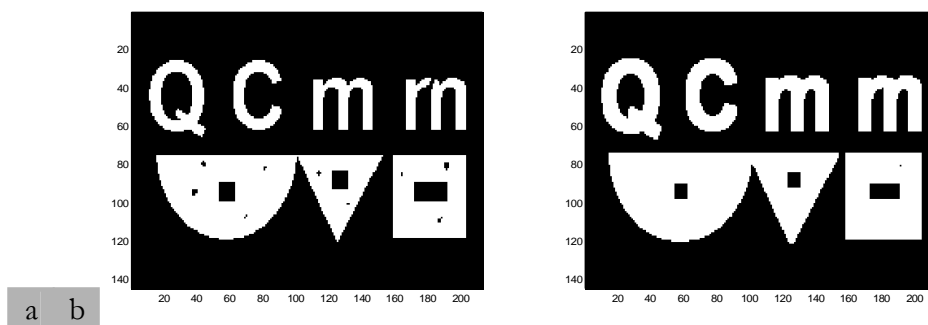
Dilatáció

A *dilatáció* az *erózió* ellentéte, az objektumot bővítjük a strukturáló elem sugarával. Hizlalásnak is szoktuk nevezni.

A háttérre végzett erózió megegyezik az objektumra végzett dilatációval és fordítva.

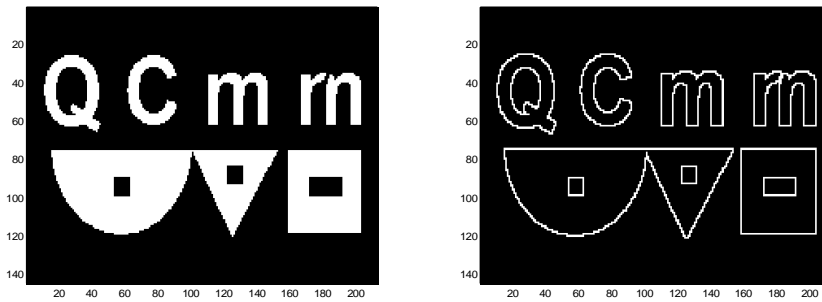
A *dilatáció* eredményeként a háttér azon pontjai, amelyekre a strukturáló elemet ráhelyezve az objektumhoz tartozó képponttal is fedésbe kerül, az objektumhoz fognak tartozni.

A dilatáció alkalmas az objektumon támadt lyukak befoltozására. A hizlalás eredményeképpen a szétválasztott, közeli objektumok újra összeolvadhatnak.



5.6. ábra. A dilatáció befoltozza az objektumon keletkezett lyukakat. A szétszakadt *m* betűn látható a dilatáció alakzatokat egyesítő hatása is.
a., eredeti kép, b., a dilatáció eredménye

Ha a dilatáció után kapott képből kivonjuk az eredeti képet, az objektum körvonalát kapjuk, kívülről körberajzolva. Ha az eredeti képből vonjuk ki az erózió eredményét, a belső körvonalat kapjuk a strukturáló elem sugarának megfelelő vastagságban. Egyvonalas körvonalból megkaphatjuk a kerület becslését, ha összegezzük a körvonal, mint objektum pontjainak a számát. Ennél pontosabb mérésre ad lehetőséget az objektum határvonalára fektetett görbe hossza.

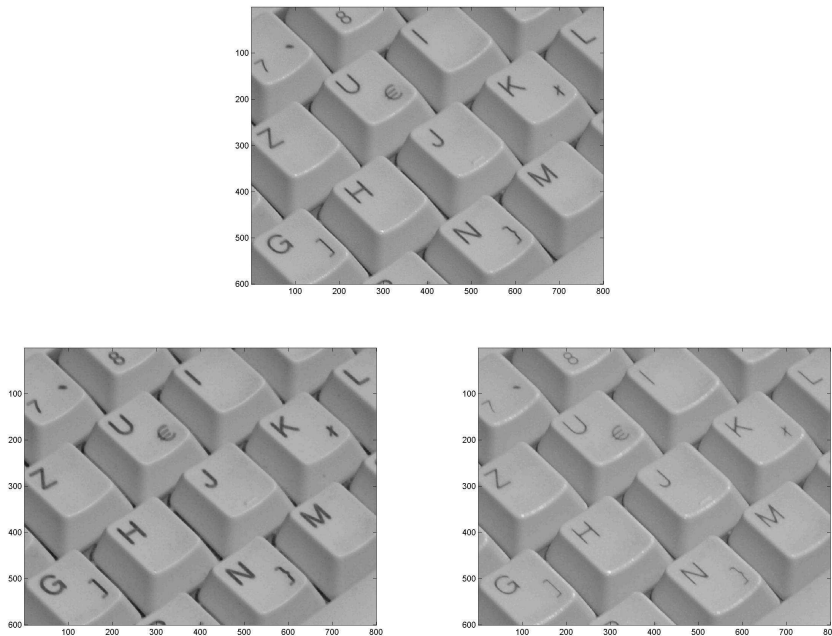


a b

5.7. ábra. Az alakzat (A) külső körvonalát megkaphatjuk a dilatació eredményéből (DA): $[NEM(A)]ÉS(DA)$ logikai művelettel.

a., eredeti kép, b., az objektumok körvonala

A 4.2.3. *alfejezetben* megismerkedhettünk a sorrendi szűréssel. Árnyaltos képekre világos objektumok esetén a dilataciónak a maximum, az erózió-nak a minimum felel meg. Sötét objektumokra a dilataciónak a minimum, az erózió-nak a maximum felel meg.

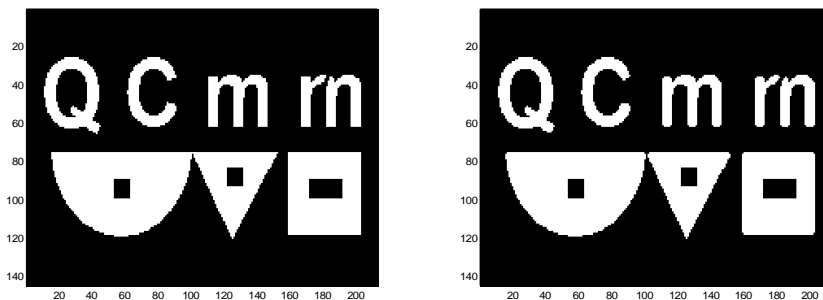


5.8. ábra. Dilatáció és erózió árnyaltos képekre.
a., eredeti kép, b., sorrendi minimum, c., sorrendi maximum

Nyitás

Az erózióval láttuk, hogy a művelet alkalmas a háttérben keletkezett apró objektumok eltüntetésére és az összeolvadt objektumok szétválasztására. Ezzel egyidejűleg csökkenti az objektum eredeti méretét. Ha fontos az eredeti méret (pl.: területet akarunk mérni), dilatációval visszahizlalhatjuk az objektumot. Természetesen a lekerekített sarkaktól és az elfogyasztott alakzatoktól eltekintve.

A *nyitás* ugyanazon strukturáló elemmel végzett erózió, majd az eredményképen végzett dilatáció.



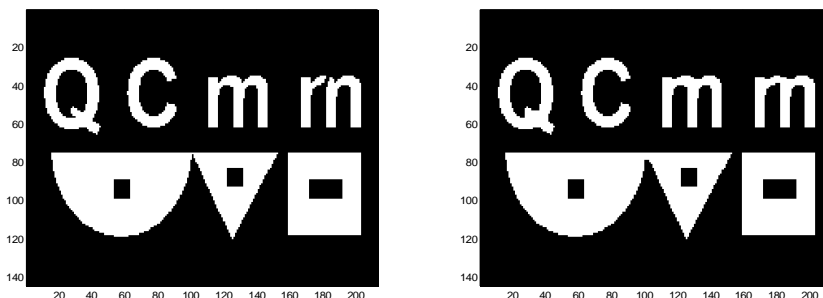
a b

5.9. ábra. A nyitás során az objektumok mérete nem változik.
a., eredeti kép, b., a nyitás eredménye

Zárás

A *zárás* a nyitás ellentéte. Az objektumon keletkezett hibák betöltése, illetve a szétvált alakzatok összeolvasztása után az objektumokat visszafogyasztjuk az eredeti méretre.

A zárás egymásután végzett dilataciót és eróziót jelent, ugyanazzal a strukturáló elemmel. A nyitás, illetve zárás után az objektumhoz tartozó képpontok összegzésével a terület becslését kapjuk.



a b

5.10. ábra. Zárással a szétvált alakzatok összeolvaszthatók.
a., eredeti kép, b., a zárás eredménye

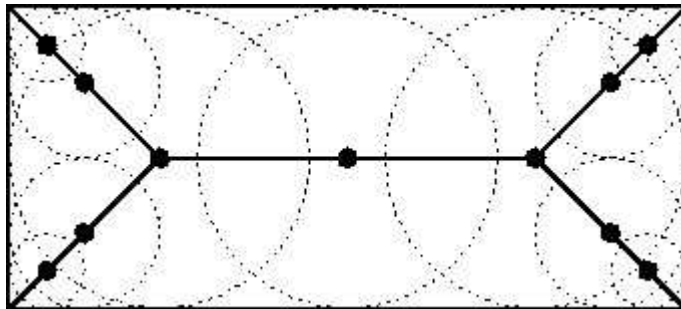
Skeleton

A képfeldolgozás végső célja gyakran az alakzatfelismerés. Megpróbáljuk felismerni az objektumot, amit a háttértől elválasztottunk. Az alakzatot megpróbálhatjuk felismerni a szürke árnyalatos képről, vagy a bináris kép-

ről, de próbálkozhatunk a bináris képből lényegkiemelés után kapott képpel is. A lényegkiemelés egyik módja, hogy az alakzatot drótvázzal reprezentáljuk. Az optikai karakterfelismerésnél pl. egyszerűbbnek tűnik a sok betűtípus egyvonalas drótvázzá egyszerűsített képét felismerni, mint magát a karaktert.

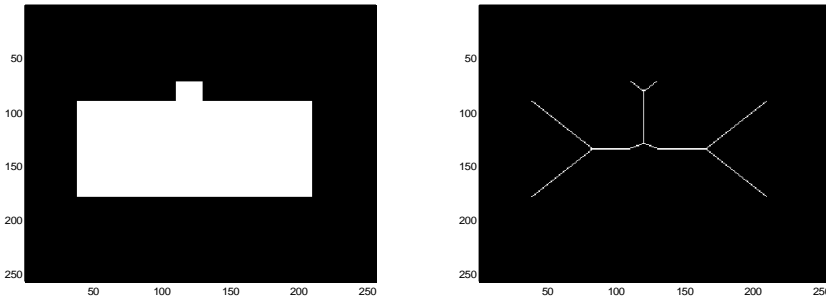
A *skeleton* az objektumot belülről legalább két ponton érintő körök középpontjainak mértani helye. Tulajdonságai:

- vastagsága *egy* pixel,
- átmegy az objektum középpontján,
- hordozza az objektum topológiáját.



