

Digitális képfeldolgozás

A színtan alapjai

Horváth András, SZE GIVK

v 1.1



...

1 Bevezetés

- A színtan alapfogalmai

2 Additív színrendszer

- Színkeverés
- Az RGB színrendszer
- Nem ábrázolható színek a gyakorlatban

3 Egyéb additív rendszerek

- Az XYZ-rendszer
- A HSV-rendszer
- Az YCbCr rendszer
- További színrendszerek

A látható objektumok színképe

Közismert tények a **a fényről**:

- **hullámhossz:** a fény egy fontos tulajdonsága
- **tiszta színek:** csak egy hullámhosszat tartalmaznak
- **színkép:** függvény, mely leírja, hogy oszlik meg az energia a hullámhossz függvényében

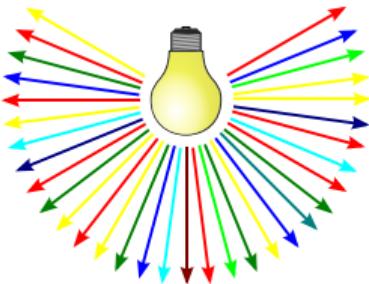
A látható objektumok színképe

Közismert tények a **a fényről**:

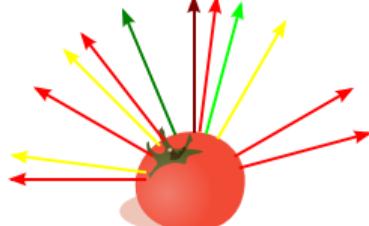
- **hullámhossz:** a fény egy fontos tulajdonsága
- **tiszta színek:** csak egy hullámhosszt tartalmaznak
- **színkép:** függvény, mely leírja, hogy oszlik meg az energia a hullámhossz függvényében

A látott színkép a fényforrástól és a visszaverő tárgytól is függ.

1. kibocsátás



2. visszaverődés



3. érzékelés

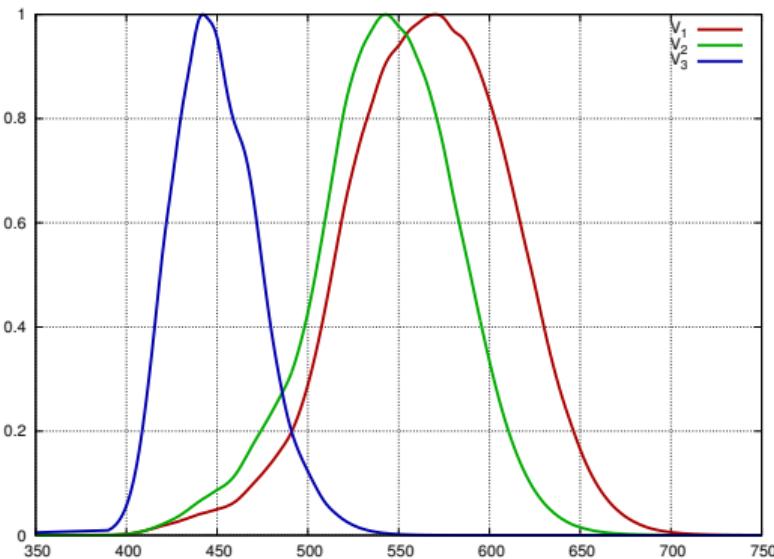


$$\phi(\lambda) = D \cdot \phi_0(\lambda) \cdot R(\lambda), \text{ ahol } \phi_0 \text{ a fényforrás színképe, } R \text{ a felület visszaverési függvénye.}$$

Az emberi színérzékelés

$\phi(\lambda)$ helyett a szemünk csak 3 színkomponenst érzékel:

- 3 különböző fényérzékelő sejtünk működik nappali megvilágításban
- mindeneknek saját érzékenységi függvénye van
- a különféle sejtek jelei a retinában állnak össze színi információvá



Spektrális érzékenységi függvények : $V_i(\lambda)$
($i = 1, 2, 3$)
Az i . sejttípus idegi jele:

$$J_i = m_i \int V_i(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda.$$

(m_i : normalizálás)

$\phi(\lambda)$ helyett az ingerület vektort észleljük:
 $\underline{J} = (J_1, J_2, J_3)$.

A metamerek

$\phi(\lambda)$ sokkal több információt hordoz, mint (J_1, J_2, J_3) :

- + 3 komponens feldolgozása egyszerűbb, mint egy folytonos függvényé.
- Információ-vesztés: **sok különböző színképhez tartozhat ugyanaz az ingerület-vektor.**

A metamerek

$\phi(\lambda)$ sokkal több információt hordoz, mint (J_1, J_2, J_3) :

- + 3 komponens feldolgozása egyszerűbb, mint egy folytonos függvényé.
 - Információ-vesztés: **sok különböző színképhez tartozhat ugyanaz az ingerület-vektor.**
-

Metamerek: két színkép egymás metamerje, ha ingerület-vektoruk azonos.

A metamerek létezése:

- rossz: különböző színképeket azonosnak látunk
- + jó: színes képek esetén **nem kell a teljes színképet reprodukálni, csak egy metamert**

Additív és szubtraktív keverés

Ötlet: egy rögzített "alapszín-halmazt" veszünk és ezeket kombináljuk.

Így nem állítjuk elő az összes színeképet, de elő kell állítanunk az összes szín metamerét!

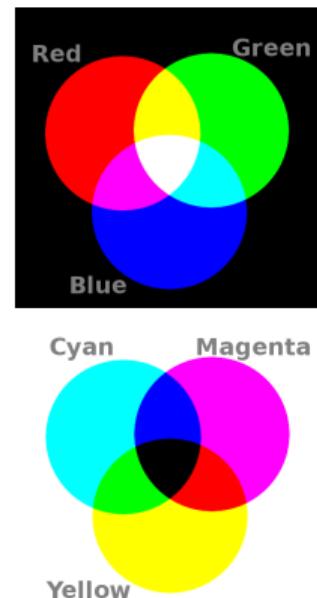
Additív és szubtraktív keverés

Ötlet: egy rögzített "alapszín-halmazt" veszünk és ezeket kombináljuk.

Így nem állítjuk elő az összes színképet, de elő kell állítanunk az összes szín metamérét!
(Kiskorában mindenki kevert színeket festékek ből...)

