

Számítógépes Grafika

1. előadás: bevezető, emberi látás és megjelenítőeszközök

Bán Róbert

`rob.ban@inf.elte.hu`

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar

2025-2026. tavaszi félév

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

Bemutakozás és elérhetőségek

- Előadó: Bán Róbert
- E-mail: `rob.ban@inf.elte.hu`
 - A levél tárgyában szerepeljen a [BScGraf]
- Szoba: D 2.706
- Konzultáció: emailés egyeztetés után
- Információk: `canvas.elte.hu`

Előadás

- IP-24[e]KVISZGE, IPM-24[E]sztKVSZGE
- Előfeltétel BSc-n: számítógépes grafika gyakorlat (gyenge)
- Szükséges előismeret: lineáris algebra
- Jegyszerzés: Két írásbeli részvizsga alapján
 - 1 Első az anyag felénél, második a félév végén
 - 2 Kb. 50%-50% elméleti és gyakorlati feladatok
- Vizsgaidőszakban: csak pót-részvizsga és UV-k
- Katalógus: catalog.inf.elte.hu
- Tananyag: Canvas-on (diasorok az év közben folyamatosan lesznek feltöltve, a tavalyiak elérhetőek)

Ajánlott irodalom

Magyar nyelvű irodalom:

- ① *Szirmay-Kalos László, Antal György, Csonka Ferenc:*
Háromdimenziós grafika, animáció és játékfejlesztés,
ComputerBooks, 2003. (Már elfogyott, de a szerző
honlapjáról elérhető:
<https://cg.iit.bme.hu/~szirmay/3Dgraf.pdf>)
 - A gyakorlat során már újabb OpenGL-t használunk! (És nem is fogadunk el deprecated kódot)
 - Apróbb, formális különbségek is vannak (sorvektorok, transzponált mátrixok stb.)

Ajánlott irodalom

Angol nyelvű irodalom:

- 1 *Andrew Glassner* (most már) ingyenesen elérhető könyvét ajánlom az érdeklődőknek:
http://realtimerendering.com/Principles_of_Digital_Image_Synthesis_v1.0.1.pdf
- 2 Aki később is komolyabban akar grafikával foglalkozni pedig ezeket is ismerje meg mindenképpen:
 - *Akenine-Möller, Haines, Hoffman*: Real-Time Rendering (3rd edition)
 - *Pharr, Humphreys, Hanrahan*: Physically Based Rendering (From Theory to Implementation)

Gyakorlatok

- IP-18[e]KVISZGG, IPM-18[E]sztKVSZGG
- Előfeltétel BSc-n: matalap (IP-18[e]MATAG), imperatív programozás (IP-18[e]IMPROGEG)
- Koordinátor: Bán Róbert
 - Email: `rob.ban@inf.elte.hu` (tárgy: [BScGraf]...)
 - De elsősorban a saját gyakorlatvezetőjének írjon mindenki
- Jegyszerzés: géptermi zárthelyi
 - Félév közben egy kis beadandó program

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

Mi a számítógépes grafika?

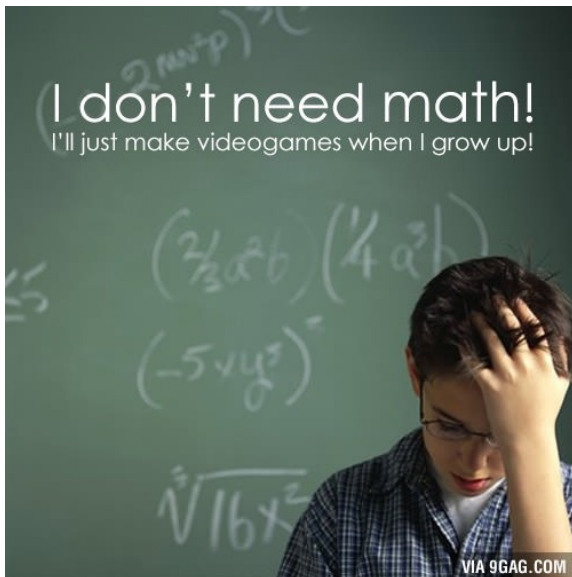
- Alkalmazott tudományterület, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni

Mi a számítógépes grafika?

- Alkalmazott **tudományterület**, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni
- Ezzel jár, hogy erős elméleti háttér szükséges a megoldandó probléma leírásának megértéséhez

Mi a számítógépes grafika?