5.11. ábra. Egy téglalap skeletonjának meghatározása definíció szerint.

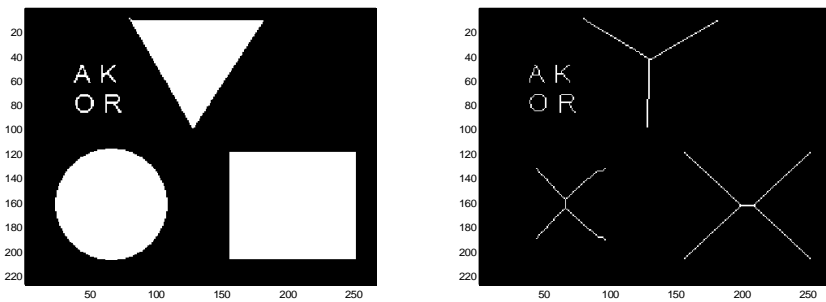
A skeleton meglehetősen érzékeny a kép hibáira. Ha a téglalap területén fellép egy akár csak egypixelnyi hiba is, már egy újabb ágnak kell onnan kiindulni.



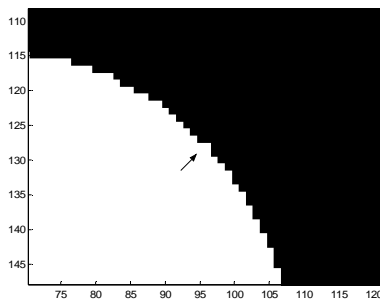
a b

5.12. ábra. A határvonal hibája megváltoztatja a skeletont.
a., alakzat, b., a skeletonja

Nem csak hiba folytán változhat meg a skeleton. A véges képfelbontás is elindíthat hamis ágakat.

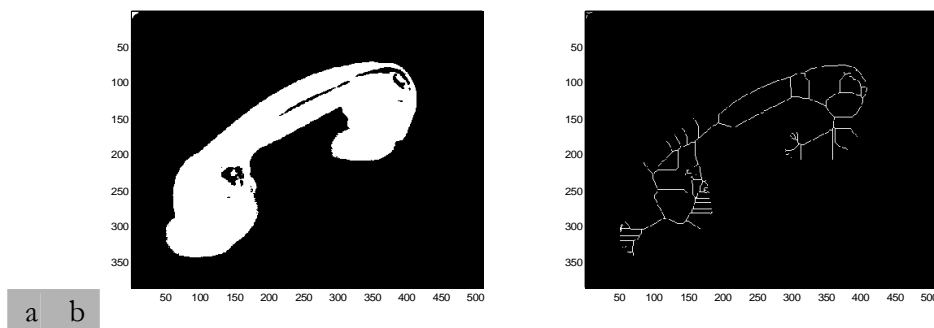


a b
c



5.13. ábra. A kör skeletonja egy pont lenne, de a véges felbontás miatt a nyíllal jelölt helyről is elindul egy ág.
a., eredeti kép, b., a kép skeletonja, c., a hamis ág kiindulópontja

Bonyolultabb alakzatnál nem biztos, hogy a skeleton alapján egyszerűbb a felismerés.



5.14. ábra. Egy telefonkagyló bináris képe (a.) és skeletonja (b.).

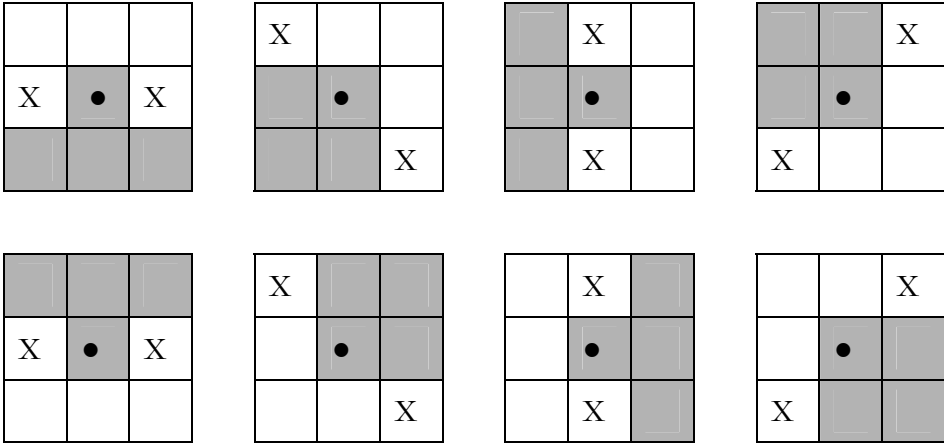
A definíció szerinti skeleton hatalmas számításigénye arra készítette a kutatókat, hogy közelítő megoldásokat dolgozzanak ki. Ez tovább erősíti a skeleton megbízhatatlanságát.

Vékonyítás

A vékonyítás az erózió rokona, csak vigyázni kell, hogy az objektum

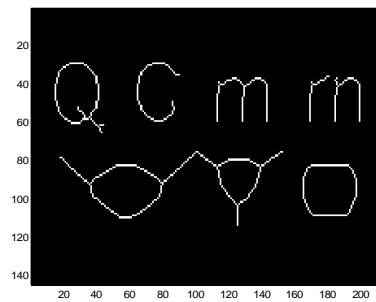
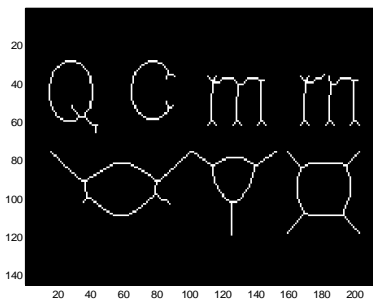
- el ne fogyjon,
- és egybefüggő alakzatok szét ne szakadjanak.

Ehhez meg kell határozni azokat a struktúrákat, amelyek biztosítják e két feltétel teljesülését. Az **5.15. ábra.** összefoglalja a középső (●-tal jelölt) képpont eltávolítását megengedő eseteket. Szürke jelzi az objektumhoz tartozó képpontokat. Az X-szel jelölt képpontok tartozhatnak akár a háttérhez, akár az objektumhoz. A végrehajtás során először az első struktúrával eltávolítható pontokkal csökkentjük az objektumot. Utána a következő struktúrát vesszük sorra, egészen a nyolcadikig. Ezután visszatérünk az elsőhöz, és újabb körben elvégezzük a vékonyítást. Addig ismételjük, amíg egy teljes körben már nem találunk eltávolítható pontot.



5.15. ábra. A vékonyítás során a középső pont eltávolítható az alakzatból.

A vékonyítás gyakran egyszerűbb drótvázhoz vezet, mint a skeleton. Az optikai karakterfelismerésnél pl. nem kapunk Y ágat, ha a karakter vastagabb vonalú.

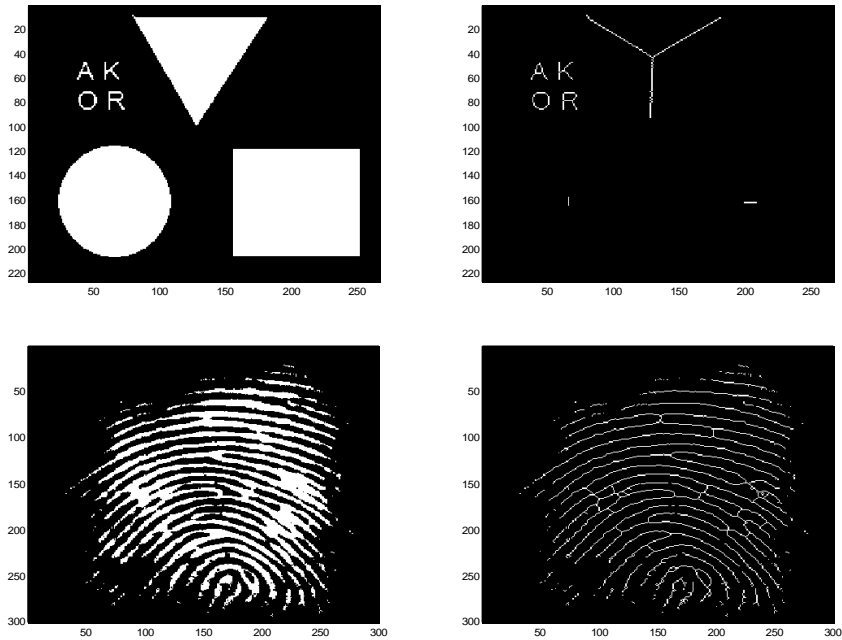


a
·
b c

5.16. ábra. A vastagabb karakterek skeletonja Y-ban végződik, a vékonyítás eredménye egyszerű vonalvég.

a., eredeti kép, b., a kép skeletonja, c., a vékonyítás eredménye

Az egyszerűsítés nem feltétlenül szolgálja az alakzatfelismerést. Pl.: Az ellipszis és a téglalap a vékonyítás után egyaránt egy pálcikát eredményez, a kör és a négyzet egy pontot.



a	b
c	d

5.17. ábra. Alakzatok vékonyított képe.
a., c., eredeti kép, b., d., vékonyítás eredménye

6. Alakzatifelismerés

Az alakzatok felismerése két fázisra osztható:

- lényegkiemelés,
- döntés.

A lényegkiemelés egyik feladata olyan jellemzők megragadása, amelyek a különböző alakzatok elkülönítésére alkalmas. A lényegkiemelésnek kell gondoskodni az adatmennyiség csökkentéséről is, a képet leíró hatalmas mennyiségű adatot kezelhető számú jellemzővé konvertálja.

Az alakzatokat különböző jellemzők alapján osztályozhatjuk. Néhány példa:

- kerület,
- terület,
- alaktényező (terület/kerület négyzet, független a nagyítástól),
- a legnagyobb és legkisebb átmérő, illetve ezek aránya
- topológiai jellemzők (pl. a skeleon vagy vékonyítás után kapott drótvázat leíró jellemzők, ágak villák stb.),
- képmomentumok

A morfológiai műveleteknél már említést tettünk a kerület vagy terület becslésére alkalmas módszerekről. A kép felbontásánál pontosabb mérést mintaillesztéssel végezhetünk. A skeleon és a vékonyítás is alkalmas a lényegkiemelésre. Ezek kiegészítéseképpen a képmomentumokkal ismerkedünk meg.