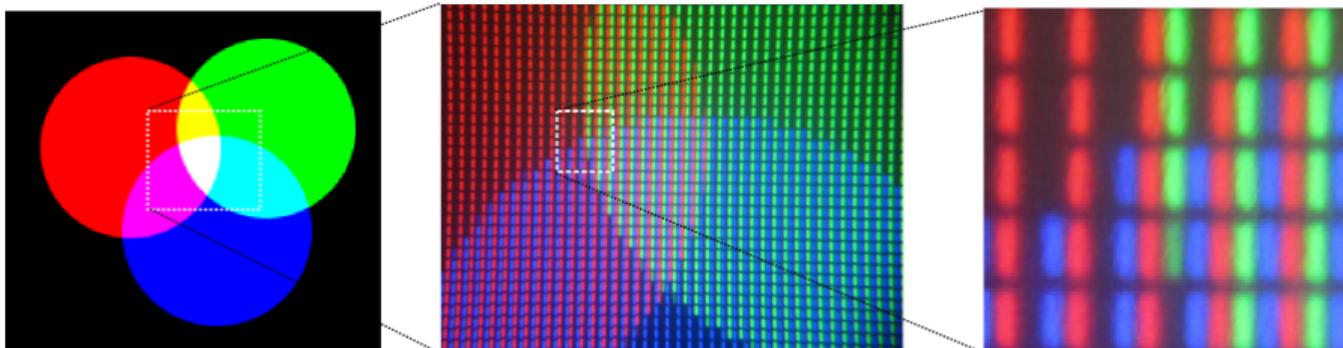
Színkeverés:

- **Additív.** Alapszínek: fényforrás-színképek.
Az alapszínek színképeit súlyozzuk és összeadjuk.
Színes lámpák, monitorok, kivetítők...
- **Szubtraktív.** Alapszínek: visszaverési vagy áteresztési függvények.
A fényforrások fénye rétegeken szűrődik át, mindenkor kiszűr bizonyos hullámhosszakat.
Festékek, színes nyomtatványok, szövetek, ...

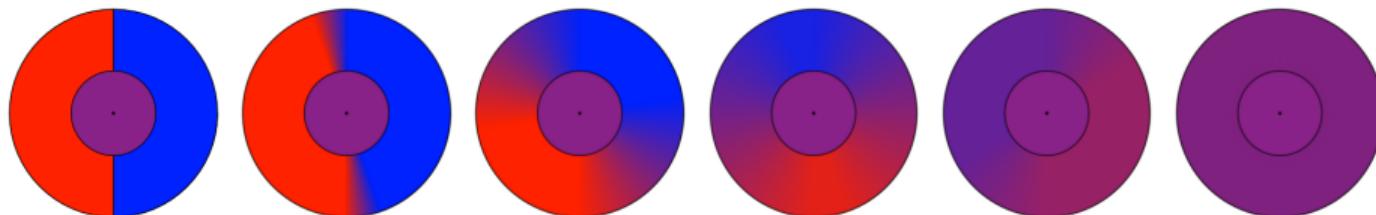


Additív színkeverési módszerek

- ① **Vetítés** : fénysugarak egy felületen találkoznak
- ② **Nagyon közeli fényforrások** : Monitorok, TV-készülékek , ...



- ③ **Az alapszínek gyors váltogatása** : Gyors forgás: szemünk nem követi a változásokat.

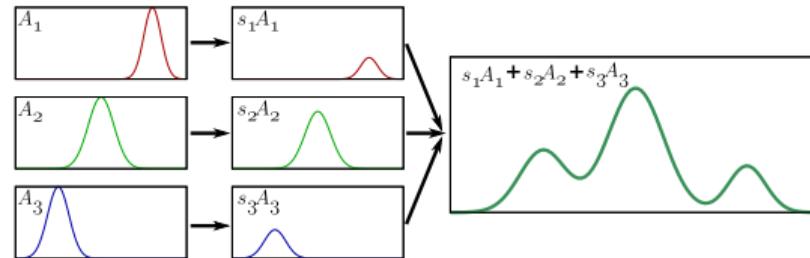
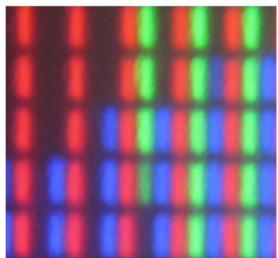


vesd össze a középső és a szélű tartományok színét

A színkeverés alapegyenletei

K alapszín spektrumai: $A_j(\lambda)$ ($j = 1, 2, \dots, K$)

súlyozott összeg: $I_s(\lambda) = \sum_{j=1}^K s_j A_j(\lambda).$

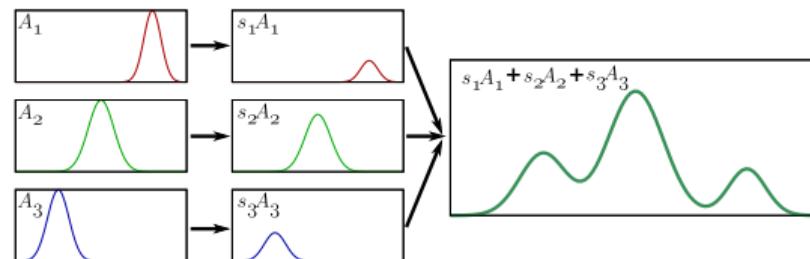
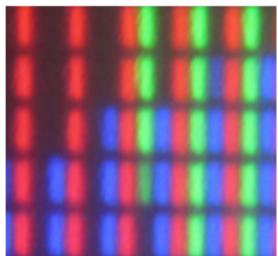


s_j értékeinek változtatásával sok spektrum előállítható, de nem az összes.

A színkeverés alapegyenletei

K alapszín spektrumai: $A_j(\lambda)$ ($j = 1, 2, \dots, K$)

súlyozott összeg: $I_s(\lambda) = \sum_{j=1}^K s_j A_j(\lambda).$



s_j értékeinek változtatásával sok spektrum előállítható, de nem az összes.

Alaprobléma: hogy válasszuk meg s_j -t, hogy egy adott $\phi(\lambda)$ színkép metamérét kapjuk?

$$\int \phi(\lambda) V_i(\lambda) d\lambda = \int \sum_{j=1}^K s_j A_j(\lambda) V_i(\lambda) d\lambda, \quad i = 1, 2, 3$$

Az additív színkeverés egyenletének megoldása

Bebizonyítható:

- + Létezik egyszerű módszer s_j meghatározására, ha rögzítjük az $A_j(\lambda)$ függvényeket.
 $(K = 3)$
- A megoldáskor előfordul, hogy negatív s_j értékeket kapunk.

Probléma: negatív s_j nem valósítható meg fizikailag!

Nincs “-100 lm”-es lámpa.

