

A multimédiatechnológiák alapjai

Dr. Firtha Gergely

April 6, 2020

Contents

1	Az emberi látás tulajdonságai	3
2	Fény- és színmérés	5
3	Videókomponensek	7
3.1	Eszközfüggő színterek	7
3.2	A TV-technika színkülönbségi színtere	19
3.3	Videójel komponensek	26
3.4	A digitalizálás kérdései	26

Fejezet 1

Az emberi látás tulajdonságai

Fejezet 2

Fény- és színmérés

Fejezet 3

Videókomponensek

Az előző fejezet bemutatta az emberi látás képi reprodukció szempontjából legfontosabb tulajdonságait és részletesen tárgyalta a fény- és színmérés alapjait, bevezetve a világosság fogalmát és a CIE XYZ színteret. Ez a fejezet ezekre az ismeretekre építve bemutatja a televíziós-technikában használt színes-képpont ábrázolás módját, ez alapján bevezetve a jelenleg is alkalmazott analóg és digitális videójel komponenseket.

Videotechnika szempontjából az XYZ színteret ritkán alkalmazzák képpontok színkoordinátáinak tárolására, kivétel ez alól a digitális mozi és mozifilm-archiválási alkalmazások¹. Ugyanakkor az XYZ tér lehetővé teszi a különböző megjelenítők és kamerák által reprodukálható színek halmazának egyszerű vizsgálatát. A következő szakasz ezeket a konkrét videóeszközökre jellemző, ún. **eszközfüggő színtereket** mutatja be.

3.1 Eszközfüggő színterek

Az előző fejezetben láthattuk, hogy az emberi látás trikromatikus jellegének, valamint linearitásának (illetve az egyszerű lineáris modellnek) köszönhetően a látható színek egy lineáris 3D vektortérben ábrázolhatóak, amelyben a vektorok összegzési szabálya érvényes: Két tetszőleges szín keverékéből származó eredő színinger meghatározható a két színbe mutató helyvektor összegeként (függetlenül az eredeti színingereket létrehozó fény spektrumától). Az xy -színpatkón ennek megfelelően két szín összege a két színpontot összekötő szakasz mentén fog elhelyezkedni.

Ebből következik, hogy az emberi látás metamerizmusát kihasználva, a látható színek nagy része előállítható mesterségesen, megfelelően megválasztott alapsínek összegeként. Ez általánosan véve a színes képreprodukció alapja. Természetesen nem

¹Ennek oka, hogy egyrészt reprodukcióra közvetlenül nem használható, hiszen az XYZ alapsínek nem valós színek (az X,Y,Z bázisvektorok helyén nem található látható szín), másrészről a teljes látható színek tartománya igen nagy bitmélységet igényel, ráadásul feleslegesen: Az XYZ tér pozitív térfogatát a látható színek csak részben töltik ki (sok olyan kód lenne, amihez nem tartozik látható szín), ráadásul a ezen belül is a megjelenítők a látható színeknek csak egy részét képesek reprodukálni.

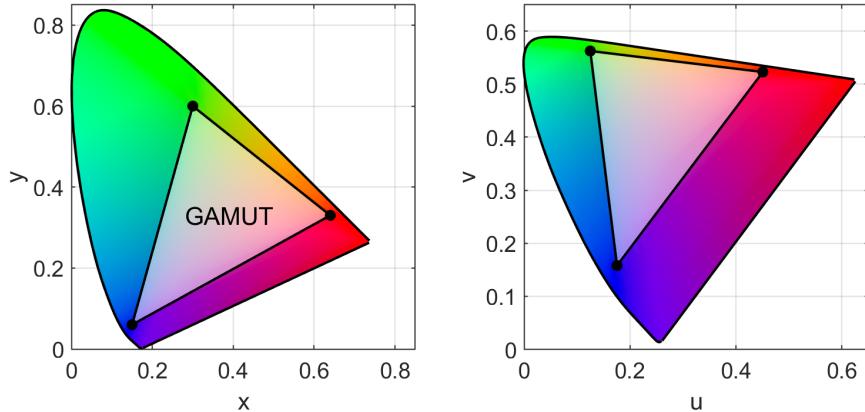


Figure 3.1. Az azonos alapszínekkel dolgozó SD formátum, HD formátum és az sRGB színtér gamutja xy és uv diagramon ábrázolva.

lehet célunk az összes látható szín visszaállítása: Minthogy a színpatkót a spektrál-színek határolják, így elvben végtelen számú spektrál-színt kéne alapszínként alkalmazni az összes látható szín kikeveréséhez. Felmerül tehát a kérdés, hány alapszín szükséges a színpatkó megfelelő lefedéséhez.

A színdiagramban könnyen felvehető 4 színpont úgy, hogy a négy szín keverékeit lefedő négyzet (azaz a reprodukálható színek területe) csaknem azonos területű legyen a látható színek területével. Ugyanakkor az *Luv* színtér színpatkójából láthattuk, hogy az emberi felbontás zöld árnyalatokra vonatkozó felbontása rossz, és az perceptuálisan egyenletes színdiagram inkább háromszög alakú. Ez azt jelenti, hogy három megfelelően megválasztott alapszínnel—amelynek különböző arányú keverékeinek színezete egy háromszögön belül helyezkedik el—az egyenletes színezetű (*uv*) színpatkó jelentős része lefedhető. Ebből kifolyólag az additív színkeverésen alapuló képreprodukciós eszközök szinte kizárolag három megfelelően megválasztott piros, zöld és kék alapszínnel dolgozik. Az ezekből a színekből pozitív együtthatókkal (RGB intenzitásokkal) kikeverhető színek összességét egy adott **eszközfüggő színtérnek** nevezzük. Ezzel ellentétben a kolorimetrikus, abszolút színterek, mint pl. a CIE XYZ, vagy Luv, Lab színterek ún. **eszközfüggetlen színtereknek**. Továbbá az adott eszközfüggő színtérben reprodukálható különböző színezetű színek az *xy*-színpatkóban felvett háromszögét a színtér **gamutjának** nevezik. Egy egyszerű példa színterek gamutjára a 3.6 ábrán látható.

Amennyiben egy RGB színtér teljesen ismert², tetszőleges C színe meghatározhatóak azok az RGB intenzitások, amelyekkel az RGB alapszíneket súlyozva megkaphatjuk a C színt (amennyiben az RGB értékek pozitívak). Ezek az adott C szín RGB koordinátái.

Vizsgáljuk most, hogyan szokás egy adott eszközfüggő (RGB) színtér definiálni

²Természetesen nem csak RGB színterek léteznek, nyomdatechnikában pl a CMYK eszközfüggő színterek elterjedtek, amelyek esetében a négy alapszín a nyomdában alkalmazott tinták színét jelzi. A következőkben a vizsgálatunkat kizárolag RGB színterekre végezzük el.

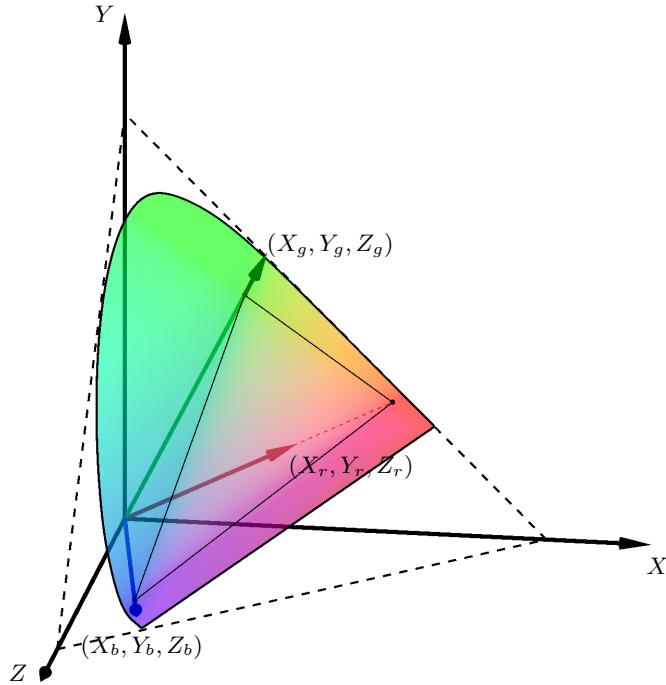


Figure 3.2. RGB színtér alapszíneinek helye, és metszéspontja az egységsíkkal az XYZ színtérben.

a gyakorlatban, azaz hogyan kell megadni a színteret ahhoz, hogy ezután tetszőleges szín RGB koordinátái számíthatók legyenek.