A képmomentumokat – számítási egyszerűségük miatt – az elsők között alkalmazták objektumok formájának leírására. Az elmúlt négy évtized során sok képfeldolgozási feladatban bizonyították alkalmazhatóságukat. A digitális képekből származtatható jellemzők a képen szereplő objektumok alakjáról nyújtanak hasznos információt. Előnyeik kiaknázhatók az alakzat felismerési feladatokban, hiszen olyan mennyiségek származtathatók belőlük, amelyek invariánsak az eltolásra, nagyításra és forgatásra.

A $(p+q)$ -ad rendű geometriai momentumok definíciója:

$$m_{pq} = \iint_{\zeta} x^p y^q f(x, y) dx dy, \quad p, q=0,1,2,3\dots$$

ahol ζ az objektum helye az x - y síkban, amelyet a kép $f(x,y)$ világosságfüggvénye jellemez.

A különböző rendű geometriai momentumok a kép világosság eloszlását jellemzik a síkban. A képmomentumok rendszere ilyenformán alkalmas az objektumok alakjának leírására.

Néhány geometriai momentumnak fizikai jelentés is tulajdonítható:

Definíció szerint a nulladrendű momentum (m_{00}) a kép összintenzitását reprezentálja. Az elsőrendű momentumok (m_{01} , m_{10}) az intenzitás momentumokat jelentik az x , illetve az y tengely körül. A kép világosságának súlypontja (x_0, y_0) az elsőrendű momentumok normálásával kapható meg.

$$x_0 = m_{10}/m_{00}; \quad y_0 = m_{01}/m_{00}$$

Az origónak a súlypontba tolásával egyszerűen számíthatók olyan momentumok, amelyek nem függenek az objektum helyétől. Ennek folytán jutunk az eltolásra érzéketlen centrális momentumok meghatározásához:

$$\mu_{pq} = \iint_{\zeta} (x - x_0)^p (y - y_0)^q f(x, y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, 3, \dots$$

A másodrendű centrális momentumok különösen fontosak. A kép világosság függvényének átlag körüli szórásnégyzetét μ_{20} és μ_{02} képviseli, μ_{11} a kovarianciát adja.

A másodrendű centrális momentumok úgy is tekinthetők, mint a kép tehetetlenségi nyomatékai a koordinátarendszer tengelyeivel párhuzamos, a súlyponton átmenő referencia tengelyekre nézve. A kép fő tehetetlenségi tengelyei úgy definiálhatók, mint a súlyponton átmenő két merőleges egyenes, amelyet referencia rendszerként használva μ_{11} eltűnik. A kép így kapott I_1 , I_2 fő tehetetlenségi nyomatékai a referencia tengelyek körül az alábbi összefüggésekkel határozhatók meg:

$$I_1 = \frac{(\mu_{20} + \mu_{02}) + [(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2]^{1/2}}{2},$$

$$I_2 = \frac{(\mu_{20} + \mu_{02}) - [(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2]^{1/2}}{2}.$$

Ezek a kifejezések felhasználhatók egy olyan ellipszis meghatározására, amelynek a tehetetlenségi nyomatékai megegyeznek az eredeti kép momentumaival. Az a és b mennyiségek meghatározzák az ellipszis fél nagy- és kistengelyét:

$$a = 2 (I_1/\mu_{00})^{1/2}; \quad b = 2 (I_2/\mu_{00})^{1/2}$$

Az egyik fő tehetetlenségi nyomaték tengely x tengellyel bezárt Θ szöge:

$$\Theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right)$$

A kép ellipszis rendelkezik még egy további tulajdonsággal is: egyenletes a világossága, értéke k az ellipszisen belül, nulla azon kívül. Ezzel, és a nulladrendű momentummal definiálható a k intenzitás faktor

$$k = \mu_{00} / (\pi ab)$$

Az $s = (I_1 + I_2) / m_{00}$ értéket gyakran az objektum szétterültségének, az $e = (I_2 - I_1) / (I_2 + I_1)$ mennyiséget az alakzat elnyúltságának nevezik.

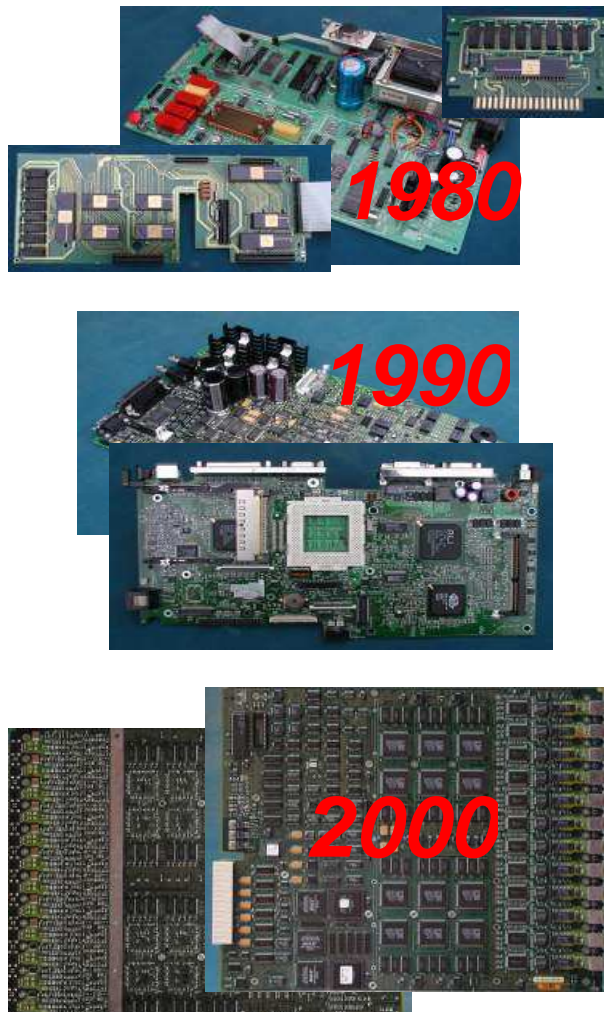


6.1. ábra. Alakzatok képellipszise. A belső ellipszis a külső ellipszis által befoglalt terület invertálásával keletkezett kép ellipszis modellje.

A lényegkiemelés után elvégzett döntési feladat nem lehet tárgya ennek a bevezető kurzusnak. Csak utalunk a klaszterezésre, a neurális hálózatok, illetve a rejtett Markov modell alkalmazására. Utóbbiak a gépi intelligencia témakörébe tartoznak.

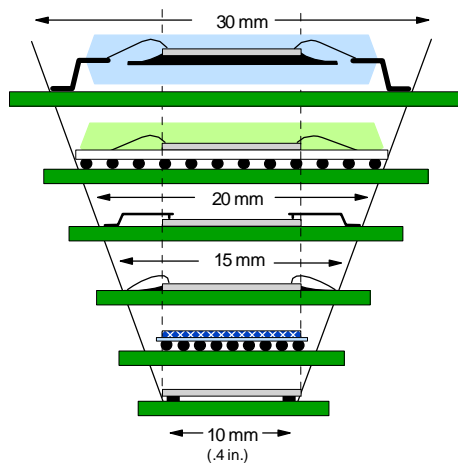
7. Optikai ellenőrzés az elektronikai gyártásban

Az áramkörök bonyolultságának növekedése, valamint az alkatrészek méretének csökkenése az alkatrészsűrűség növekedéséhez vezetett. Emellett a termelés tömegszerűvé válásával felgyorsult gyártás egyre nehezebbé tette a termékek emberi erővel történő vizuális ellenőrzését.



7.1. ábra. Az alkatrészsűrűség növekedése az utóbbi évtizedekben. [Agilent]

Jól jellemzi a fejlődést az alkatrészek méretének csökkenése. A félvezető eszközök méretét elsősorban a csatlakozások száma határozza meg, mivel a félvezető lapka felülete legfeljebb cm^2 nagyságrendű. A tokozás fejlődése a kivezetések méretét és távolságát egyre csökkentette.



7.2. ábra. Az integrált áramkörök méretének csökkenése a tokozás fejlődésével. [Agilent]

Megoldást kellett találni az ellenőrzésre, mert a vizuális ellenőrzési lépés kihagyása a termelésben a termelékenység jelentős romlását eredményezheti. Az optikai ellenőrzés egyidős a számítógépekkel, azonban a gyakorlatban történő elterjedésüknek kezdetben gátat szabott a képalkotó eszközök kis felbontása, valamint az ilyen vizsgálatok jelentős memória-, háttértár- és számításigénye. Mára a számítástechnikai eszközök hatalmas fejlődésen mentek keresztül, és ezzel a képfelvevő eszközök felbontása is lépést tartott.