Az additív színkeverés egyenletének megoldása

Bebizonyítható:

- + Létezik egyszerű módszer s_j meghatározására, ha rögzítjük az $A_j(\lambda)$ függvényeket.
 $(K = 3)$
- A megoldáskor előfordul, hogy negatív s_j értékeket kapunk.

Probléma: negatív s_j nem valósítható meg fizikailag!

Nincs "-100 lm"-es lámpa.

Összegezve: Egy additív rendszerben minden színnek megvan a metamere, de ezek egy része nem reprodukálható a valóságban.

Az additív színkeverés egyenletének megoldása

Bebizonyítható:

- + Létezik egyszerű módszer s_j meghatározására, ha rögzítjük az $A_j(\lambda)$ függvényeket.
 $(K = 3)$
- A megoldáskor előfordul, hogy negatív s_j értékeket kapunk.

Probléma: negatív s_j nem valósítható meg fizikailag!

Nincs "-100 lm"-es lámpa.

Összegezve: Egy additív rendszerben minden színnek megvan a metamere, de ezek egy része nem reprodukálható a valóságban.

$K > 3$ vagy megfelelő $A_j(\lambda)$ esetén javul a helyzet, de véleges megoldás nincs a problémára

Különféle színrendszereket terveztek arra, hogy egyensúlyt találjanak a bonyolultság és a minél több reprodukálható szín között.

Az RGB színrendszer

Az első, széles körben elterjedt additív színrendszer.

- eredeti változat 1931
- módosítás 1964
(ezen alapul a legelterjedtebb sRGB-rendszer)

Ebben a kurzusban nem tárgyaljuk a részleteket.

Az RGB színrendszer

Az első, széles körben elterjedt additív színrendszer.

- eredeti változat 1931
- módosítás 1964
(ezen alapul a legelterjedtebb sRGB-rendszer)

Ebben a kurzusban nem tárgyaljuk a részleteket.

Az RGB-rendszer legfontosabb sajátosságai:

- Az alapszínek tiszta vörös, zöld és kék színek.
- A szabványok egzaktul definiálják az $A_j(\lambda)$ függvényeket, de a valós eszközök csak közelítik ezt.
- Nem minden színképnek van metamere RGB-ben.
- Az RGB-komponensek nem felelnek meg a retina háromféle csapja által észlelt jelnek.

Az r és g színezet-koordináták

Ha csak a “színezet” érdekel minket, a fényesség nem, akkor normalizált komponenseket használhatunk:

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = \frac{B}{R + G + B} (= 1 - r - g)$$

Elnevezés: r , g és b a “színezet-koordináták”.

Az r és g színezet-koordináták

Ha csak a “színezet” érdekel minket, a fényesség nem, akkor normalizált komponenseket használhatunk:

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = \frac{B}{R + G + B} (= 1 - r - g)$$

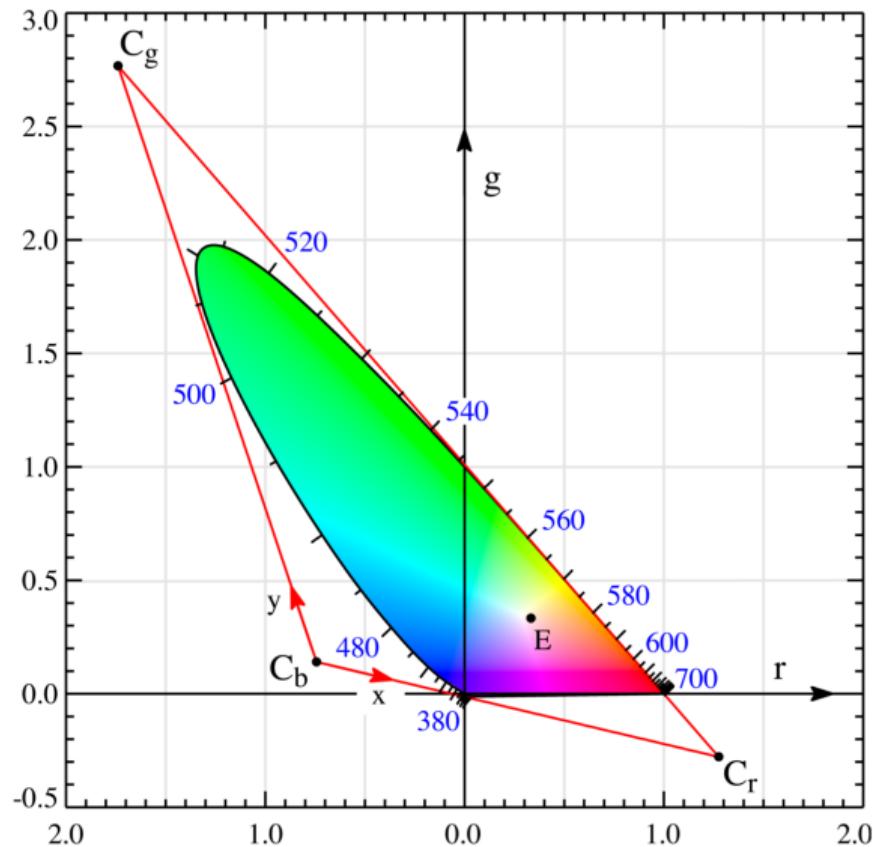
Elnevezés: r , g és b a “színezet-koordináták”.

Nem-reprodukálható színek: r , g vagy b negatív.

“Megoldás”: felkerekítjük őket 0-ra.