Eszközfüggő színterek definíciója:

Tekintsünk egy három alapszínt alkalmazó RGB színteret. Az R, G és B alapszínek természetesen egy-egy vektorként találhatóak meg az XYZ koordinátarendszerben, és vetületük/metszéspontjuk az egységsíkkal adja meg a színpatkón vett xy -koordinátáikat. Ezt illusztrálja a 3.3 ábra. Az alapszin-vektorok XYZ koordinátáit jelölje rendre

$$\mathbf{r}_{XYZ} = \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}_{XYZ} = \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_{XYZ} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Amennyiben a három alapszin XYZ koordinátái ismertek, úgy a színtér teljesen definiálva van: tetszőleges \mathbf{c}_{XYZ} színvektor koordinátái meghatározhatóak az adott eszközfüggő RGB térben, amely \mathbf{c}_{RGB} vektor tehát azt írja le, milyen súlyozással

keverhető ki az adott C szín az RGB alapszínekből:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}_{RGB}} = \mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB} \underbrace{\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}_{XYZ}}, \quad (3.2)$$

ahol $\mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB}$ egy bázistranszformációs mátrix. Vice versa, az RGB színtérben adott szín XYZ koordinátái meghatározhatóak

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}_{XYZ}} = \mathbf{M}_{RGB \rightarrow XYZ} \underbrace{\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}_{RGB}} \quad (3.3)$$

egyenletből. Természetesen fennáll a $\mathbf{M}_{RGB \rightarrow XYZ} = \mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB}^{-1}$ összefüggés.

Utóbbi transzformációs mátrix egyszerűen meghatározható elemi lineáris algebra ismereteinkkel: $\mathbf{M}_{RGB \rightarrow XYZ}$ mátrix oszlopai egyszerűen az RGB színtér bázisainak XYZ -ben vett reprezentációja, azaz általánosan igaz

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_{RGB \rightarrow XYZ}} = \underbrace{\begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_{RGB \rightarrow XYZ}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix}}_{\mathbf{c}_{RGB}} \quad (3.4)$$

összefüggés³.

A transzformációs mátrixok több szempontból jelentősek: egyrészt lehetővé teszik a különböző színtérkonverziókat (lásd köv. bekezdés), valamint egy adott RGB térben ábrázolt képpont c_Y koordinátája megadja az adott szín relatív fénysűrűségét, azaz világosságát.

Itt jegyezzük meg, hogy az XYZ térben vizsgálva adott RGB bázisvektorokkal a pozitív együtthatókkal kikeverhető színek halmaza egy paralelepipedont feszít ki, azaz adott eszközfüggő RGB színtér az XYZ egy paralelepipedonként ábrázolható. Az RGB együtthatók definíció szerint 0 és 1 között vehetnek fel értékeket. Ennek megfelelően egy adott RGB térben az ebben a színtérben reprodukálható színek egy kockában helyezkednek el, ahol a kocka 3 origóból induló éle mentén az alkalma-zott RGB alapszínek helyezkednek el. Emiatt az RGB színtereket gyakran RGB kockaként említik. A transzformációs mátrixok tehát gyakorlatilag olyan lineáris transzformációt valósítanak meg, amelyek a paralelepipedont kockába, és a kockát paralelepipedonba viszik.

³Az összefüggés érvényessége könnyen tesztelhető pl. $\mathbf{c}_{RGB} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ helyettesítéssel, amely az R

alapszín RGB -ben vett reprezentációja, és (3.4) egyenletben a transzformációs mátrix első oszlopát választja ki.

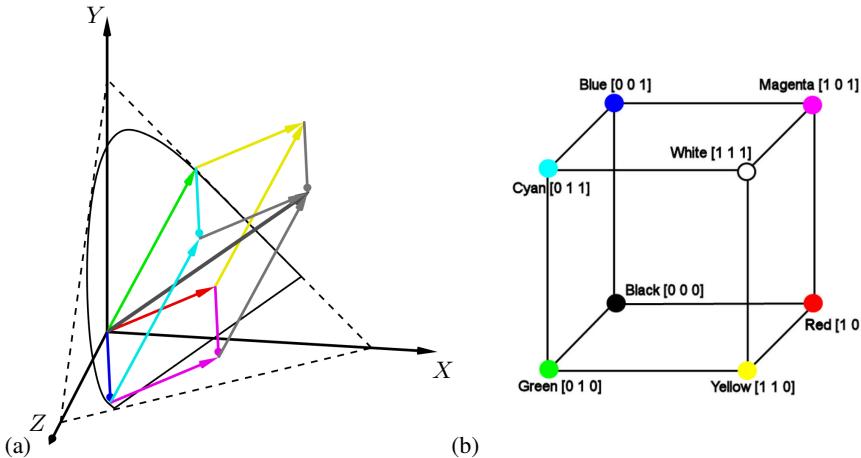


Figure 3.3. Egy adott *RGB* színtér ábrázolása az XYZ térben (a) és az *RGB* kockában (b). Az (a) ábrán szereplő vektorok színe a végpontjukban található szín határozza meg.

Egy *RGB* színtér tehát teljes egészében adott, amennyiben az alapszín-vektorok XYZ koordinátái ismertek (ez tehát 9 koordináta ismeretét jelenti). A gyakorlatban az ilyen definíció helyett az alkalmazott alapszínek színezetét, azaz xy -koordinátáit adják meg. Ennek az oka egyrészt a színtér gamutjának egyszerű ábrázolása (lásd 3.6 ábra), másrészt a fehér szín konzisztens, *RGB* színtértől független relatív fénysűrűsége (Y koordinátája).

Definíció szerint egy adott színtér ún. **fehérpontja** az adott téren elérhető legvilágosabb (legnagyobb fénysűrűségű) pontja, amelyet az alapszínek egyenlő arányú keverékkel érhetünk el. Mivel adott téren a 100%-os fehér a legvilágosabb elérhető szín, ezért definíció szerint a relatív fénysűrűsége (Y koordinátája) egységnyi. A 100%-os fehér tehát hasonlóan az XYZ -hez, definíció szerint

$$\mathbf{w}_{RGB} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \text{és} \quad Y_w = 1. \quad (3.5)$$

A 3.3 ábrán látható példában a fehér szín vektora a paralelepipedon szürkével jelölt föatlója, ezen vonal mentén helyezkednek el a különböző világosságértékű (árnyalatú) fehér színek. A fehér szín színezete, azaz x_w és y_w koordinátái ezen vektor egységsíkkal vett döfespontja határozza meg. Általánosan tehát, definiáltuk az adott *RGB* tér fehérpontját, amelynek érzékelt színezetét az adott alapszínek határozzák meg. Ez más szóval a szín akromatikus pontja, amely kijelzőről kijelzőre változhat, az alkalmazott pl. LCD elemek függvényében.

A három alapszín xy -koordinátái mellett a fehérpont x_w és y_w koordinátái és $Y_w = 1$ fénysűrűsége már elegendő információ szükség esetén a transzformációs mátrixok meghatározásához.