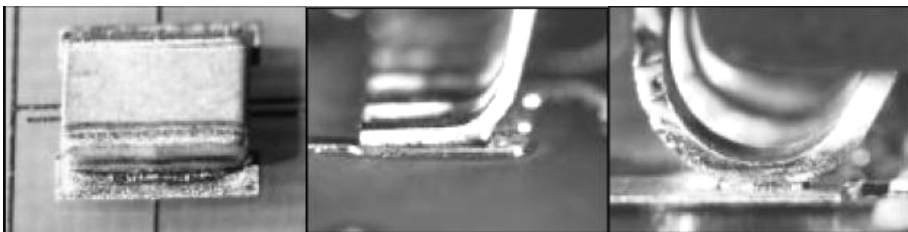
Az automatizált optikai ellenőrzés motiváló tényezői:

- növekvő alkatrész sűrűség
- csökkenő alkatrész méret
- nem lehet hozzáférni az elektronikus ellenőrzéshez szükséges kivezetésekhez
- az emberi vizuális ellenőrzés nem elég gyors és megbízható
- a hibák elemzése és visszacsatolás a gyártási folyamatba

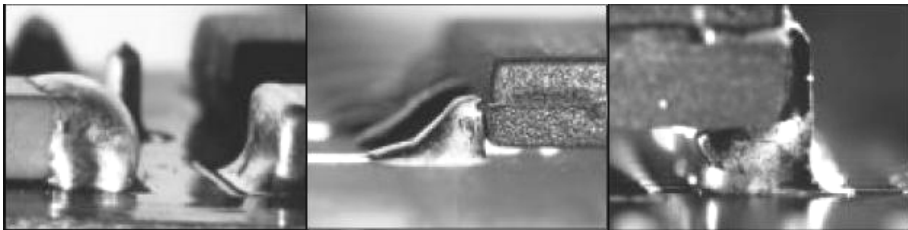
Az automatizált optikai ellenőrzéssel felderíthető tipikus hibák:

- alkatrészek megléte – hiánya
- alkatrészek pozíciója
- alkatrészek polaritása
- kivezetések csatlakozásának ellenőrzése
- forrasztanyag eloszlása
- rövidzár ellenőrzés
- az alkatrészek címkéjének azonosítása

A gyártás során előforduló néhány tipikus hiba: [Molnár]



Elégtelen forrasztás



Forrasztanyag többlet



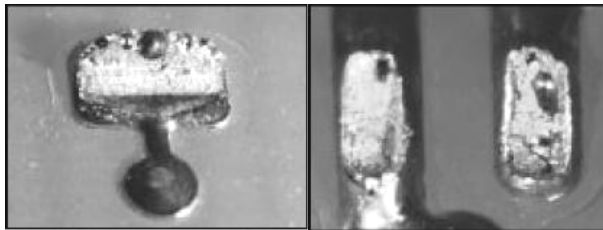
Felkavart vagy kásás forrasztás



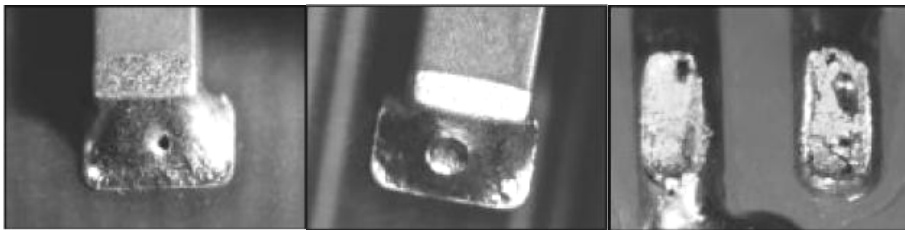
Törés a forrasztáson



Sír, félhíd



Légzárványok



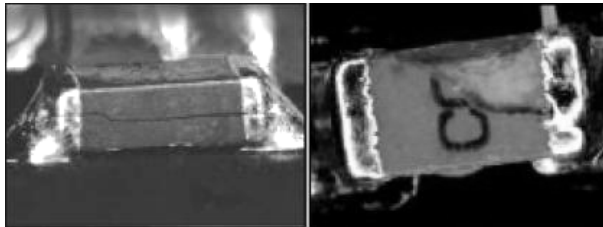
Tűhegynyi lyuk, buborék a forrasztáson



Zárlat



Forraszanyag golyók, kis labdák a panelen

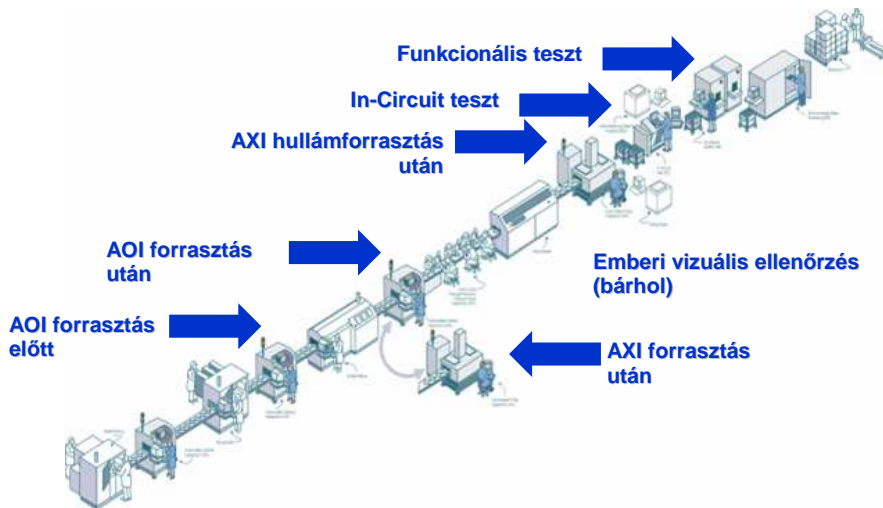


Alkatrész törés, szétrobbanás



Lábelhajlás, megemelkedett láb

Az optikai ellenőrző berendezések elhelyezése a gyártósoron az egyes eszközök képességeitől, az általuk feltárt hibák típusától függ, a gazdaságossági szempontok gondos mérlegelésével.



7.3. ábra. Ellenőrzési lépések a gyártás során. [Agilent]

Az optikai és röntgensugaras ellenőrzést a gyártás különböző fázisaiban célszerű alkalmazni. Tipikus ellenőrző pontokat mutat a **7.3. ábra**.

Az AOI teszterek egyik alkalmazási helye a beültetés után, de a forrasztás előtti vizsgálat. Itt a javítás még olcsón, nagyobb veszteség nélkül végezhető el, de már az alkatrészek is ellenőrizhetők. Ebben az elhelyezésben ki lehet mutatni az alkatrészek:

- hiányát
- elfordulását
- elcsúszást
- polaritást hibáját
- elemelkedését
- elhajlott kivezetését

Forrasztás után a forrasztás alatt megjelenő hibákat tudjuk ellenőrizni, vagy ha nem alkalmaztunk forrasztás előtti ellenőrzést, akkor a beültetési hibák felderítésére is itt kerülhet sor. Ennek az elhelyezésnek az a hátránya, hogy már létrejön a fémes kontaktus az alkatrész és a hordozó között, így az itt felderített hibák korrigálása, javítása már költségesebb. A folyamatokemencében keletkező, elsősorban forrasztási hibák nagy része visszavezethető a már fentebb említett elégtelen vagy esetleg hiányos for-

rasztó-pasztá felvitelre, valamint az alkalmazott hőprofil helytelen megválasztására. Forrasztás után a beültetés utáni hibákon túl ki lehet szűrni:

- zárlatot
- sirkó , félhíd hibákat

A tipikusan a végső fázisban, a hullámforrasztás után végzett röntgensugaras ellenőrzés erősségei:

- rejtett *zárlatok* felderítése,
- *buborék* láthatóvá tétele a forrasztanyagban,
- *idegen test* észlelése (egy alkatrész alá szorult másik alkatrész, vagy szennyeződés)
- átmenő lábak furatai *forrasztanyag kiegészítésének* mérése.

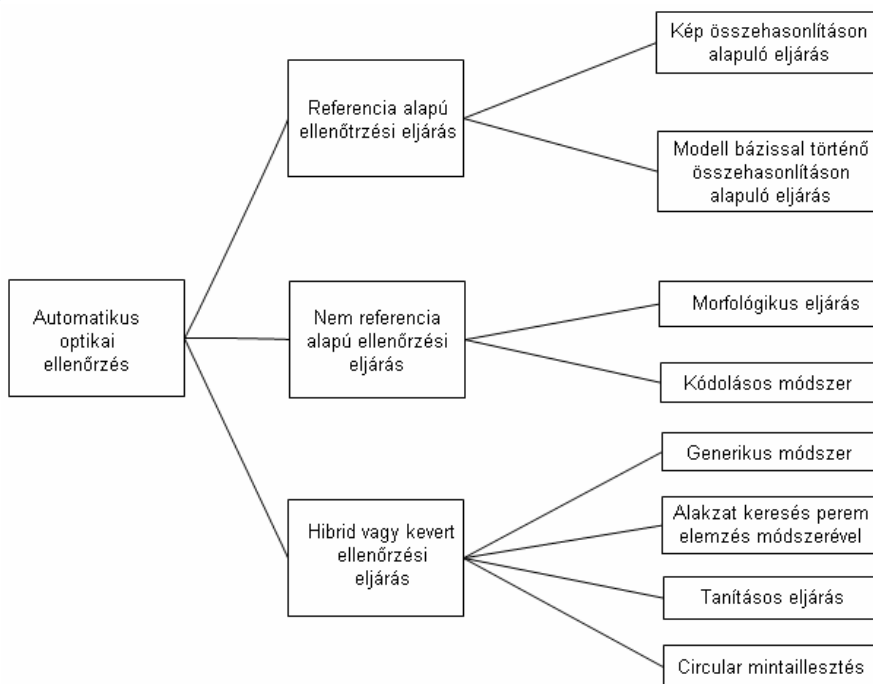
A röntgensugaras ellenőrzés kevésbé hatékony

- a *jelzések, feliratok* olvasásában,
- az alkatrészek *helyzetének* és
- *polaritásának* ellenőrzésében.

Még hangsúlyosabb szerep jut a tesztelő berendezéseknek a környezetvédelmi szempontok miatt terjedő ólommentes forrasztás bevezetésével.

- Az ólommentes forrasztanyagok elsősorban a rosszabb nedvesítő képességük miatt kevésbé megbízható kontaktust hoznak létre.
- A magasabb olvadáspont miatt az alkatrészek nagyobb hőterhelésnek vannak kitéve, ami repedéshez, olvadáshoz, szétrobbanáshoz vezethet.

Az optikai ellenőrző berendezések az idők folyamán jelentős változásokon mentek át, mind szerkezeti felépítésük, mind képfeldolgozó eljárásaik tekintetében. Az ellenőrző algoritmusok csoportosítása az *5.4.ábrán* látható.



7.4. ábra. Az AOI berendezések osztályozása. [Molnár]

A referencia alapú eljárásokhoz, szükséges egy referencia kép, amelyet a „golden board”-ról készítenek vagy a PCB tervezésekor kapott CAD ábrából kapnak. Az ellenőrizendő panelről képeket készít a teszter, majd összehasonlítja a referenciaképpel. Ez az eljárás elsősorban hiányzó alkatrészek, hiányos forrasztások és zárlatok keresésére alkalmas. A módszer hátránya, hogy túlságosan érzékeny a képfelvétel körülményeire. A nem referencia alapú eljárásoknál nincs szükség referenciaképre vagy sablonra az ellenőrzéshez. Ezeket az eljárásokat hívják még tervezési szabály alapú ellenőrzési módszereknek is. Az ellenőrzött képen az alkatzatokat, a tervezési specifikációban megfogalmazott standardokkal ellenőrzik. A nem referencia alapú eljárások kiküszöbölik a referencia alapú eljárások hátrányait, de kihagyhatnak hibákat, ha azok nem szegik meg a tervezési szabályokat. A hibrid vagy kevert ellenőrzési módszerek magukba foglalják a referencia és nem referencia alapú eljárásokat is. Egyesítik a két módszer előnyeit, de bonyolultabbak, összetettebbek.