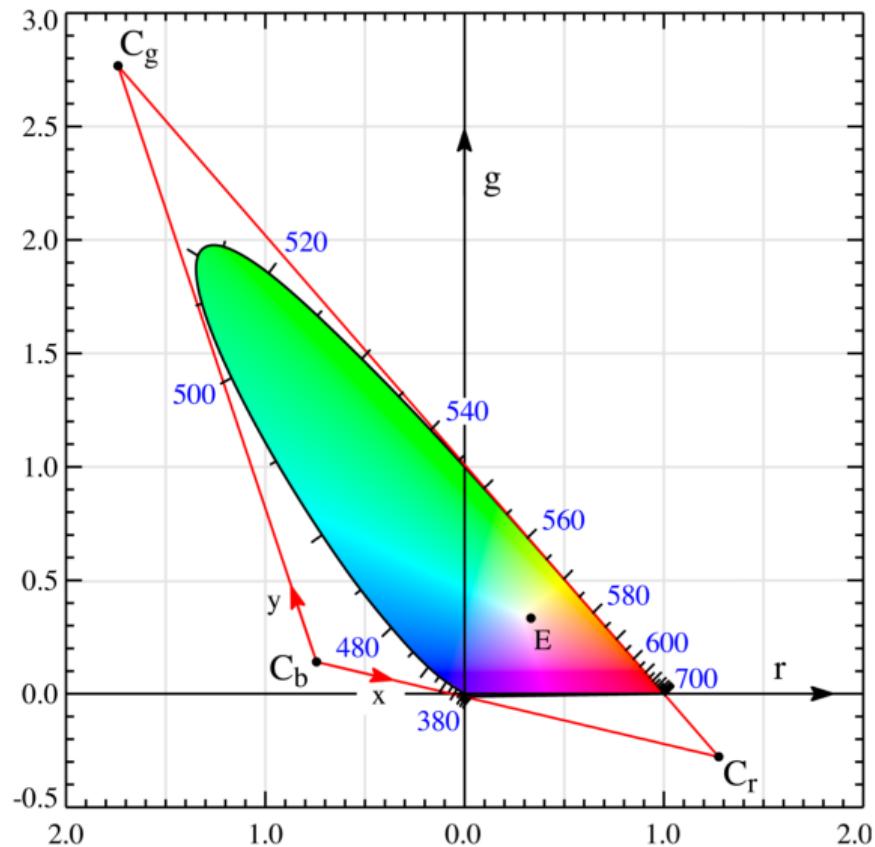
Probléma: hamis színek.

Az rg-színességi diagram



Perem: tiszta színek
(hullámhosszak kékkel)

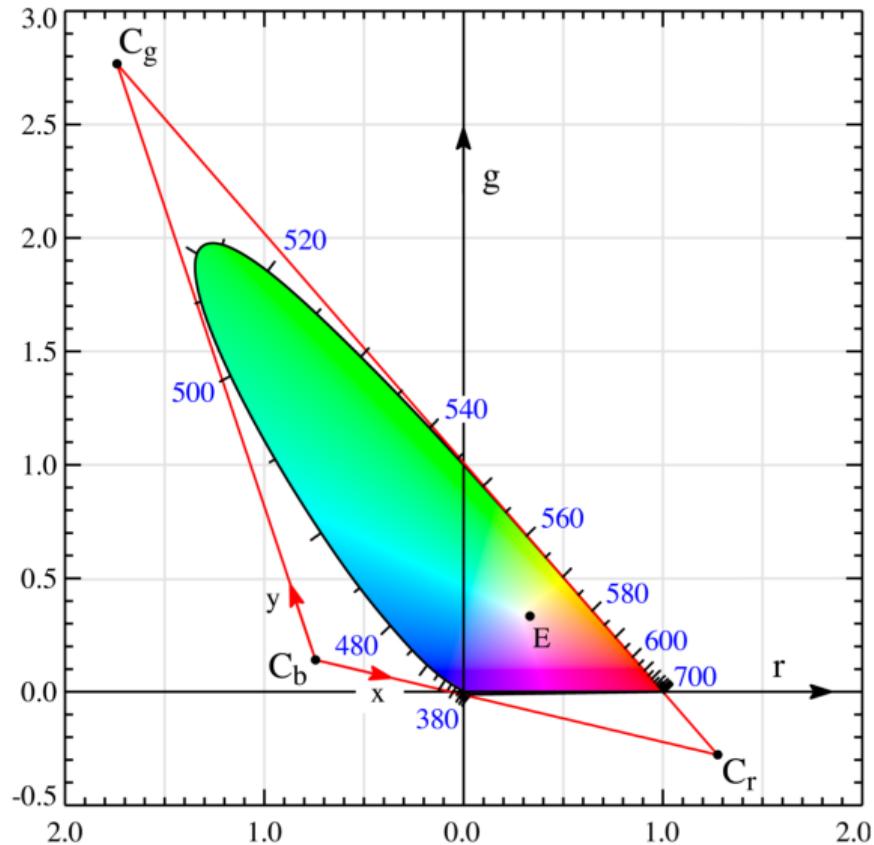
Az rg-színességi diagram



Perem: tiszta színek
(hullámhosszak kékkel)

$E = (1/3, 1/3)$: egyensúlyi pont
(szürke árnyalatok)

Az rg-színességi diagram



Perem: tiszta színek
(hullámhosszak kékkel)

$E = (1/3, 1/3)$: egyensúlyi pont
(szürke árnyalatok)

Ábrázolható színek:

$$r \geq 0 \text{ és } g \geq 0$$

(l. síknegyed)

$$\text{és } b = 1 - r - g \geq 0$$

($g = 1 - r$ alatt)

Nem ábrázolható színek a gyakorlatban

Tényleg fellépnek a gyakorlatban ilyen esetek?

(Vagy feleslegesen precízkedünk?)

Nem ábrázolható színek a gyakorlatban

Tényleg fellépnek a gyakorlatban ilyen esetek?

(Vagy feleslegesen precízkedünk?)

Sokszor fellépnek!

A “pasztell színek” nem veszélyesek, de az élénk (közel tiszta) színek igen.

Nem ábrázolható színek a gyakorlatban

Tényleg fellépnek a gyakorlatban ilyen esetek?

(Vagy feleslegesen precízkedünk?)

Sokszor fellépnek!

A "pasztell színek" nem veszélyesek, de az élénk (közel tiszta) színek igen.

Egyeszerű demonstráció: fényképek *r-g* hisztogramja.

Kis program: kép pixelei (R, G, B) \Rightarrow

Nem ábrázolható színek a gyakorlatban

Tényleg fellépnek a gyakorlatban ilyen esetek?

(Vagy feleslegesen precízkedünk?)

Sokszor fellépnek!

A “pasztell színek” nem veszélyesek, de az élénk (közel tiszta) színek igen.

Egyszerű demonstráció: fényképek $r-g$ hisztogramja.

Kis program: kép pixelei $(R, G, B) \Rightarrow (r, g) \Rightarrow$

Nem ábrázolható színek a gyakorlatban

Tényleg fellépnek a gyakorlatban ilyen esetek?

(Vagy feleslegesen precízkedünk?)

Sokszor fellépnek!

A “pasztell színek” nem veszélyesek, de az élénk (közel tiszta) színek igen.

Egyeszerű demonstráció: fényképek $r-g$ hisztogramja.

Kis program: kép pixelei $(R, G, B) \Rightarrow (r, g) \Rightarrow$ 2D hisztogramm.

Nem ábrázolható színek a gyakorlatban

Tényleg fellépnek a gyakorlatban ilyen esetek?