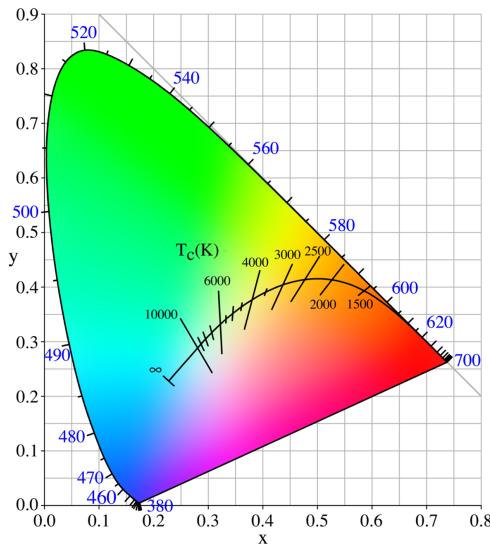


Figure 3.4. Különböző hőmérsékletű feketetest sugárzók által kellett színek összessége, azaz a Planck görbe.

A fehér színről általában:

Látható tehát, hogy a fehér szín önmagában szubjektív fogalom: adott környezetben a leginkább akromatikus fényingert nevezzük fehérnek, amelynek spektrális sűrűségfüggvénye minél inkább egységes (azaz minél több spektrális komponens tartalmaz), és ezzel analóg módon *RGB* színtér esetén a színvektora minél közelebb van a csupa-egy vektorhoz. A fehér fogalom egységesítéséhez vezettek ún. szabványos megvilágításokat (standard illuminants), amelyet szabványosított *RGB* színterek esetén előírnak, mint fehérpont. Ezeknek a szabványos megvilágításoknak a spektrális sűrűségfüggvénye adott (és persze az általa keltett színinger *xy*-koordinátái). Ilyen szabványos megvilágítások a következők:

- E fehér: egyenlő energiájú fehér, a CIE XYZ színtér fehérpontja. Kolorimetria szempontjából jelentős, videotechnikában kevésbé fontos a szerepe, mivel a gyakorlatban nem fordul elő olyan fényforrás, amely minden hullámhosszon azonos energiával sugároz.
- A fehér: a CIE által szabványosított, egyszerű háztartási wolfram-szálas izzó fényét (azzal azonos színérzetet keltő) fényforrás spektruma és színe, 2856 K korrelált színhőmérséklette⁴.
- B és C fehér: Az A fehérből egyszerű szűréssel nyerhető, napfényt szimuláló megvilágítások. A B fehér a déli napsütést modellez 4874 K színhőmérséklettel, míg a C fehér a teljes napra vett átlagos fény színét (spektrumát) modellez 6774 K színhőmérséklettel.

⁴A korrelált színhőmérséklet (correlated color temperature, CCT, T_C) azon feketetest sugárzó hőmérsékletét jelzi, amely az emberi szemben a minősítendő fényforrással azonos színérzetet kelt. A feketetest (hőmérsékleti) sugárzó által keltett színingerek az *xy* színdiagramon az ún. Planck-görbét járják be, amely a 3.4 ábrán látható.

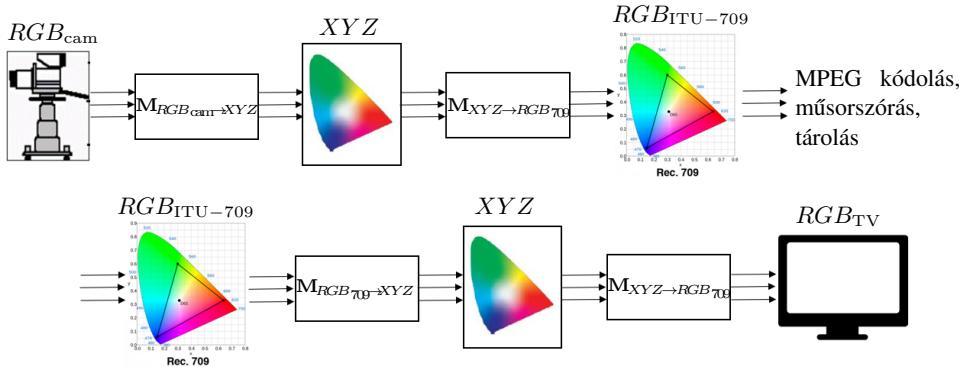


Figure 3.5. Színtér-konverzió folyamatábrája.

- D fehér: szintén a napfény közelítésére alkalmazott megvilágítások sora. Videotechnika szempontjából a legfontosabb a D65 fehér, amely jelenleg is az UHD formátumok színterének szabványos fehérpontja.

Színtér konverziók:

Az eddigiekben látható volt, hogyan definiálható egy eszközfüggő színtér az alapszíneivel. Ahogy az elnevezés is mutatja, ezek a színterek jellegzetesen adott eszközre érvényesek, pl. egy kamera a beépített *RGB* szenzorok, egy kijelző az alkalmazott *RGB* kristályok által meghatározott *RGB* színtérben dolgoznak. Emellett léteznek szabványos *RGB* színterek amely a képi és videotartalom tárolására, továbbítására szolgálnak egységesített, szabványos módon. A következő bekezdés ezeket a szabványos videószíntereket tárgyalja részletesebben. Felmerül tehát a természetes igény az egyes színterek közti átájárásra, amelyet **színtér konverzióknak** nevezünk.

A színtérkonverziót az *XYZ* színtér teszi lehetővé, amely egy eszközfüggetlen, abszolút színtér: egyes színterek közti konverzió a forrás által létrehozott jelek *XYZ* színtérbe való transzformációjával, majd ezen reprezentáció a nyelő színterébe való transzformációval történik. Az *XYZ* színtér így tehát színterek közti átájárást biztosít, ún. Profile Connection Space-ként működik (hasonlóan pl. a gyakran azonos célra alkalmazott *Lab* színtérhez).

Egy tipikus színtér konverziós folyamatot az 3.5 ábra mutat. Tegyük fel, hogy adott egy HD kamera által rögzített képanyag, ahol a kamera színterét *RGB_{cam}* jelöli. A HD formátum szabványos színteret alkalmaz, amelyet az ITU-709 ajánlásban rögzítettek (lásd később). A kamera *RGB* jeleit tehát az esetleges kódolás és tárolás előtt ebbe a HD színtérbe kell konvertálni. Ez a konverzió a kamerajelek *XYZ* térbe, majd innen az ITU-709 színtérbe való konverzióval oldható meg, amely konverziók a megfelelő transzformációsmátrixszal való szorzással valósítható meg:

$$\begin{bmatrix} R_{ITU-709} \\ G_{ITU-709} \\ B_{ITU-709} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB_{709}} \cdot \left(\mathbf{M}_{RGB_{cam} \rightarrow XYZ} \cdot \begin{bmatrix} R_{cam} \\ G_{cam} \\ B_{cam} \end{bmatrix} \right) \quad (3.6)$$

Természetesen az egymás utáni két mátrixszorzás összevonható, így a két *RGB* színtér között közvetlen lineáris leképzés határozható meg. Ez a transzformáció jellegzetesen már a kamerán belül megvalósul. Hasonlóképp, megjelenítőoldalon a

$$\begin{bmatrix} R_{\text{cam}} \\ G_{\text{cam}} \\ B_{\text{cam}} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB_{\text{TV}}} \cdot \left(\mathbf{M}_{RGB_{709} \rightarrow XYZ} \cdot \begin{bmatrix} R_{\text{ITU-709}} \\ G_{\text{ITU-709}} \\ B_{\text{ITU-709}} \end{bmatrix} \right) \quad (3.7)$$

transzformációt kell elvégezni.