8. Képtömörítés

A digitális képek átvitele és tárolása óriási bitsebességet igényel, ezért különösen fontos hatékony tömörítő algoritmusok szabványosítása. (A kezdetektől számítva a távközlés és a képfeldolgozás hihetetlen mértékű fejlődésen ment át. Pl. az 1920-as évek elején nagy előrelépésnek számított, hogy a London-New York tengeralatti kábelben egy kép továbbítási idejét sikerült három óra alá szorítani a korábbi több mint egy héttel szemben. A képdigitalizáló akkor öt világosságszintet volt képes megkülönböztetni, ezt 1929-re sikerült 15 szintre növelni.)

A képtömörítő eljárások alapvetően kétfélék lehetnek: *veszteségmentesek* vagy *veszteségesek*. Archiválásra rendszerint veszteségmentes algoritmust célszerű választani, mert a későbbi feldolgozás igényelheti a részletgazdagságot. Az általánosan használatos fájl-tömörítők tipikus veszteségmentes tömörítők.

A képtömörítés alapja a redundancia, amely lehet

- *képi* (a közeli képpontok világossága hasonló, ez alapján azonosítjuk az összetartozó képpontokat objektumként)
- *kódolási* (a képi jellegzetességek alapján választhatunk tömör kódolást)
- *pszichovizuális* (látásunk „tökéletlenségét” használja ki)

A képi és kódolási redundancia rendszerint összefügg. Dokumentumok továbbításakor gyakran elegendő két világosságszintet megkülönböztetni: a papír és a tinta bináris kóddal elkülöníthető. Ilyen képeknél a pontok bittérképes ábrázolása helyett célszerűbb futamhossz kódolást végezni, amely az azonos bitek számát továbbítja. A telefax készülékek ezt kétdimenziós módon kezelik, kihasználják, hogy a letapogatás alatt álló pontsor nem független az előzőtől. Mesterséges alakzatok, grafikák foltjai többnyire azonos színűek (egy tónusos képen a homogénnek látszó foltok pontjainak színe nem pontosan egyezik meg), sokkal tömörebb a körvonal és a kitöltő szín megadása, mint a folt bittérképes ábrázolása.

A pszichovizuális redundancia kihasználása veszteséges tömörítéshez vezet. A színekre kevésbé vagyunk érzékenyek, mint a világosságra, ezért 2 vagy 4 szomszédos képpont színét gyakran átlagolják, ezzel a színösszetevők pontjainak száma fele-negyede a világosságot ábrázoló pontokénak. A színrendszerek megfelelő megválasztásával javíthatjuk a tömörítést.

Műveleteinket gyakran nem a képsíkban, hanem transzformált tartományban végezzük. Mint az 1. fejezetben láttuk, látásunk fontos tulajdonsága a síkfrekvenciás érzékenység, amely a nagyobb síkfrekvenciáknál romlik. A kétdimenziós Fourier transzformáció bázisfüggvényei különböző síkfrekvenciájú síkhullámok. A koszinusz transzformáció (CT) a Fourier transzformációból származtatható. Alapja, hogy páros függvények Fourier transzformáltja csak koszinuszos összetevőket tartalmaz. Ennek elérésére a jelet tükrözzük a $t=0$ tengelyre, így a jel és tükörképe együtt páros függvényt alkot. Diszkrét idejű változata a diszkrét koszinusz transzformáció (DCT). A kétdimenziós DCT a képfeldolgozás fontos eszköze.

A diszkrét koszinusz transzformáció alapegyenlete:

$$G(m, n) = \alpha(m) \cdot \alpha(n) \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} g(k, l) \cos\left(\frac{2k+1}{2M} m\pi\right) \cos\left(\frac{2l+1}{2N} n\pi\right).$$

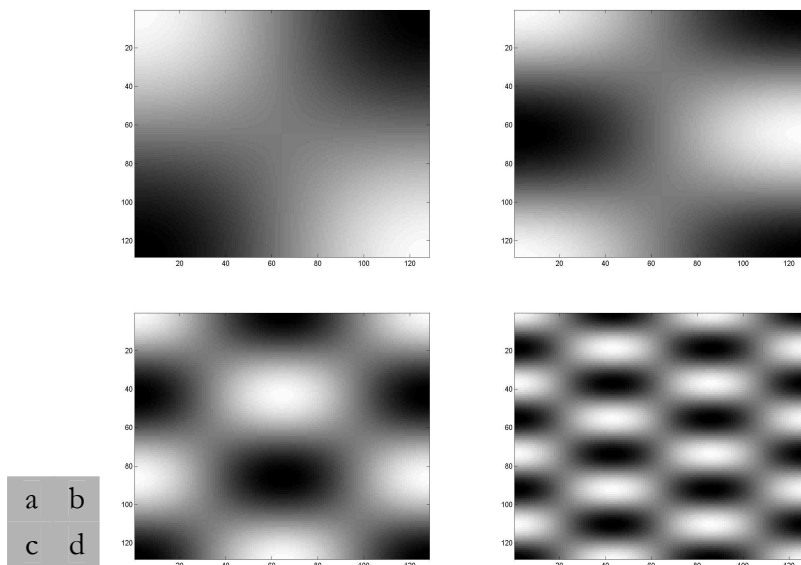
Az inverz diszkrét koszinusz transzformáció (IDCT):

$$g(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha(m) \cdot \alpha(n) G(k, l) \cos\left(\frac{2k+1}{2M} m\pi\right) \cos\left(\frac{2l+1}{2N} n\pi\right),$$

$$\text{ahol } \alpha(m) = \frac{1}{\sqrt{M}}, \text{ ha } m=0, \alpha(m) = \sqrt{\frac{2}{M}}, \text{ ha } m>0, \text{ és}$$

$$\alpha(n) = \frac{1}{\sqrt{N}}, \text{ ha } n=0, \alpha(n) = \sqrt{\frac{2}{N}}, \text{ ha } n>0.$$

A DCT bázisfüggvények vízszintesen és függőlegesen az indexüknek megfelelő félperiódust tartalmaznak (a diszkrét Fourier transzformáció indexei ennyi periódust jelentettek). A k -edik sor l -edik oszlopában az első sorban és oszlopban található koszinuszok szorzata helyezkedik el.



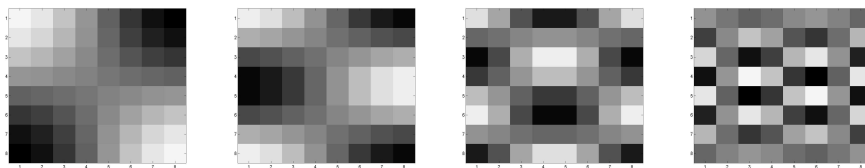
8.1. ábra. Kétdimenziós diszkrét koszinusz transzformáció néhány bázisfüggvénye. a., $k=1, l=1$, b., $k=2, l=1$, c., $k=3, l=2$, d., $k=7, l=3$.

A számítógépes képfeldolgozás fejlődése során sokféle képtömörítési eljárás alakult ki, amelyek változó hatékonysággal és egymással nem kompatibilis módon ábrázolták a képeket. Az 1980-as években felmerült az igény egy hatékony, szabványos képtömörítési eljárás kidolgozására. 1986-ban alakult meg a JPEG (Joint Photographic Experts Group), amely az évtized végére kidolgozta a tónusos képek tömörítésére szolgáló ajánlását, amely fél évtized múltán nemzetközi szabvánnyá vált.

A JPEG eljárással tömörített színes képet $1,5-2$ bit/pixel tömörség mellett az eredetitől nem lehet megkülönböztetni, $0,5-1$ bit/pixelen jó minőségű képet ábrázolhatunk. A kép színösszetevőit $8-8$ biten kódolva képpontonként 24 bit a tömörítetlen képméret.

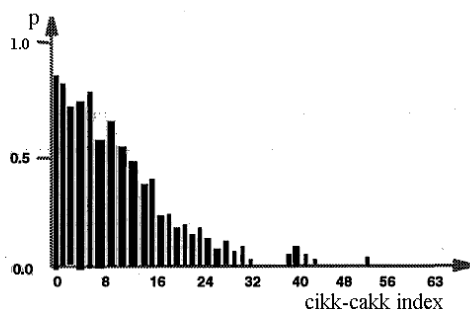
A JPEG eljárás 8×8 pontos részképekkel dolgozik, ezeket lényegében függetlenül kódolja. Az egyetlen összefüggés, hogy az átlagos világosság-szintet differenciálisan, az előző képrészlethez viszonyítva adja meg. A részképek világosság-szintjeit szinteltolással szimmetrikussá teszi, majd előállítja a 8×8 pont diszkrét koszinusz transzformáltját.

A diszkrét koszinusz transzformáció bázisfüggvényei 8×8 képpont méretben a 8.1. ábrán látottakhoz képest igen ritkán mintavételezettek, vízszintesen és függőlegesen is mindössze nyolc mintát tartalmaznak.



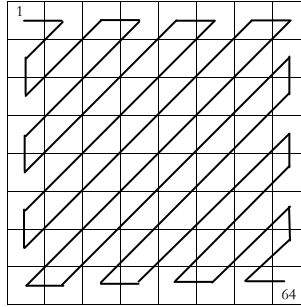
8.2. ábra. Az előbbi bázisfüggvények 8×8 méretben.
A magasabb indexű alakzatok nem ismerhetők fel.

Ezek után a transzformált mátrix kvantálása következik: minden értéket eloszt egy előre megadott kvantálási mátrix megfelelő értékével és a hányadost egészre kerekíti. Ez az algoritmus egyetlen irreverzibilis, veszteséges művelete. A kvantálási mátrixszal tudjuk befolyásolni a tömörítés mértékét. Nagyobb osztókkal tömörebb, de gyengébb minőségű képet kapunk. Az eredménymátrix indexei határozzák meg azt az Euklideszi távolságot, amely arányos a síkfrekvenciákkal. Az origótól $(0,0)$ távolodva két okból is kis értékek adódnak: A részképek többsége nem tartalmaz éleket, ezért a *DCT* eredménye eleve kicsi, a nagyobb síkfrekvenciák felé a kvantálási mátrix osztói nagyobbak, tovább csökkentve a hányadost. Ezek a nagyobb síkfrekvenciákon igen gyakran nullát eredményeznek.