(Vagy feleslegesen precízkedünk?)

Sokszor fellépnek!

A “pasztell színek” nem veszélyesek, de az élénk (közel tiszta) színek igen.

Egyeszerű demonstráció: fényképek r - g hisztogramja.

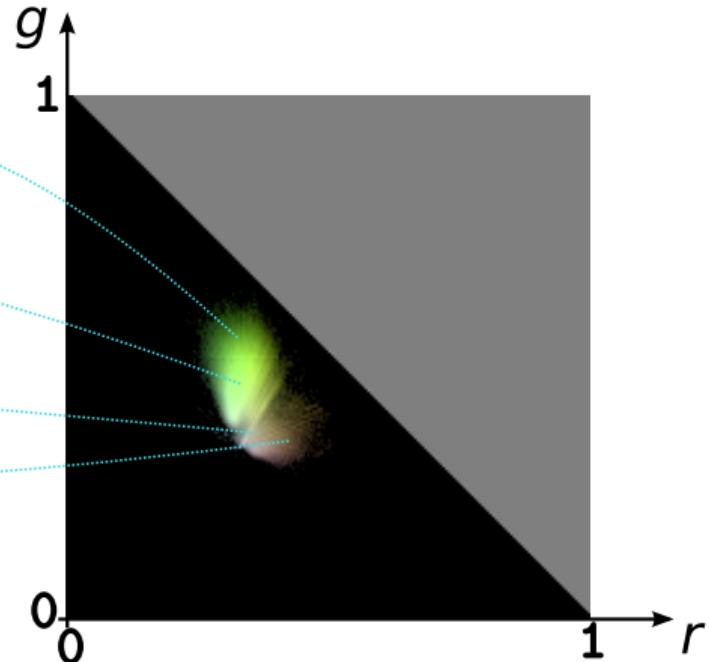
Kis program: kép pixelei $(R, G, B) \Rightarrow (r, g) \Rightarrow$ 2D hisztogramm.

Az RGB-rendszer korlátai:

- csak a fél egységnégyzetben lehetnek pontok
- az elvileg kívül esők a határra “lapulnak”

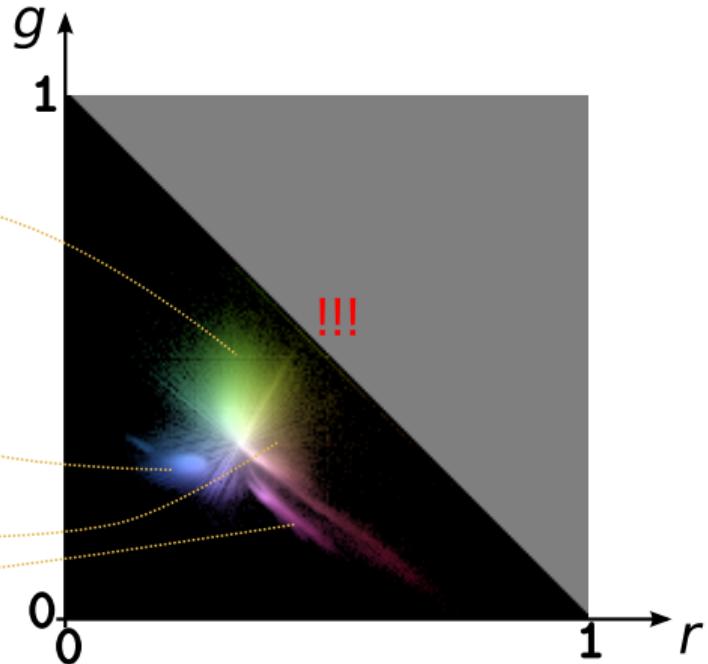
(A pontos értékek fényképezőgép-függők, de jó kvalitatív demonstráció.)

rg-hisztogram: levelibéka



Kevés szín, mind az E pont közelében. (Nem túl élénk színek.)
Minden szín ábrázolható lehetett eredetileg is.

rg-hisztogram: kerti csendélet (elektrosztatikával)

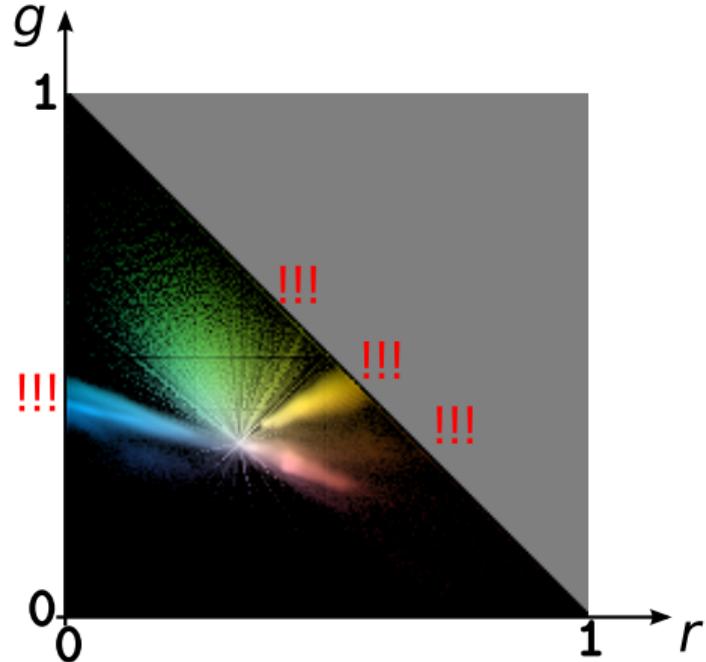


Élénkebb színek távolabb E -től.

Néhány pixel a szélén sorakozik ("!!!").

Csak kevés nem ábrázolható színű pixel.

rg-hisztogram: műanyag medence



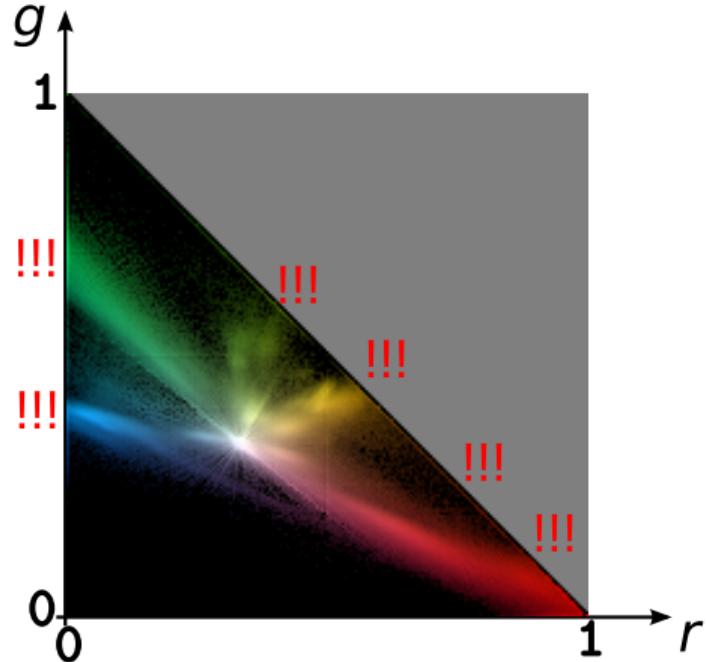
Egyértelműen kiér a széléig.