Ez az egyszerű transzformációs módszer lehetővé teszi egy adott színtérben mért színpontok másik térré való ábrázolását. Ugyanakkor felmerül a probléma, hogy nagyobb gamuttal rendelkező színterből kisebbre való áttérés esetén az új színtérben nem ábrázolható, gamuton kívüli színek negatív, és egynél nagyobb *RGB* koordináákkal jelennek meg, míg kisebb gamutú térből való áttérés esetén a nagyobb gamutú tér egy része kihasználatlan marad. A probléma megoldására a fenti transzformációk mellett az egyes színterek gamutját valamilyen neplineáris leképzés segítségével lehet egymásra illeszteni (expandálással, kompresszállással). Ezek az ún. gamut-mapping technikák.

A következőkben az egyes SD, HD és UHD videóformátumok tárolására és továbbítására alkalmazott eszközfüggő színtereket vizsgáljuk.

A videótechnika színterei:

Az első kodifikált színmérő rendszer az NTSC (National Television System Committee) által 1953-ban szabványosított színes-televíziós műsorszórásnak alkalmazott, az azt létrehozó bizottság után elnevezett NTSC szabvány volt. A színteret a korabeli foszfortechnológiával létrehozható CRT kijelzők (TV vevők) alapszíneik megfelelően írták elő, így színtérkorrekció vevő oldalon nem volt szükség. Egy egyszerű példa CRT kijelző alapszíneinek meghatározása a következőkben lesz látható. A színmérő rendszer C fehérponttal dolgozott, alapszíneit pedig a 3.1 táblázat mutatja. Az így kapott gamut az xy ábrán látható. Az alapszínekből és a fehérpontból meghatározható az

Table 3.1. Az NTSC szabvány színmérőrendszer

	x	y
R	0.67	0.33
G	0.21	0.71
B	0.14	0.08
C fehér	0.310	0.316

*RGB*_{NTSC} → *XYZ* transzformációs mátrix, amely alakja általánosan

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.17 & 0.2 \\ 0.30 & 0.59 & 0.11 \\ 0 & 0.07 & 1.11 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{NTSC}} \quad (3.8)$$

Az egyenlet második sora kitüntetett szereppel bír: meghatározza, hogy az NTSC színtérben hogyan számítható adott *RGB* színpont világossága:

$$Y_{\text{NTSC}} = 0.30R + 0.59G + 0.11B. \quad (3.9)$$

A világosságjel számítása egészen a HD formátum megjelenése (azaz közel 50 éven keresztül) a fenti egyenlet szerint történt.

Az foszfortechnológia fejlődésével az újabb megjelenítők egyre inkább felaldozták a széles gamutot (azaz a minél telítettebb alapszínek használatát) a minél nagyobb fényerő érdekében: Az alkalmazott foszforok a nagyobb érzékeltek világosság (fénysűrűség) érdekében egyre nagyobb savszélességben sugároztak, így az alapszínek egyre kevésbé telítettek lettek, a gamut tehát csökkent (más szóval: az alapszínek spektruma a Dirac-impulzus helyett—amely teljesen telített spektrálszín lenne—szélesebb görbe lett, így a görbe alatti terület—és ezzel a szín világossága nőtt—de telítettsége csökkent). Mivel így a megjelenítő gamutja jelentősen eltért az NTSC szabványtól, ezért ez a képernyőn látható színek torzulását eredményezte. Ennek megoldásául a TV vevőkbe analóg színtérkonverziós áramkörököt ültettek, amelyek az NTSC és a megjelenítő saját színtere közti konverziót valósította meg⁵. Ettől a ponttól tehát a műsorszórás szabványos színtere és a megjelenítők színtere különbözik.

Az európai színes műsorszórásra az EBU (European Broadcasting Union) a PAL (Phase Alternating Line) rendszert vezette be 1963-ban, újrafelvezetve a színmérőrendszerét, új alapszínekre és D65 fehéret alkalmazva: Ez matematikailag helyesen a transz-

Table 3.2. A PAL szabvány színmérőrendszere

	x	y
R	0.64	0.33
G	0.29	0.60
B	0.15	0.06
D65 fehér	0.3127	0.3290

formációs mátrix és a világosságjel számításának módjának megváltozását jelentené. Praktikussági szempontokból azonban a PAL rendszer az NTSC-vel azonos módon, (3.17) alapján állítja elő a világosságjelet, mivel a gyakorlatban a különbség alig volt látható⁶. Az PAL alapszíneit és a világosságjel számításának módját átvette az első digitális videóformátum, az ITU-601-es SD formátum is 1982-ben.

A HD formátumot az 1990-ben szabványosították az ITU-709-es ajánlás formájában. Ez ugyanúgy átvette az PAL rendszer alapszíneit, azonban immáron matem-

⁵Ahogy látni fogjuk a későbbiekben: a vevőkbe már csak a nem-lineárisan Gamma-előtorzított *RGB* jelek jutottak, ahol az inverz torzítást maga a kijelző hajtotta végre. Emiatt a színtérkonverziót csak Gamma-torzított *R'G'B'* jeleken tudták végrehajtani, ami azonban a telített színeknél ismét látható színezet és fénysűrűség-hibát okozott.

⁶Ennek oka, hogy a világosságjel átviteltechnológia szempontjából fontos: a kamera és a kijelző is *RGB* jeleket használ, a világosságjelet, ahogyan a következőkben látjuk csak a képanyag átviteléhez számítjuk ki.

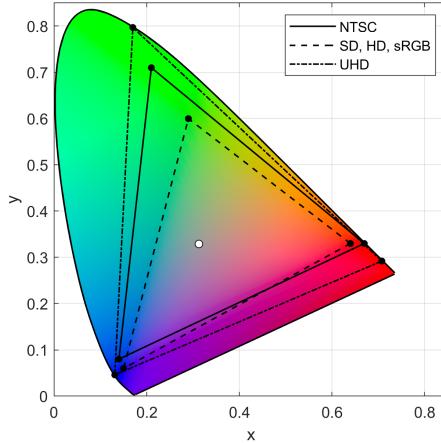


Figure 3.6. Az NTSC, PAL/SD/HD/sRGB és UHD szabványok gamutja az xy -színpatkóban. Az NTSC jóval nagyobb gamuttal dolgozott, mint a ma is használt HD és sRGB formátumok. Ennek oka, hogy a korai CRT megjelenítők ugyan telítetebb, de ugyanakkor kisebb fényszűrűségű és nagy időállandójú foszforokkal dolgoztak, amivel bár nagy színtartományt tudtak megjeleníteni, de kis fényerővel, és mozgó objektumoknál a képernyőn akaratlanul is nyomokat hagyva.

atikailag precízen, újraszámította a transzformációs mátrixot és a világosságjel együtthatókat, amely tehát HD esetén

$$Y_{\text{ITU}-709} = 0.2126 R + 0.7152 G + 0.0722 B. \quad (3.10)$$

alapján számítható. Fontos megjegyezni, hogy az ITU-709 szabvány színmérőrendszerét átvette az sRGB szabvány is, ami a mai napig a számítógépes alkalmazások (és operációs rendszerek) alapértelmezett színterül szolgál.

Az alkalmazott alapszíneket végül számottevően csak az UHD formátum változtatta meg az ITU-2020 számu ajánlásában 2012-ben. Az UHD alkalmazásokra a szabvány egy széles gamutú, spektrál-alapszíneket alkalmazó színteret ajánl a 3.3 táblázatban látható paraméterekkel. A szabvány természetesen újradefiniálta a világosság kom-

Table 3.3. Az ITU-2020 szabvány színmérőrendszer

	x	y
R	0.708	0.292
G	0.17	0.797
B	0.131	0.046
D65 fehér	0.3127	0.3290

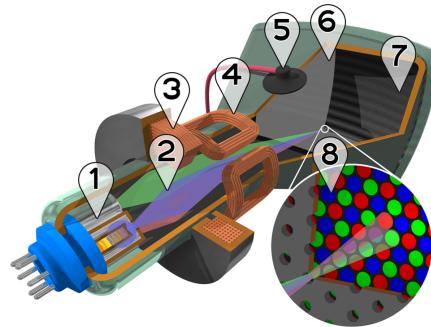


Figure 3.7. CRT megjelenítő felépítése.

ponens számításának a módját is, amely tehát UHD esetben

$$Y_{\text{ITU}-2020} = 0.2627 R + 0.678 G + 0.0593 B \quad (3.11)$$

alapján számítható. A szabvány természetesen nem igényli, hogy az UHD megjelenítők spektráliséneket legyenek képesek alapszínekkel realizálni, a minél szélesebb gamut inkább a jövőbeli technológiák szempontjából ad ajánlást. A mai konzumer megjelenítők az UHD képanyagot megjelenítés előtt a saját színterükben konvertálják, amely jellegzetesen jóval kisebb a szabvány színterénél.