8.3. ábra. Annak valószínűsége, hogy a *DCT* eredménye a kerekítés után nem nulla

Az így kapott 8×8 -as mátrixot 64 dimenziós vektorra alakítjuk *cikk-cakk* (zig-zag) sorrendbe rendezve a mátrix elemeit. A vektor kódolása entrópia kódolással (*Huffman kód*) történik, kihasználva, hogy a vektor utolsó elemei gyakran nullák, ezek elhagyhatók.



8.4. ábra. A cikk-cakk sorrend

Színes képek tömörítése három képsík ábrázolását igényli. Rendszerint az YCbCr színtérben történik a kódolás. Mivel a krominanciára kevésbé vagyunk érzékenyek, lehetőség van 2 vagy 4 pont színjellemzőjének összevonására a **(8.7. ábra.** Világosság és összevont szín leírók látható módon. A *krominancia* összetevőre vonatkozó kvantálási mátrix is különbözik a világosság kerekítési szabályait leíró mátrixtól.



8.5. ábra. A bittérképes üzemmódban több mint 196K méretű (256*256*3), közismert *LENA* kép

a., 20K méretű *JPG* formátumban (0,3 bit/pixel),
b., 11,5 K terjedelmű *JPG* kép (1 ³/₄ bit/pixel)



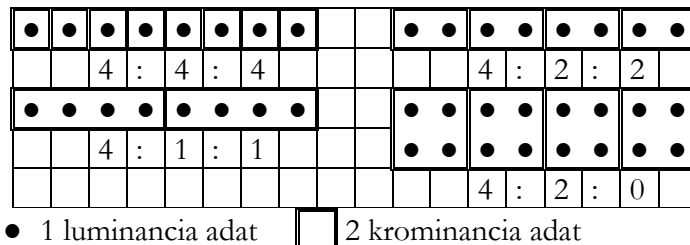
8.6. ábra. A minőség változása a., c., 8K méretű ($0,12 \text{ bit/pixel}$) és b., d., 3,5 K méretű ($0,05 \text{ bit/pixel}$) képen. $1/2$ (c.,) és $1/3$ (d.,) méretben a hibák alig látszanak. Indexképként használható a túltömörített változat is.

Mozgóképek tömörítésekor újabb redundancia kihasználására nyílik mód. Az egymást követő képkockák nem függetlenek egymástól, ezt jelzi az időbeli redundancia. Tipikus képsor, hogy a háttér előtt alakok mozognak. Az előző kép részleteinek – többnyire eltolt – másolásával közelíthetők a következő képkockák.

A mozgóképek tömörítésének legelterjedtebb, hatékony, szabványos eljárásait tartalmazza az MPEG család. Pontosabban az MPEG szabványok elsősorban nem a kódolást szabályozzák, hanem a visszaalakítást: az MPEG fájlok szerkezetét és a fájlból a képsor előállítás szabályait.

A színrendszer célszerű megválasztásával lehetőség van a színeket leíró mátrixoknál a világosság és a színinformáció szétválasztására. Ha egy képpont színét három bájtban adjuk meg, célszerű egy bájtot a világosság – *luminancia* –, két bájtot a szín – *krominancia* – információ leírására használni (4:4:4, 8 bites felbontás esetén 24 bit/pixel). Mivel a színekre kevésbé va-

gyünk érzékenyek mint a világosságra, kettő ($4:2:2$, 16 bit/pixel) vagy négy ($4:1:1$, $4:2:0$, 12 bit/pixel) szomszédos pont színét átlagolhatjuk.



8.7. ábra. Világosság és összevont szín leírók

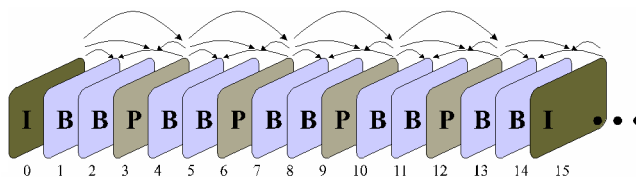
Az MPEG (Moving Picture Experts Group) szakértői csoport 1988-ban kezdte meg munkáját, hogy tömörítési és visszaalakítási eljárásokat dolgozzon ki mozgóképek, hang és ezek együttesének feldolgozására. A szabványok családja az alábbi tagokból áll:

- MPEG-1 szabvány VHS minőségű mozgókép és hang tömörítésére elsősorban CD-n, kb. 1,5 Mbit/s sebességig (1992)
- MPEG-2 stúdió minőségű tömörítési szabvány a digitális televíziózás számára, 100 Mbit/s sebességig (1994)
- MPEG-4 tömörítés multimédia alkalmazások céljára a legtömörebbtől a legjobb minőségig különböző sáv szélességű telekommunikációs hálózatokon (1. változat 1998, 2. változat 1999. A további verziók kidolgozás alatt állnak.)
- MPEG-7 tartalom leírási szabvány multimédiás információ keresésére, szűrésére és feldolgozására (kidolgozás alatt)

MPEG-21 multimédia keretszabvány (tervezett)

Az MPEG-1 videó tömörítési eljárás a képkockák közötti redundanciát igyekszik kihasználni. A képsor I (*intra*) kerettel kezdődik, amely minden más képkockától függetlenül kódol egy képet. Az I keret a JPEG eljárás-hoz hasonlóan kódolja a képet. Ez a legkevésbé tömör, de a legjobb minőségű keret. A további keretek mozgásbecslésen alapuló *mozgáskompenzációra* épülnek. A mozgásbecslés 16×16 pontos képrészletek mozgását vizsgálja, ezek eltolásával közelíti a képet és csak a különbségképet kell kódolni. A P (*predicted, előrebecsült*) keret az előző I vagy P keret alapján állítja elő a következő – vagy későbbi - képkockát. A P keretek az I keretekenél tömörebbek. Az I és P keretek között helyezkedhetnek el a B (*bidirectional*,

kétirányú) keretek, amelyek a megelőző és a következő I vagy P képekből kétirányú becsléssel állítják elő a közbenső képet. Azért fontos a következő képek használata a kétirányú becsléshez, mert a takarásból előtűnő vagy oldalról beúszó képrészleteket az előző képekből nem lehet mozgáskompenzálással megbecsülni. A B keretek a legtömörebbek.

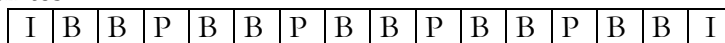


8.8. ábra. A különböző típusú képkockák viszonya

A háromféle képkocka váltogatási szabályát a kívánt minőség szerint választhatjuk meg, egy műsoron belül is többször módosítva. Kevesebb B keret jobb minőséget, de kevésbé tömör kódot eredményez. Legalább 15 képkockánként be kell iktatni egy I keretet a halmozódó hibák elkerülése végett. A tömörítési arány képfüggő, nyilván sokkal jobban tömöríthető egy hírolvasó bemondó felvétele mint egy akciójelenet. Kétféle kódolási stratégia közül választhatunk: A műsorszóró rendszerek állandó sebességű, a hordozóeszközön (pl. *DVD*) tárolt anyagok állandó minőségű tömörítést igényelnek.

A képkockák továbbításának sorrendje nem egyezik meg a lejátszás sorrendjével. A B keretek előállításához szükség van a következő I vagy P keretre is, tehát azokat előtte kell átvinni.

Megjelenítés:



Továbbítás:



8.9. ábra. A különböző típusú képkockák átviteli sorrendje

Az *MPEG-2* eljárás kidolgozásakor a stúdió minőség elérése volt a cél. A finomított szabvány lehetővé teszi az *MPEG-1*-hez képest a felbontás javítását, képek helyett félképekkel is dolgozhat (interlaced), kisebb méretű blokkokkal is végezhető a mozgáskompenzálás.

A képtömörítésnél alkalmazott mozgásbecslés az elmozdulás vektor meghatározását szolgálja, kijelölve azt a képrészletet, amely az előző képkockán a legjobban hasonlít a vizsgált képrészlethez.

A hasonlósági mértékek rendszerint távolság függvényeken, illetve a keresztkorrelációs függvényen alapulnak.

Az abszolútérték hiba:

$$M_k(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |R_k(m, n) - X(m + i, n + j)|$$

A négyzetes hiba:

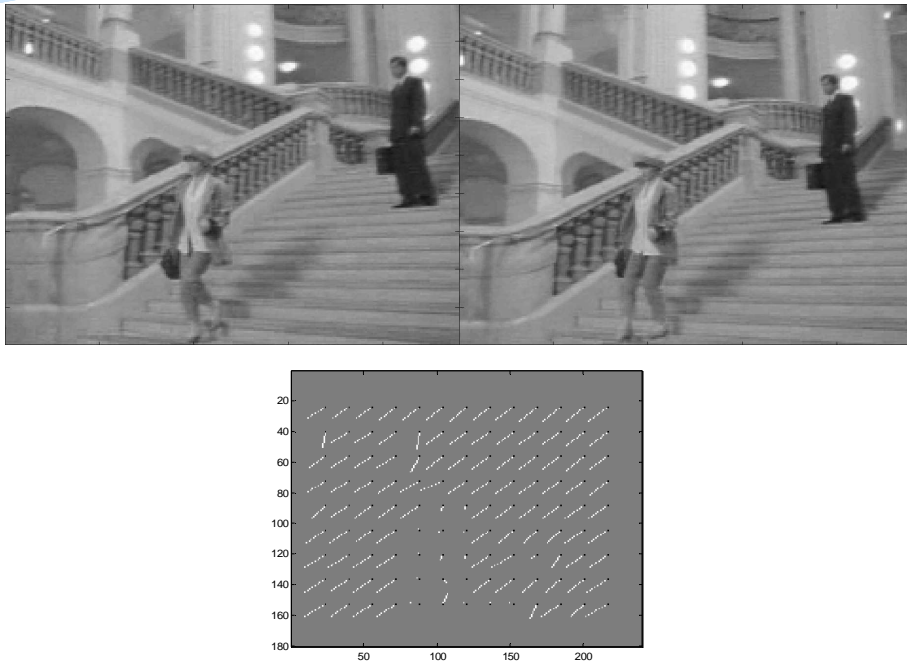
$$M_k(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [R_k(m, n) - X(m + i, n + j)]^2$$

Ahol $M_k(i, j)$ a k -edik referencia elemhez tartozó hasonlósági mérték (i, j) eltolás esetén. Ennek minimuma lesz a k -edik referencia elemhez tartozó hasonlóság $-15 < i < 15$, $-15 < j < 15$ pixel. M, N a vizsgált ablak mérete: $M=16$, $N=16$ pixel. R_k a k -edik referencia kép, X a vizsgált kép világosság mátrixa.