A műanyag medence színei között van nem ábrázolható.

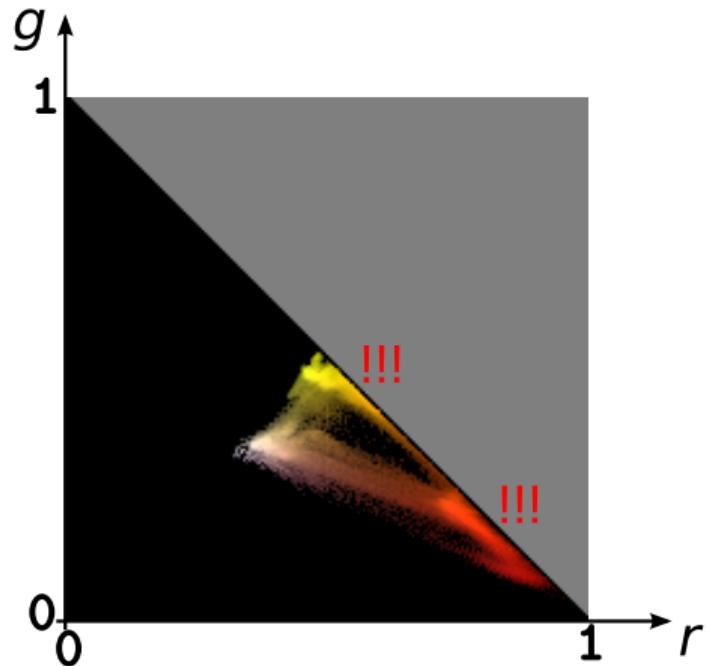
rg-hisztogram: Lego-elemek



Sok túl élénk szín.
(Ezért is szeretik a gyerekek.)

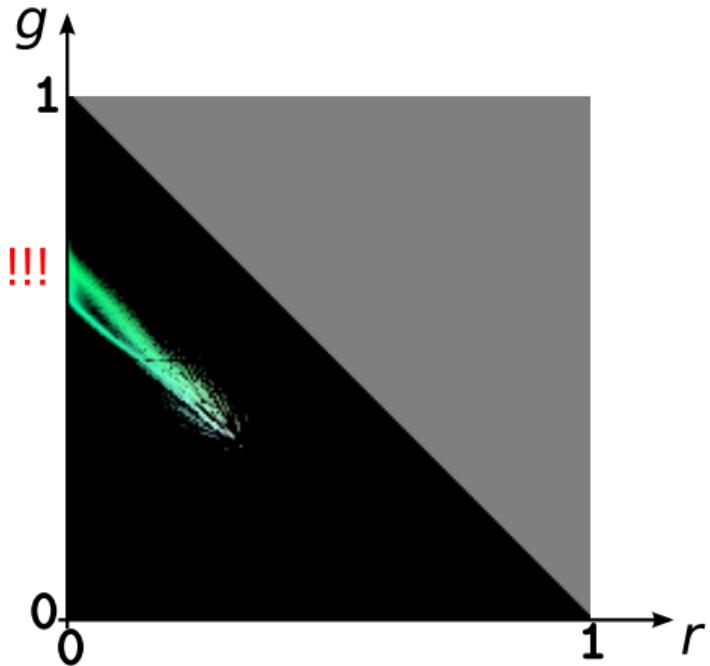


rg-hisztogram: láthatósági mellények



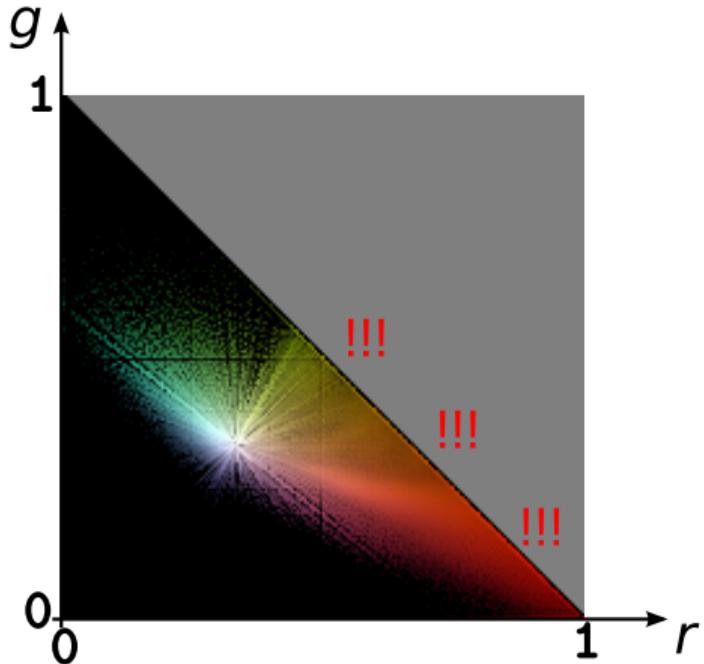
Szándékosan élénk színű tárgyak.
Élénk szín: figyelemfelkeltés.

rg-hisztogram: zöld dióda



Zöld dióda: egyértelműen nem adható vissza a színe.
(A kép is zöld, de nem annyira élénk.)

rg-hisztogram: virág



Virágzirmok: nem adható vissza.
(Közelítőleg igen, de nem pontosan.)

Nem reprodukálható színek a képfeldolgozásban

A képfeldolgozásban a színek pontossága többnyire nem nagyon fontos.