Példa CRT kijelző eszközfüggő színterére:

Egyszerű példaként az eddig leírtakra vizsgáljuk, hogyan számítható és illusztrálható egy CRT kijelző által megjelenített színek tartománya, röviden rávilágítva a CRT technológia működési elvére is.⁷ Bár a CRT technológia kezd egyre inkább eltűnni, néhány évvvel ezelőttig a stúdiómonitorok jelentős része még mindig CRT alapon működött köszönhetően a színű megjelenítésüknek, és a mai LCD megjelenítőkhöz képest is jóval nagyobb statikus kontrasztjuknak.

A katódsugárcsöves (CRT) kijelzők sematikus ábrája az 3.7 ábrán látható. A CRT-k kijelzők működésének alapja három ún. elektronagyú volt, amelyek egy fűtött katóból (1) és egy nagyfeszültségre helyezett anóból állt. A melegítés hatására a katód környezetébe szabad elektronok léptek ki, így egy elektronfelhőt képezve a katód körül. A katód közelébe helyezett nagyfeszültségű (néhány száz Volt) gyorsítóanód hatására a szabad elektronok az anód felé kezdtek mozogni, egy szabad elektronáramot (2) indítva a vákuumban (ugyanezben az elven működtek a vákuum-diódák, triódák, pentódák, stb. is). Elegendően nagy anódfeszültség (és további anódok jelenléte) esetén az elektronok jelentős része nem csapódott be a gyorsítóanódra, hanem továbbhaladt. Ezt az elektronnyalábot elektrosztatikusan és mágnesesen (3) fókuszálták, majd egy vezérelt mágneses eltérítő (4) sorrol sorra végigfuttatta azt egy anódfeszültségű-ernyőn (5), azaz a képernyőn. Színes kijelző esetén természetesen három elektronagyú üzemelt

⁷Természetesen az itt leírtak változtatás nélkül alkalmazhatók más technológia alapján működő kijelzőkre is, pl. LCD.

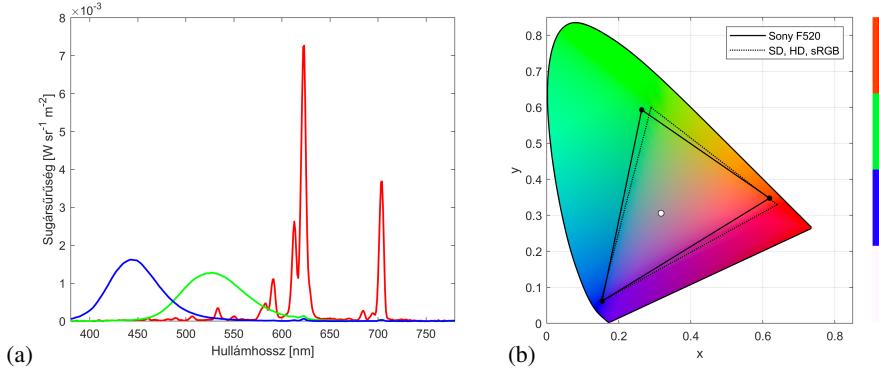


Figure 3.8. CRT megjelenítő foszforai által kibocsátott sugárzás spektrális sűrűségfüggvénye (a) a megjelenítő gamutja és az adott spektrumok/alapszínek által keltett színérzet, valamint a színtér fehérpontja (b). A jobb oldali oszlop bal fele a Sony monitor alapszíneit és fehérpontját, a jobb fele az sRGB színtér alapszíneit és fehérpontját szemlélteti.

párhuzamosan. A képernyő felszínét pixelre bontva képpontonként három különböző foszforral borították (7-8), amely gerjesztés (becsapódó elektronok) hatására bizonyos ideig adott spektrális sűrűségfüggvényű fényt bocsátott ki⁸, realizálva ezzel az *RGB* alapszíneket.

Tekintsünk példaként egy Sony F520 CRT kijelzőt: A kijelző *RGB* foszforai gerjesztés hatására a 3.8 (a) ábrán látható spektrális sűrűségfüggvényű (sugársűrűségű) fényt bocsátanak ki magukban egységnyi felületről, egységnyi térszögbe, azaz rendelkezésre állnak a $L_e^R(\lambda)$, $L_e^G(\lambda)$ és $L_e^B(\lambda)$ függvények. Ekkor a $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ szabványos *XYZ* spektrális színösszetevő függvények alkalmazásával a piros alapszín színkoordinátái rendre

$$\begin{aligned}\bar{X}_R &= \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e^R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda = 0.0633 \\ \bar{Y}_R &= \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e^R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda = 0.0373 \\ \bar{Z}_R &= \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_e^R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda = 0.0035\end{aligned}\quad (3.12)$$

és persze hasonlóan számíthatóak az zöld és kék alapszínek *XYZ*-koordinátái, az integrálok numerikus kiértékelésével. A színtér fehérpontja definíció szerint az alapszínvektorok egyenlő súlyú összegeként áll elő, azaz

$$\bar{X}_W = \bar{X}_R + \bar{X}_G + \bar{X}_B, \quad \bar{Y}_W = \bar{Y}_R + \bar{Y}_G + \bar{Y}_B, \quad \bar{Z}_W = \bar{Z}_R + \bar{Z}_G + \bar{Z}_B, \quad (3.13)$$

⁸Ellentétben a fluoreszkáló anyagok csak a gerjesztés fennállásának idején bocsátanak ki fényt. A foszforeszkálás időállandója előnyös, hiszen megfelelően megválasztott foszforok épp egy képidőig bocsátanak ki fényt, így a kijelzett kép nem fog villogni. Ugyanakkor a korai kijelzők ezen időállandója túl nagy volt, ezért a gyors mozgások elmosótak a kijelzett képen.

amelyből az alapszínvektorok pontos hossza meghatározható, hiszen definíció szerint $Y_W = 1$ érvényes (az alapszínvektorok eszerint normálandók). Így az alapszínvektorok, és így a színtér alkalmazásához szükséges transzformáció mátrixok a következők:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.5646 & 0.2665 & 0.2068 \\ 0.3174 & 0.5992 & 0.0834 \\ 0.0302 & 0.1443 & 1.0539 \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}_{RGB \rightarrow XYZ}} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{F520} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB} = \mathbf{M}_{RGB \rightarrow XYZ}^{-1}$$

Az alapszínek és a fehérpont színezete ezután

$$x_R = \frac{X_R}{X_R + Y_R + Z_R}, \quad y_R = \frac{Y_R}{X_R + Y_R + Z_R} \quad (3.15)$$

alapján számolható. Az így meghatározott színtér gamutja a 3.8 ábrán látható, az alapértelmezett számítógépes sRGB színtérrel együtt.