A keresztkorrelációs függvényen alapuló hasonlóság:

$$M_k(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N R_k(m, n) X(m + i, n + j)}{\left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N R_k^2(m, n) \right]^{1/2} \left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X_k^2(m + i, n + j) \right]^{1/2}}$$

A jelölések megfelelnek az előbbi hasonlóság függvényeknél alkalmazottaknak, az eltérés csupán annyi, hogy a keresztkorrelációs függvény esetében a maximumot keressük, ez jelenti a leginkább hasonló alakzatot. A maximumhoz tartozó i és j index adja a legnagyobb hasonlósághoz tartozó mozgásvektort.



8.10. ábra. Egymást követő képkockák és a hozzájuk tartozó mozgásvektorok

Az MPEG-4 szabvány különböző változatai grafikus objektumok leírását teszik lehetővé, az objektumok határvonala tetszőleges lehet. A legfontosabb objektumok:

- arc és test animáció
- 2 dimenziós felületek
- 3 dimenziós testek

A videó- és hangtömörítés eszközei és eljárásai folyamatosan fejlődnek. A feldolgozó eszközök növekvő sebessége egyre nagyobb számításigényű, még hatékonyabb algoritmusok bevezetését teszi lehetővé. A jelenlegi eszközökkel tömörített anyagok óriási értéket képviselnek, az újabb eljárások kidolgozásánál figyelemmel kell lenni a kompatibilitási követelményekre.

9. Hangtömörítés

A képtömörítés előnyeit nem tudnánk kihasználni hangtömörítés nélkül. A CD minőségű sztereó hang tömörítetlen formában elfoglalná a teljes videó CD tartományt, holott ezen a hangnál nagyobb terjedelmű mozgóképek is el kell férnie. Hangokon elsősorban zenét vagy beszédet értünk. A zene kódolásakor az eredeti hangzás hű visszaadását szeretnénk elérni. Egy film kísérő zörejeit a zenével azonos módon kezeljük. A megvalósításkor a műszaki korlátok miatt gyakran kompromisszumokra kényszerülünk. Beszédátvitelnél gyakran elsődleges szempont a tömör kódolás, az eredeti hangzás, amelyet a jó érthetőség és a beszélő azonosíthatósága jellemez.

9.1. Hangkódolás az MPEG szabvány szerint

Az MPEG-1. szabvány kidolgozásakor a CD minőségű sztereó hang kódolására néhány száz kbit/s sebességet engedélyeztek. A hang kódolására három választható szintet dolgoztak ki, *Layer I*, *Layer II*. és *Layer III*. (*mp3*)elnevezéssel. A magasabb szintek nagyobb számításigény árán azonos minőségű hangot tömörebben kódolnak. Az MPEG-1. a 32, a 44,1 és a 48 kHz-es mintavételi frekvenciákat alkalmazhatja. A hang lehet egycsatornás, tartalmazhat két független csatornát, lehet sztereó és csatolt sztereó, amely kihasználja a két csatorna közötti korrelációt.

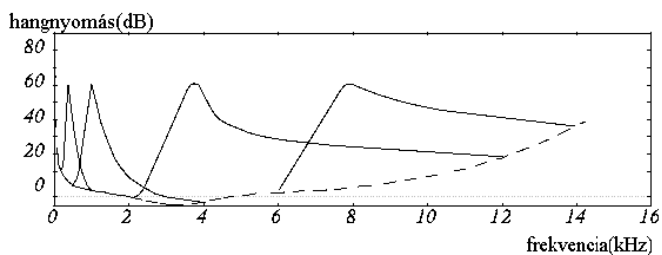
	Tömörítési arány	Adatsebesség (kbit/s)*
Layer I.	1:4	384
Layer II.	1:6 ... 1:8	256 ... 192
Layer III.	1:10 ... 1:12	128 ... 112

*A tömörítés nélküli adatsebesség $2\text{csatorna} \cdot 44100\text{minta} \cdot 16\text{bit} = 1,41\text{Mbit/s}$

9.1. táblázat. MPEG 1. CD minőségű sztereó hangkódolás jellemzői

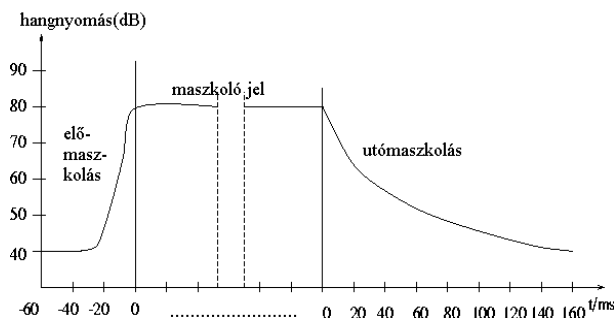
A tömörítés *részszávos kódolás*on alapul. A frekvenciatartományt szűrőkkel 32 sávra osztják, sávonként 12 minta képezi az időkeretet. (A mintavételi frekvencia a sáv szélesség csökkenése miatt az eredetinek 32-ed része.) Ennek az időkeretnek a hossza 44,1 kHz-es mintavételi frekvenciánál 8,71 ms. A *pszichoakusztikus modell* alapján elhagyjuk azokat a hangokat, amelyeket egyébként sem hallanánk, ennek alapja:

- a frekvenciafüggő *hallásküszöb*nél halkabb hangokat nem halljuk
- a frekvenciatartománybeli *maszkolás* miatt egy hangot elnyom a hozzá közel eső frekvenciájú erősebb hang



9.1. ábra. A hallásküszöb és a frekvenciatartománybeli maszkolás

- az *időbeli maszkolás* elfedi az erősebb hang után rövid idővel megszólaló gyengébb hangot (*utómaszkolás*), az időbeli maszkolás visszafelé is működik, az erős hang elnyomja az előtte megjelenő gyengébbet (*előmaszkolás*)



9.2. ábra. Időtartománybeli maszkolás

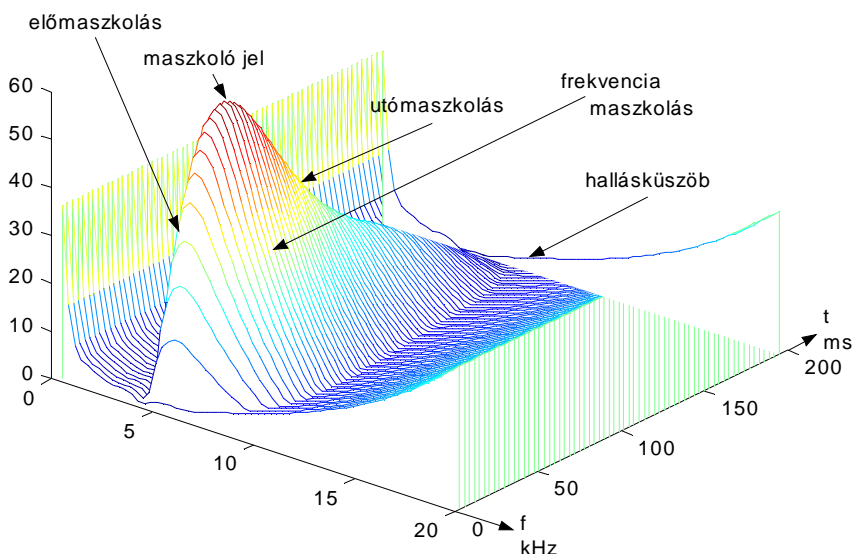
Az együttes hatást szemlélteti a **9.3. ábra**.

A különböző bonyolultságú kódolók eltérően használják ki az előbbi tömörítési lehetőségeket:

Layer I. A frekvenciatartományt egyenletesen osztja részsávokra, frekvenciatartománybeli maszkolást, bitallokációt alkalmaz (a maszkolás meghatározza a részsáv kvantálási finomságát is).

A *Layer II.* eltérései a *Layer I*-től: Az időkeret a *Layer I.* időkeretének háromszorosa (36 bit/sáv), ez lehetővé teszi a részleges időbeli maszkolást.

A *Layer III.* főbb eltérései a *Layer II*-től: A frekvenciatartományt a hallásunkhoz igazodó kritikus sávok alapján (*bark skála*) osztja részsávokra, fejlettebb időbeli maszkolással dolgozik, változó hosszúságú kódokkal entrópia kódolást végez.



9.3. ábra. A frekvencia- és időtartománybeli maszkolás szemléltetése

Az *MPEG-2.* szabvány az *MPEG1*-nél igényesebb mind a kép mind a hang tekintetében. A hangminták finomabb kvantálását is lehetővé teszi, 16-24 biten. A tömörebb kódolás elősegítésére megengedi a mintavételi frekvenciák felezését: 16 000, 22 050 és 24 000 Hz is lehet. A jobb térhatás elérését öt csatorna szolgálja, egy külön csatorna táplálja a mélysugárzót. További legfeljebb hét csatorna teszi lehetővé a többnyelvű kísérőhang hozzáadását.

A két eljárás hangkódolása felfelé és lefelé kompatibilis: Az *MPEG-2*. dekóder képes lejátszani az *MPEG-1*. kódolású hanganyagot, az *MPEG 1*. dekódoló a saját – legfeljebb sztereó - hangcsatornáiba konvertálva tudja lejátszani az *MPEG-2*. hangokat.

Az *MPEG-4*. folyamatos továbbfejlesztés alatt álló ajánlás rögzíti a hangok kódolását a legjobb minőségtől a rendkívül tömör (csatornánként akár 1 kbit/s) leírásig. Külön figyelmet fordítanak a kis késleltetésre a távközlési alkalmazások érdekében. Akárcsak a képtömörítésnél, a hang kódolásakor is lehetőség van objektumok megadására, amelyek a hangot matematikai formulák és vezérlő paraméterek segítségével írják le.

9.2. Beszédkódolás lineáris predikcióval

A beszédhangok kódolása szintén különböző minőségben $2\text{-}24 \text{ kbit/s}$ sebességen lehetséges. Változó sebességű kódolással egészen $1,2 \text{ kbit/s}$ -ig csökkenthető a sebesség. A szabvány tartalmazza szintetizált beszéd előállítását is, szövegből érthető beszédet lehet előállítani 200 bit/s -tól. A beszédhangok kódolása során ki lehet használni a hangképzés sajátosságait, ami az általános célú hangtömörítésnél hatékonyabb forráskódoló eljárások alkalmazására ad módot. Az *MPEG-4* szabványba integrálták a *Lineáris predikciós* beszédkódolót.