Az eddigiek fő tanulságai:

- **Az RGB-komponensek definíciója nem triviális.**
Nem igaz a “vörös, zöld és kék komponense az adott színnek” felfogás.
- **Különféle eszközök kissé eltérő színrendszert használnak.**
Nem szabad megbízni a kalibrálatlan eszközök színhűségében.
- **Különböző színképek is azonos színkomponenseket eredményezhetnek.**
Azonos RGB-értékek nem jelentenek feltétlen azonos színképet.
- **3-nál több színcsatorna kellene a pontosabb leképezéshez.**
Ebben a kurzusban ilyen esettel nem foglalkozunk.

Az XYZ színrendszer

Az XYZ-színrendszert úgy definiálták, hogy kielégítse az alábbiakat:

- additív rendszer, mely az RGB-ből könnyen számolható
- minden színekhez nemnegatív XYZ értékek tartozzanak
- az Y komponens legyen egyenesen arányos az észlelt fényességgel

Az XYZ színrendszer

Az XYZ-színrendszert úgy definiálták, hogy kielégítse az alábbiakat:

- additív rendszer, mely az RGB-ből könnyen számolható
- minden szímképhez nemnegatív XYZ értékek tartozzanak
- az Y komponens legyen egyenesen arányos az észlelt fényességgel

A matematikai részletek nélkül:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Fényesség: $Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$.

Az XYZ színrendszer

Az XYZ-színrendszert úgy definiálták, hogy kielégítse az alábbiakat:

- additív rendszer, mely az RGB-ből könnyen számolható
- minden színekhez nemnegatív XYZ értékek tartozzanak
- az Y komponens legyen egyenesen arányos az észlelt fényességgel

A matematikai részletek nélkül:

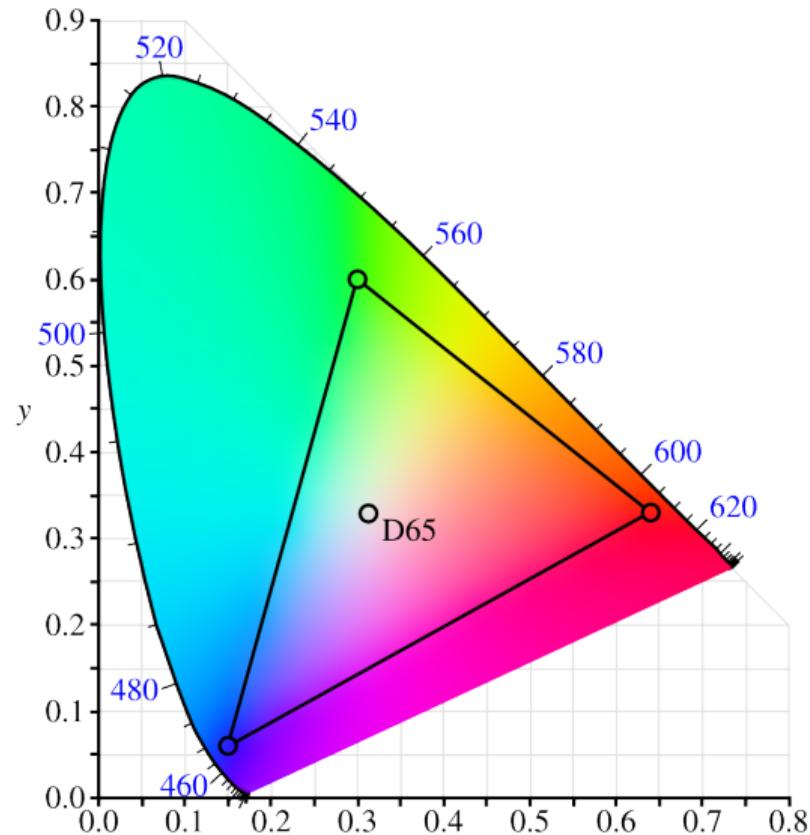
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Fényesség: $Y = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$.

Színezet-koordináták:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Az XYZ-rendszer színességi diagramja



Megjegyzés: az ábra színei csak közelítések.

Háromszög: az sRGB rendszerben reprodukálható színek.

E-pont: egyensúlyi pont, $x = y = 1/3$.
(szürke árnyalatok)

Ez a színelmélet egyik alapvető ábrája.

A HSV-rendszer

Az RGB-rendszer nem olyan természetes, mint a beszélt nyelv, pl. "közepesen élénk narancsos árnyalat."

Sokféle megoldás. A legegyszerűbb és legnépszerűbb: HSV-rendszer.

- **Hue:** (árnyalat) melyik tiszta szín hasonlít a vizsgált színre?
- **Saturation:** (telítettség) milyen élénk a szín?
- **Value:** (érték) milyen fényes a szín

A HSV-rendszer

Az RGB-rendszer nem olyan természetes, mint a beszélt nyelv, pl. "közepesen élénk narancsos árnyalat."

Sokféle megoldás. A legegyszerűbb és legnépszerűbb: HSV-rendszer.

- **Hue:** (árnyalat) melyik tiszta szín hasonlít a vizsgált színre?
- **Saturation:** (telítettség) milyen élénk a szín?
- **Value:** (érték) milyen fényes a szín

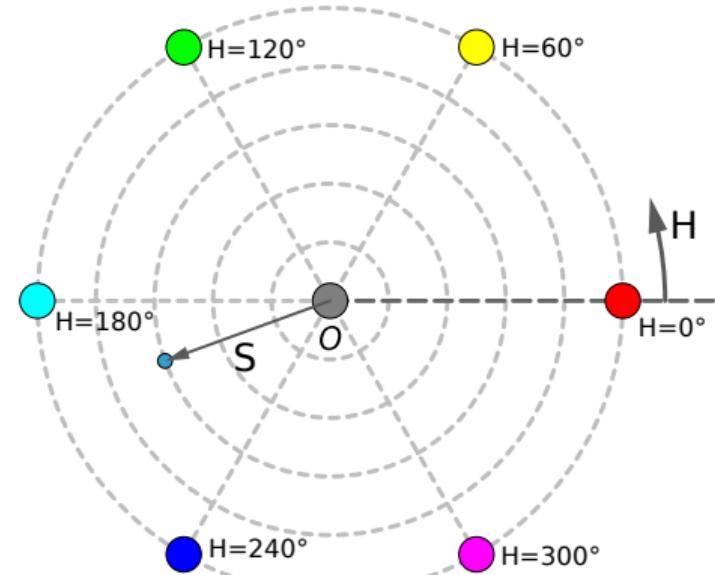
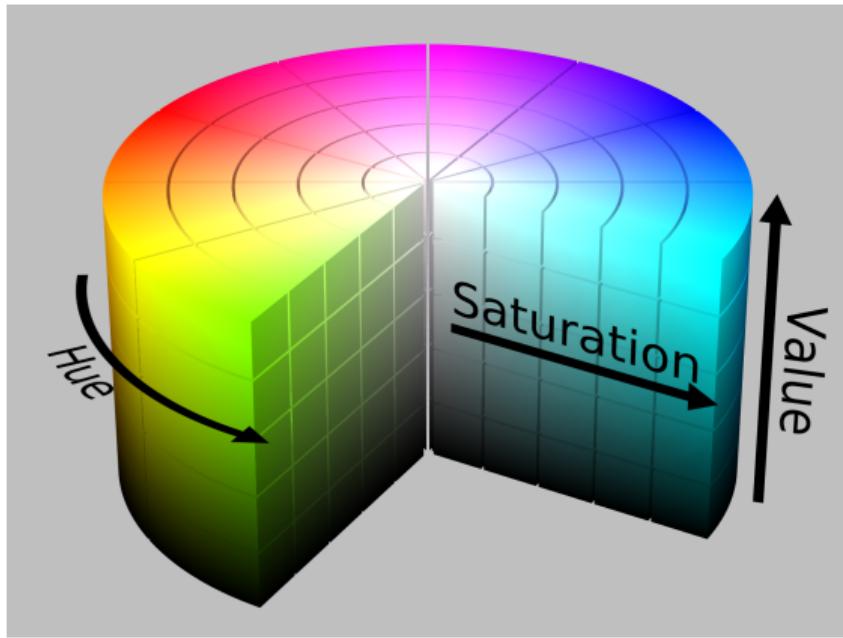
$$\text{Min} = \min(R, G, B), \text{Max} = \max(R, G, B)$$