Természetesen jelen esetben a színtér a megjelenítő színterének alapszíneinek ábrázolásához az XYZ térben adott alapszíneket az RGB térbe kell konvertálni. Jelen dokumentum sRGB színtérben kerül tárolásra (és megjelenítéskor az sRGB színtér az olvasó kijelzőjének saját színterébe transzformálva), így jelen dokumentumban az XYZ koordinátáival adott alapszínek az sRGB térbe való konverzió után kerülhetnek megjelenítésre, amely pl. a vörös alapszínrre

$$\begin{bmatrix} R_R \\ G_R \\ B_R \end{bmatrix}_{sRGB} = \mathbf{M}_{XYZ \rightarrow RGB_{sRGB}} \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.13 \\ 0.25 \\ -0.02 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

alakú. A Sony megjelenítő alapszíneinek sRGB koordinátáira negatív és 1-nél nagyobb RGB értékek is adódnak. Ez a 3.8 ábrán is látható gamutok közti eltérést tükrözi.

3.2 A TV-technika színkülönbségi színtere

Az előző szakasz bemutatta egy színes képpont ábrázolásának módját adott RGB eszközfüggő színtérben. A következő felmerülő kérdés, hogy ezekből az RGB jelekből—amelyek tehát egy pontja egy megjelenítendő képelem RGB koordinátáit írja le—hogyan hozhatóak létre a ténylegesen rögzített és továbbított videójelek.

A világosság és színkülönbségi jelek:

A fő oka, hogy a videójeleket nem közvetlenül az RGB jeleknek választották (bár manapság már gyakori a közvetlen RGB ábrázolás) az NTSC bevezetésének idejében a visszafelé kompatibilitás biztosítása volt: A színes műsorszórás kezdetén a korabeli háztartásokban szinte kizárálag fekete-fehér TV-vevők voltak találhatók. Természetes

volt az igény a már kiépített fekete-fehér műsorszóró rendszerrel visszafelé kompatibilitása színes kép-továbbításra.

A fekete-fehér kép gyakorlatilag egy színes kép világosságinformációjának fogható fel, amely az *RGB* koordinátákból azok lineáris kombinációjaként számítható. Az együtthatók az adott eszközfüggő színtérétől függenek, az NTSC alapszínei esetén pl. 3.17 alapján adottak. Mivel a fekete-fehér TV vevők közvetlenül ezt a világosságjelet jelenítették meg, ezért a színes TV esetén is az egyik, változatlanul továbbítandó jelet a **világosságjelnek (luminance)** választották, amely tehát például NTSC esetén az *RGB* jelekből

$$Y_{\text{NTSC}} = 0.30R + 0.59G + 0.11B. \quad (3.17)$$

alapján számítható⁹.

Egy színes képpont leírásához 3 komponens szükséges, egy lehetséges és hatékony leírás pl. a képpont világossága, színezete és telítettsége. A világosság-jel mellé tehát két független információ kell, amelyek egyértelműen meghatároz-zák az adott színpont színezetét és telítettségét¹⁰. Ugyanakkor fontos szempont volt ezen világosságinformáció-mentes, pusztán színinformációt leíró jelek könnyű számíthatósága az *RGB* komponensekből az egyszerű analóg áramköri megvalósíthatóság érdekében.

A színinformáció/világosságinformáció-szétválasztás legegyszerűbb (de jól működő) megoldásaként egyszerűen vonjuk ki a világosságot az *RGB* jelekből. Mivel az *Y* együtthatók összege definíció szerint (tetszőleges színtérben) egységnyi, így pl. NTSC esetén (3.17) minden oldalából *Y*-t kivonva igaz a

$$0.30(R - Y) + 0.59(G - Y) + 0.11(B - Y) = 0 \quad (3.18)$$

egyenlőség. Az $(R - Y)$, $(G - Y)$ és $(B - Y)$ a TV-technika ún. **színkülönbségi jelei**, és a következő tulajdonságokkal bírnak:

- Nem függetlenek egymástól, kettőből számítható a harmadik.
- Előjeles mennyiségek.
- Ha két színkülönbségi jel zérus, akkor a harmadik is az. Ekkor $R = G = B = Y$, így tehát a színtér fehérpontjában vagyunk. A fehér színre kapott zérus színkülönbségi jelek azt mutatják, hogy a színinformációt valóban a színkülönbségi jelek jelzik, a fénysűrűség (világosság) pedig tőlük független mennyiség.
- Az adott színkülönbségi jel értéke maximális ha a hozzá tartozó alapszín maximális, és vice versa. NTSC rendszerben vörös színkülönbségi jelre $R = 1$, $G = B = 0$ esetén

$$Y = 0.30 \cdot 1 + 0.59 \cdot 0 + 0.11 \cdot 0 \rightarrow R - Y = 0.7, \quad (3.19)$$

⁹Fontos ismét kihangsúlyozni, hogy a világosság-számítás módja színtérfüggő, az alapszínektől és a fehérponttól függ a már bemutatott módon.

¹⁰A visszafelé-kompatibilitás biztosításához ezt a két színezetet leíró jelet kellett az NTSC rendszerben a változatlan fekete-fehér jelhez úgy hozzáadni, hogy a meglévő fekete-fehér vevők a világosságjelet demodulálni tudják, és a hozzáadott többletinformáció minimális látható hatással legyen a megjelenített képre.

és hasonlóan $R = 0, G = B = 1$ esetén

$$Y = 0.30 \cdot 0 + 0.59 \cdot 1 + 0.11 \cdot 1 \rightarrow R - Y = -0.7. \quad (3.20)$$

- A fenti megfontolások alapján a színkülönbségi jelek dinamikatartománya:

$$\begin{aligned} -0.7 \leq R - Y \leq 0.7, \quad & -0.89 \leq G - Y \leq 0.89, \\ & -0.41 \leq B - Y \leq 0.41 \end{aligned} \quad (3.21)$$

A három színkülönbségi jelből kettőt kell választani a színpont színinformációjának leírásához. Mivel jel/zaj-viszony szempontjából ökölszabályszerűen minden a nagyobb dinamikatartományú jelet célszerű továbbítani, így a választás a vörös és zöld színkülönbségi jelekre esett.

A videotechnikában tehát egy adott színpont ábrázolása a

$$\begin{aligned} Y &: \text{Luminance} \\ \left. \begin{array}{c} R - Y \\ B - Y \end{array} \right\} &: \text{Chrominance} \end{aligned}$$

ún. **luminance-chrominance térben** történik, amely gyakorlatilag felfogható egy új színmérőrendszernek is az RGB színtérhez képest.

Az $Y, R - Y, B - Y$ színtér:

Vizsgáljuk most, hol helyezkednek el az adott RGB eszközfüggő színtérben ábrázolható színek ebben az új, $Y, R - Y, B - Y$ térben! Az előzőekben láthattuk, hogy az XYZ térben ez a színhalmaz egy paralelepipedont, az RGB térben egy egységnyi oldalú kockát jelent (lásd 3.3 ábra). Vegyük észre, hogy a $Y, R - Y, B - Y$ koordinátákat akár az XYZ , akár az RGB komponensekből egy lineáris transzformációval előállíthatjuk: Maradva az NTSC rendszer világosság-együttetőinál (kiindulva abból, hogy $Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$) a transzformáció alakja

$$\begin{bmatrix} R - Y \\ B - Y \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7 & -0.59 & -0.11 \\ -0.3 & -0.59 & 0.89 \\ 0.3 & 0.59 & 0.11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{NTSC}}. \quad (3.22)$$

A lineáris transzformációt az RGB kockán elvégezve megkaphatjuk az ábrázolható színek halmazát. Az így kapott test az 3.9 (a) ábrán látható. Láthatjuk, hogy az RGB egységkocka egy paralelepipedonba transzformálódott, ahol a paralelepipedon főátlója az Y világosság tengely. Ennek mentén, az $R - Y = B - Y = 0$ tengelyen helyezkednek el a különböző szürke árnyalatok.