Egy mintasorozat következő mintáját megkíséreljük a megelőző minták lineáris kombinációjával megbecsülni. A megfelelő együtthatók megtalálását az teszi lehetővé, hogy a becslés helyességét az eddigi mintákon ellenőrizhetjük. A hangképző szervek modellezése révén az eljárás fizikai háttérrel is rendelkezik.

A következő minta becslése:

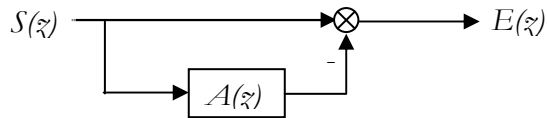
$$\tilde{s}(n) = \sum_{i=1}^p a(i)s(n-i)$$

A becslés hibája:

$$e(n) = s(n) - \tilde{s}(n) = s(n) - \sum_{i=1}^p a(i)s(n-i),$$

A rendezett számsorok műveleteit a z -transzformálttal jelölve:

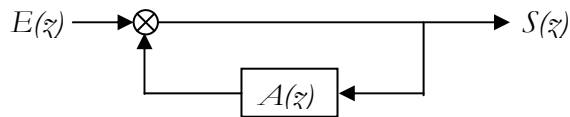
$$E(z) = S(z) - S(z)A(z).$$



9.4. ábra. A lineáris predikció analízis modellje

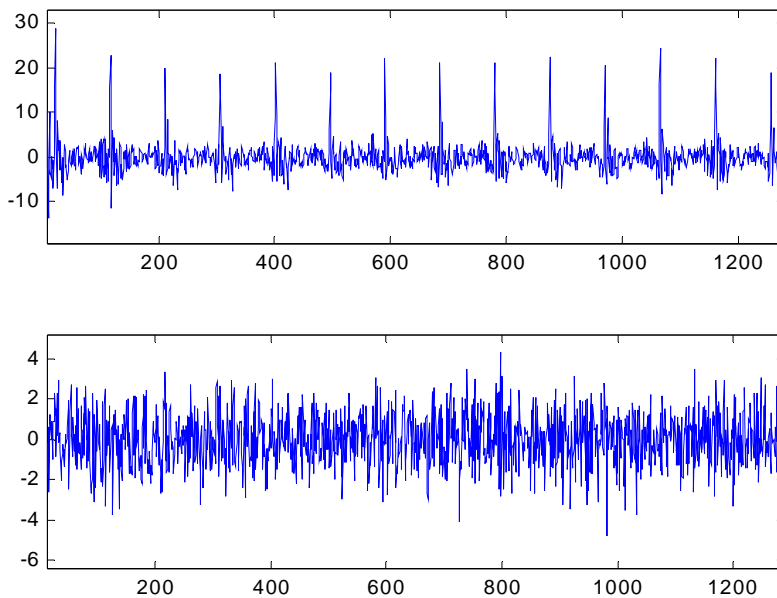
Ez az egyenlet írja le a lineáris predikció *analízis modelljét*. Ha átrendezzük az egyenletet, a lineáris predikció *szintézis modelljéhez* jutunk, amely lehetővé teszi az együtthatók ismeretében a hibajelből a jel visszanyerését.

$$S(z) = E(z) + S(z)A(z).$$



9.5. ábra. A lineáris predikció szintézis modellje

Megfigyelték, hogy a becslés hibája zöngés hangoknál impulzusok sorozatával, zöngétlen hangoknál zajszerű jellel közelíthető.



9.6. ábra. A becslés hibája zöngés (a.) és zöngétlen (b.) hangoknál

Rendkívül tömör kódoláshoz jutunk, ha a hibajel átvitele helyett szintetizált gerjesztést alkalmazunk, és zöngés hangoknál

- a predikciós együtthatókat
- az impulzussorozat amplitúdóját és periódusidejét,

zöngétlen hangoknál

- a predikciós együtthatókat
- a zajszerű gerjesztés amplitúdóját

továbbítjuk vagy tároljuk. Az MPEG-4 szabványban a predikciós kódoló adatsebessége 2,4 kbit/s.

Internetes oldalak

<http://www.home.agilent.com>

<http://www.vitechnology.com>

<http://www.viscom.com>

<http://www.illusionworks.com/>

<http://kids.niehs.nih.gov/illusion/illusions.htm>

<http://www.moillusions.com/>

<http://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/saishin-e.html>

http://web.mit.edu/persci/people/adelson/checkershadow_illusion.html

<http://www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/index-e.html>

<http://www.grand-illusions.com/>

<http://www.at-bristol.org.uk/Optical/default.htm>

<http://www.colorcube.com/illusions/illusion.htm>

<http://www.harmsy.freeuk.com/eyemagic.html>

http://www.sandlotscience.com/Illusion_Jump_Main/Master_Jump.htm

Irodalom

Agilent Technologies: *Electronic PCBA Manufacturing Test and Inspection Training*.

Molnár L.: *Automatizált optikai ellenőrzés az elektronikai gyártásban*. Szakdolgozat, Miskolci Egyetem, 2007

Álló G., Főglein J., Hegedűs Gy. Cs., Szabó J.: *Bevezetés a számítógépes képfeldolgozásba*. BME Mérnöktovábbképző Int. 1993

Berke J., Hegedűs Gy. Cs., Kelemen D., Szabó J.: *Digitális képfeldolgozás és alkalmazásai*. V. E. Georgikon M. K., PICTRON, 2001

Székely V.: *Képfeldolgozás*. Műegyetemi Kiadó, 2003

R. G. Gonzales, R. E. Woods: *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2002

R. G. Gonzales, R. E. Woods, S. L. Eddins: *Digital Image Processing Using MATLAB*. Prentice Hall, 2004

W. K. Pratt: *Digital Image Processing*. Wiley, 2001

S. E. Umbaugh: *Computer Vision and Digital Image Processing*. Prentice Hall, 1998

M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle: *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. PWS Publishing, 1999

I. Pitas: *Digital Image Processing Algorithms and Applications*. Wiley, 2000

- K. R. Rao, J. J. Hwang: *Technics and Standards for Image, Video, and Audio Coding*. Prentice Hall PTR 1996
- Russ J. C.: *The Image Processing Handbook*. CRC Press, Springer, IEEE Press 1999
- Hu, M. K. (1962). *Visual pattern recognition by moment invariants*. IRE Transactions on Information Theory, Vol. 8. (1) pp. 179-187.
- Mukundan, R., and Ramakrishnan K.R. (1998). *Moment functions in image analysis*. Singapore: Word Scientific Press. pp. 11-24.
- S. A. Tretter: *Introduction to Discrete-Time Signal Processing*. John Wiley & Sons 1976
- A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, S. H. Hamid: *Signals & Systems*. Prentice Hall International 1983

Tárgymutató

3

3D képkötés, 38, 41, 42

A,Á

alakzatfelismerés, 111, 117
 aluláteresztő szűrő, 95, 97, 98, 99, 100,
 101, 102, 103, 108
 AOI, Automatic Optical Inspection, 35
 átlagolás, 62, 63, 64, 65, 83
 átszínezés, 56
 AXI, Automatic X-Ray Inspection, 35

B

Bayer szűrő, 34
 BGA Ball Grid Array, 40
 bidirectional, 141

C

CCD kamera, 34
 Charge Coupled Device, 34
 CMOS képérzékelő, 35
 CMY színrendszer, 21, 22
 CMYK színrendszer, 4, 21, 23

Cs

csapok, 8, 9, 10

D

DCT diszkrét koszinusz transzformáció,
 135, 136, 137
 DFT, 87, 88, 89, 90, 93
 dilatáció, 114
 Dual Threshold Method, 53

E,É

élesítés, 30, 66, 76, 96, 106, 108
 élkiemelés, 66
 elmozdulás vektor, 143
 emberi látás, 4, 7, 10
 erózió, 112

F

felüláteresztő szűrő, 97, 98, 103, 104, 105,
 107
 FFT, 89
 Fourier, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 96,
 100, 108, 109, 110, 135
 Fourier transzformáció, 88, 89, 90, 91, 92,
 109, 135

G

gamma korrekciónak, 32
globális művelet, 44

H

hangtömörítés, 144, 145
hisztogram, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52,
53, 54, 55, 56, 106
hisztogram kiegyenlítés, 51
hisztogram nyújtás, 48
hisztogram transzformáció, 44
HSV színrendszer, 4, 28, 29, 30

I,Í

intra keret, 141
invertálás, 46

J

JPEG, 136, 141

K

képjavítás, 62
képmomentum, 123
képtömörítés, 134, 145
kétirányú keret, 71, 142
kettős küszöbérték, 53
konvolúció, 60, 83
krominancia, 26, 27, 138, 140, 141
küszöbölés, 53, 55

L

Laplace, 67, 68, 69, 70, 80, 82, 83
látógödör, 8, 9
lineáris predikció, 149
lokális műveletek, 44, 60
Lokális műveletek, 4, 43, 60
look-up-table, 44, 50, 55, 56
luminancia, 26, 140, 141

M

maszkolás, 146, 147
medián szűrés, 84, 85
morfológiai műveletek, 111

mozgásbecslés, 141, 143
mozgóképek, 16, 31, 140, 141
mp3, 145
MPEG, 5, 140, 141, 142, 144, 145, 147,
148, 150

Ny

nyitás, 117

O,Ó

operátor, 60, 61, 62, 63, 68, 69, 70, 72, 73,
74, 78, 80, 81, 83, 84, 110
optikai ellenőrzés, 5, 126

P

PAL, 26, 31
pálcikák, 8, 9, 10
pont-pont műveletek, 44
Pont-pont műveletek, 4, 43, 44
predicted keret, 141
Prewitt, 67, 73, 74, 75, 77, 78, 79

R

rank, 60, 84, 86
redundancia, 134, 140
relatív érzékenység, 12
relatív felbontóképesség, 12, 13
retina, 7, 8
RGB színrendszer, 4, 17, 21, 29
Roberts, 67, 71, 72, 73, 75, 79
Robinson, 79, 80

S

SECAM, 26, 31
síkfrekvenciás érzékenység, 13
síkfüggvények, 87
skeleton, 118
Sobel, 67, 74, 75, 80
strukturáló elem, 111, 112

Sz

szegmentálás, 111
színrendszerek, 4, 17

T

töltéscsatolt eszköz, 34

Vvékonyítás, 120
villódzás, 16**Y**

YUV színrendszer, 4, 12, 26

Zzajszűrés, 62, 63
zárás, 117
zig-zag sorrend, 138