$$H = \begin{cases} 0, & \text{ha } \text{Max} = \text{Min} \\ 60^\circ \cdot \frac{G-B}{\text{Max}-\text{Min}} \bmod 360^\circ, & \text{ha } \text{Max} = R \\ 60^\circ \cdot \frac{B-R}{\text{Max}-\text{Min}} + 120^\circ, & \text{ha } \text{Max} = G \\ 60^\circ \cdot \frac{R-G}{\text{Max}-\text{Min}} + 240^\circ, & \text{ha } \text{Max} = B \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{ha } \text{Max} = 0 \\ \frac{\text{Max}-\text{Min}}{\text{Max}} = 1 - \frac{\text{Min}}{\text{Max}}, & \text{különben} \end{cases} \quad (2)$$

$$V = \text{Max} \quad (3)$$

A HSV-rendszer

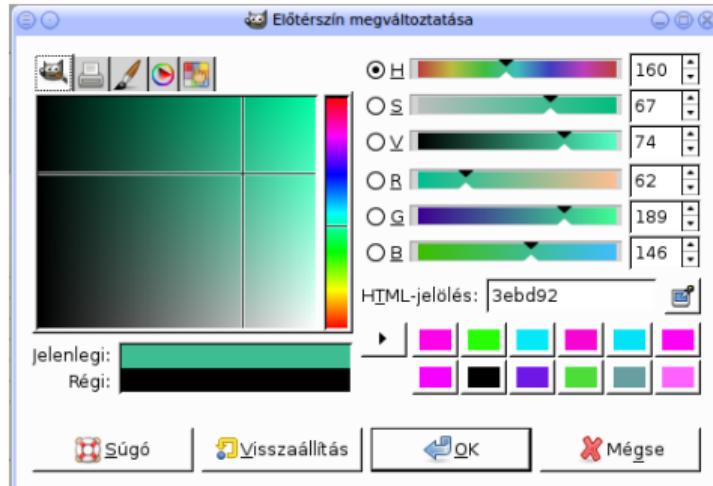


Könnyű gondolkodni HSV-ben:

- Élénkebb szín kell? Növeljük S -t.
- Élénk zöldök kellenek? Legyen $S > 0,7$ és $|H - 120| < 30$.

A HSV-rendszer használata

Sok grafikus rendszer használ HSV-koordinátákat. Példa: GIMP színválasztó.



- **Számábrázolás miatti korlátok.** Pl. elvileg $H \in [0, 360]$, de néha ez $[0, 255]$, $[0, 180]$ vagy $[0.0, 1.0]$ -ra van transzformálva.
- **Nem illeszkedik pontosan az emberi érzékeléshez.** A HSV koordináták egységnyi megváltoztatásának látható hatása színtüvő.
- Néhány rendszer kissé más definíciót használ.

Az YCbCr rendszer

$$Y' = K_R \cdot R' + (1 - K_R - K_B) \cdot G' + K_B \cdot B'$$

$$P_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{B' - Y'}{1 - K_B}$$

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{R' - Y'}{1 - K_R}$$

$$(Y', C_B, C_R) = (16, 128, 128) + (219 \cdot Y, 224 \cdot P_B, 224 \cdot P_R)$$

(K_R és K_B eszközfüggő.)

Az YCbCr rendszer

$$Y' = K_R \cdot R' + (1 - K_R - K_B) \cdot G' + K_B \cdot B'$$

$$P_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{B' - Y'}{1 - K_B}$$

$$P_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{R' - Y'}{1 - K_R}$$

$$(Y', C_B, C_R) = (16, 128, 128) + (219 \cdot Y, 224 \cdot P_B, 224 \cdot P_R)$$

(K_R és K_B eszközfüggő.)

Részletek nélkül, a komponensek jelentése:

- Y : fényesség (uaz, mint XYZ-ben)
- Cb , Cr : a kék és a vörös többlet (színezet-koordináták)

Széles körben használják kép- és videó-formátumokban (JPEG, MPEG, ...).

További színrendszerek

Többféle célra egyéb színrendszereket is definiáltak.

A digitális képfeldolgozásban a legfontosabbak:

- **CIE L*a*b*, CIE L*u*v***: az emberi érzékeléshez illesztett rendszerek.
Pl. az a^* koordináta egységnyi megváltoztatása ugyanakkora érzékelés-változást okoz minden szín esetén.
Elterjedt rendszer fénykép-javításoknál, színmérésben, mozgókép-formátumokban.
- **Adobe RGB**: hasonló az sRGB-hez, kissé más alappontokkal.
Több ábrázolható kék és zöld árnyalat.
- **Eszközfüggő rendszerek**: adott érzékelőhöz illesztett rendszerek.
Egy eszköz (pl. fényképezőgép) saját színrendszerében kevesebb a zaj, kerekítési hiba.
A standard rendszerekre át lehet számolni, de ez hibákkal jár.
- **CMYK rendszer**: szubtraktív rendszer nyomtatókhhoz, újságokhoz.