Az eredeti RGB kockához hasonlóan, paralelepipedon főátlón kívüli csúcsaiban (amelyben az $Y = 0$ fekete és az $R = G = B = Y = 1$ fehér található) az eszközfüggő színtér egy, vagy két 100 %-os intenzitású alapszínnel kikeverhető

$$R = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad Cy = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad Mg = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad Ye = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

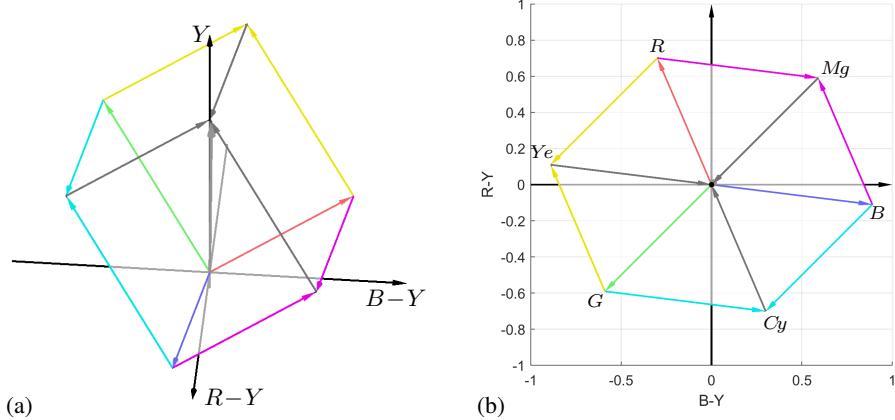


Figure 3.9. Az $Y, R - Y, B - Y$ színtér ábrázolható színeinek halmaza oldalnézetből (a) és felülnézetből (b).

vörös, zöld, kék alap- és cián, magenta, sárga ún. komplementer színek találhatóak.

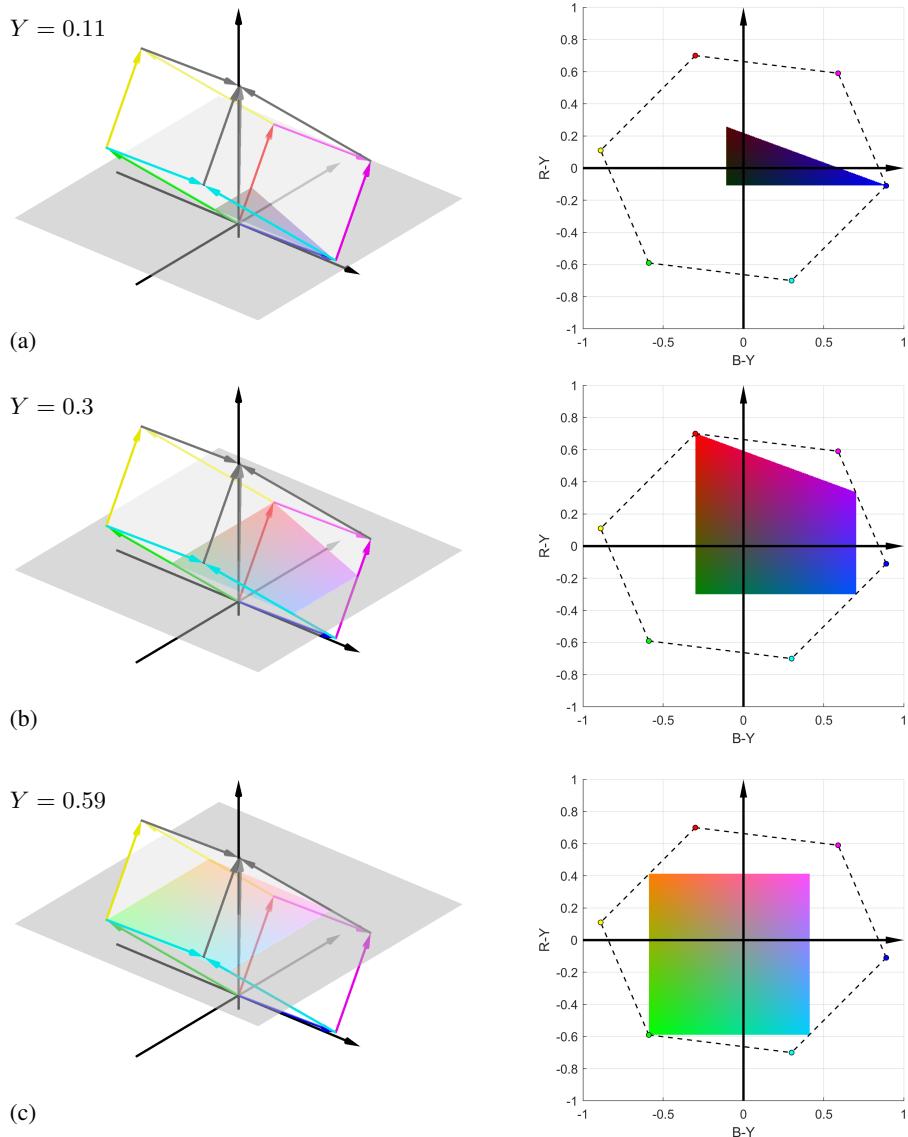
Ezen komplementer színek tulajdonsága, hogy az egyes RGB alapszínekkel RGB kockában átlósan helyezkednek el, így a színtérben a lehető legmesszebb elhelyezkedő színpárokat alkotják. Ennek megfelelően egymás mellé vetítve a komplementer színpárok (vörös-cián, sárga-kék, zöld-magenta) váltják ki a legnagyobb érzékelt kontrasztot.

A paralelepipedonra az Y -tengely irányából ránézve (3.9 (b) ábra) láthatjuk a világosságjeltől függetlenül, adott színtérben kikeverhető színek összességét. Az $R - Y, B - Y, Y$ térben gyakori adott Y világosság mellett a színek ezen $R - Y, B - Y$ síkon való ábrázolása. Minthogy az $R - Y, B - Y$ jelek meghatározzák adott színpont színezetét és telítettségét, így az ábra azt jelzi, hogy a különböző színezetű és telítettségű színek egy szabályos hatszöget töltenek ki. A hatszög csúcsai a színtér alap- és komplementerszínei. Természetesen adott Y érték mellett az ábrázolható színek nem tölti ki teljesen ezt a hatszöget: adott világosságérték mellett az ábrázolható színek halmaza a $Y, R - Y, B - Y$ paralelepipedon egy adott Y magasságban húzott síkkal vett metszeteként képzelhető el, azaz tetszőleges $0 \leq Y \leq 1$ esetén rajzolható egy $R - Y, B - Y$ diagram. Az így rajzolható diagramokra példákat a 3.10 ábra mutat. Nyilván rögzített Y mellett nem biztos, hogy minden szín 100 %-os telítettséggel van

jelen a $B - Y, R - Y$ diagramon. Például: teljesen telített kékre $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} Y = 0.11$, azaz

a 100 % intenzitású kék alapsín ezen magasságban vett diagramon található. Más magasságban vett $B - Y, R - Y$ diagramon csak fehérrel higított kék található, azaz nem teljesen telített kék található.

A vizsgált diagramokból leszűrhető, hogy valóban, a világosságjel független a színinformációtól, adott színpont színezetét és telítettségét pusztán az $R - Y$ és $B - Y$ diagramokon vett helye meghatározza. Vizsgáljuk most, hogyan definiálhatók ezen érzeti

Figure 3.10. Különböző Y értékek mellett rajzolható $B - Y, R - Y$ diagramok.

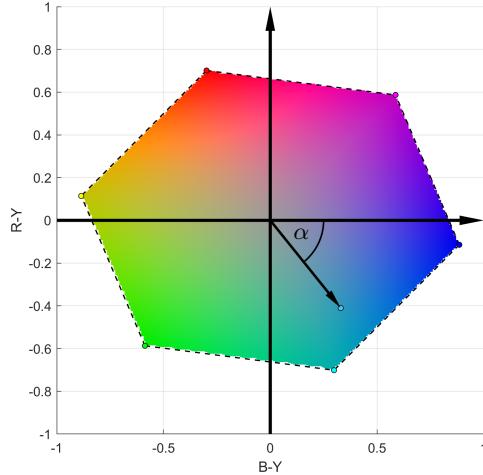


Figure 3.11. Adott $Y, R - Y, B - Y$ térben ábrázolható színek gamutja.

jellemzők, azaz a színezet és telítettség a TV technika $Y, R - Y, B - Y$ színterében!

A könnyebb elképzelhetőség kedvéért ábrázoljuk az $R - Y, B - Y$ koordinátákhoz tartozó színeket, az adott színponthoz tartozó olyan világosságérték mellett, amely esetén minden pontra teljesül, hogy $X + Y + Z = 1$, azaz ezzel gyakorlatilag az adott RGB színtér xy -színpatkón vett színét képezzük le az $R - Y, B - Y$ diagramra. Az így kapott színhalmaz, amely felfogható az adott alapsínek mellett a luminance-chrominance tér gamutjának is, a 3.11 ábrán látható.

Megfigyelhető, hogy a diagramon az origóból kiinduló félegyenesen azok a színek vannak, amelyek egymásból kinyerhetők fehér szín hozzáadásával. Tehát az origóból kiinduló félegyenesen az azonos színezetű, de eltérő telítettségű színek vannak. Azaz tetszőleges színpontot vizsgálva, a $B - Y, R - Y$ diagramon a színpontba mutató helyvektor irányában egyértelműen meghatározza az adott pont színezetét. Ennek megfelelően a TV technikában a színezetet a $B - Y, R - Y$ diagramon a színpont helyvektorának irányszögeként definiáljuk:

$$\text{színezet}_{\text{TV}} = \alpha = \arctan \frac{R - Y}{B - Y} \quad (3.24)$$

A telítettség kifejezése már kevésbé egyértelmű, több definíció bevezethető rá. Mindkét esetben a telítettség természetesen azt fejezi ki, mennyi fehér hozzáadásával keverhető ki egy adott szín a színezetét meghatározó teljesen telített alapsínból. Az XYZ -térben bevezettük a telítettségre a színtartalmat, illetve színsűrűséget. Mindkét telítettségdefiníció zérus értékű volt a C -fehérre, és egységnyi a színpatkót határoló spektrálszínekre. Felmerül a kérdés, hogyan terjeszthető ki a telítettség fogalma eszközfüggő RGB -színterekre.

Ehhez bevezethetjük az **kávzi-spektrálszínek** fogalmát, amelyek adott RGB színtérben előállítható legtelítettebb színek (a legközelebb vannak az azonos színezetű valódi spektrálszínhez). Ennek megfelelően a kvázi-spektrálszínek az xy -diagramon

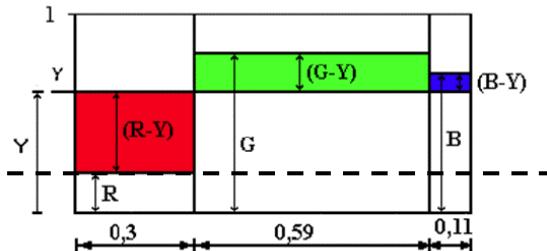


Figure 3.12. Tetszőlegesen választott R, G, B koordináták esetén rajzolható területdiagram.

az adott RGB színtér gamutjának határán helyezkednek el, tehát kikeverhetőek legfeljebb két alapszínből. Hasonlóképp, 3.11 diagramon a színteret határoló hatszög csúcsaiban és oldalin találhatók.

A telítettség ezek után a következő módokon definiálható.

- Minthogy egy tetszőleges színnek a fehér színtől, azaz az origótól vett távolsága arányos a szín fehér-tartalmával, így legegyszerűbb módon a telítettség közelíthető a

$$\text{telítettség}_{\text{TV},1} = \sqrt{(R - Y)^2 + (B - Y)^2} \quad (3.25)$$

távolsággal. Később tárgyalt okok miatt az analóg időkben TV technikusok körében ez a definíció volt érvényben. Az így számolt telítettség valóban 0 a fehér színre, azonban a kvázi-spektrálszínek telítettsége így nem egységnyi.

- A matematikailag korrekt telítettség-definíció bevezetéséhez kiterjeszhetjük a korábban megismert színsűrűséget eszközfüggő színterekre ¹¹. Ennek egyszerűbb értelmezéséhez ábrázoljuk adott színpont paramétereit ún. területdiagramon! A területdiagram a következő módon rajzolható fel egy tetszőleges RGB koordinátáival adott szín esetén: A vízszintes tengelyt osszuk fel az Y fénysűrűség RGB együtthatójának megfelelően, majd az egyes RGB komponenseket ábrázoljuk az intenzitásuknak megfelelő magasságú oszlopokkal. Ekkor egy Y magasságban húzott vonal alatt és fölött a színkülönbségi jeleknek megfelelő magasságú oszlopok alakulnak ki, amely oszlopok előjelesen vett területeinek összege (3.18) alapján zérus.

Válasszuk ki ezután a legkisebb RGB komponensem (a 3.13 ábrán látható példában az R) és húzzunk egy vízszintes vonalat ennek magasságában! Ekkor a vizsgált színt két részre osztottuk: egy fehér színre (amelyre $R = G = B$) és egy kvázi-spektrálszínre, amelynek az egyik RGB komponense zérus, és amelynek fénysűrűsége $Y_d = \min(R, G, B) - Y$. A domináns hullámhosszú spektrálszín szerepét erre a kvázi-spektrálszínre cserélve kiterjeszhetjük a színsűrűséget az adott eszközfüggő színtérre, amely alapján a telítettség definíciója

$$\text{telítettség}_{\text{TV},2} = \frac{|\min(R, G, B) - Y|}{Y}. \quad (3.26)$$

¹¹Ismétlésként: az XYZ térben adott pont színsűrűsége $p_c = \frac{Y_d}{Y}$, ahol Y_d az adott színhez tartozó domináns hullámhosszú szín fénysűrűsége, Y a vizsgált szín saját színsűrűsége.

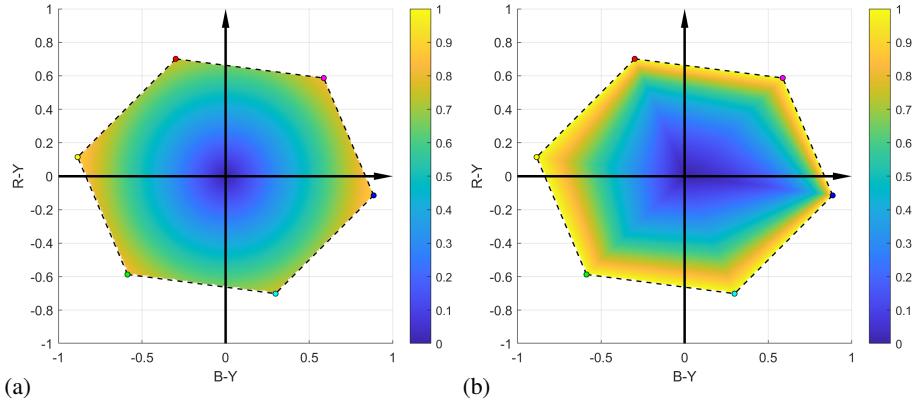


Figure 3.13. Az $R - Y$, $B - Y$ térben ábrázolt színek telítettsége (3.25) (a) és (3.26) (b) alapján számolva

Könnyen belátható, hogy az $R = G = B = Y$ fehérpontokra a telítettség definíció szerint 0, míg kvázi-spektrálszínekre ($\min(R, G, B) = 0$) a telítettség azonosan 1.

A fent tárgyat két telítettség-definíció alkalmazásával a 3.11 ábrán látható színek telítettségét az xy ábra szemlélteti, megerősítve az eddig elmondottakat.

3.3 Videójel komponensek

3.4 A digitalizálás kérdései