- **Alkalmazott** tudományterület, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni
- De ezt az elméleti (javarészt matematikai) apparátust *használni* is kell
- Nem elég a képleteket ismerni









$$L_o(\mathbf{x}, \omega) = L_e(\mathbf{x}, \omega) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{x}, \omega') (\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega$$

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

Számítógépes Grafika

- A **számítógépes grafika** az informatika tudomány egy ága.
- Feladata: vizuális anyagok
 - előállítása
 - elemzése
 - feldolgozása

Képmanipulálás



Brandon Christopher Warren, flickr

Képfeldolgozás és képelemzés

- Képfeldolgozás

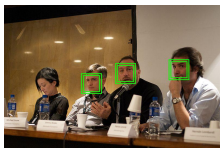


Képfeldolgozás és képelemzés

- Képfeldolgozás



- Képelemzés



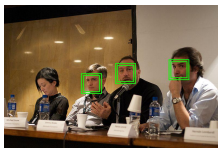
Beatrice Murch and OpenCV

Képfeldolgozás és képelemzés

- Képfeldolgozás



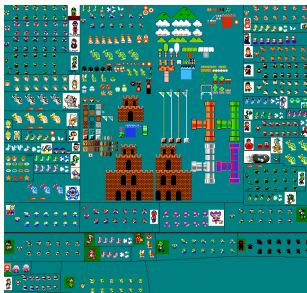
- Képelemzés



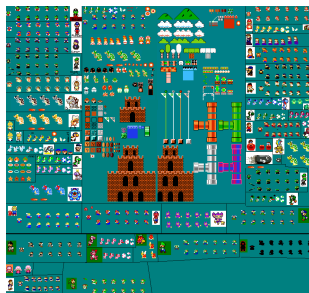
Beatrice Murch and OpenCV



2D: Modell → Kép



2D: Modell → Kép



3D: Modell → Kép



3D: Modell → Kép



A számítógépes grafika eszközei

- Ezen az előadáson a képek előállításával foglalkozunk
- Ehhez szükségünk van arra, hogy
 - el tudjuk tárolni a számítógépen a megjeleníteni kívánt virtuális világot (**reprezentáció**),
 - a reprezentációt meg tudjuk jeleníteni (**képszintézis**),
 - a megjelenítést pedig megfelelő eszközökön kell elvégezni (**megjelenítők**).

Képszintézis

Kérdések:

- Hogyan írjuk le a világot? – Modellezés
 - Ebben a félévben: geometriai modellek, fény–felület kölcsönhatás – matematikai és fizikai modellek
 - MSc: A számítógépes grafika matematikai alapjai
 - MSc: Felület- és testmodellezés
 - Szab.vál.: 3D modellezés Maya-val

Képszintézis

Kérdések:

- Hogyan írjuk le a világot? – Modellezés
 - Ebben a félévben: geometriai modellek, fény-felület kölcsönhatás – matematikai és fizikai modellek
 - MSc: A számítógépes grafika matematikai alapjai
 - MSc: Felület- és testmodellezés
 - Szab.vál.: 3D modellezés Maya-val
- Hogyan számítjuk ki a képet? – Algoritmusok
 - Ebben a félévben: sugárkövetés és inkrementális képszintézis
 - Folytatás: Középhaladó grafika GY, Haladó grafika EA+GY

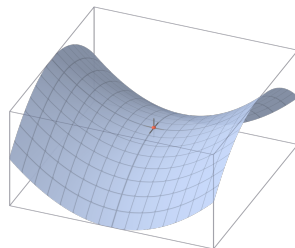
Képszintézis

Kérdések:

- Hogyan írjuk le a világot? – Modellezés
 - Ebben a félévben: geometriai modellek, fény–felület kölcsönhatás – matematikai és fizikai modellek
 - MSc: A számítógépes grafika matematikai alapjai
 - MSc: Felület- és testmodellezés
 - Szab.vál.: 3D modellezés Maya-val
- Hogyan számítjuk ki a képet? – Algoritmusok
 - Ebben a félévben: sugárkövetés és inkrementális képszintézis
 - Folytatás: Középhaladó grafika GY, Haladó grafika EA+GY
- Hogyan jelenítjük meg azt? – Eszközök
 - Ezen az órán egy rövid áttekintő

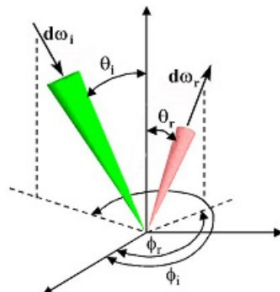
Modellezés

- Geometriai modellek



Modellezés

- Geometriai modellek
- Optikai paraméterek



Modellezés

- Geometriai modellek
- Optikai paraméterek
- Textúrák



Modellezés

- Geometriai modellek
- Optikai paraméterek
- Textúrák
- *mind lehet generált, mért, fényképezett stb.*

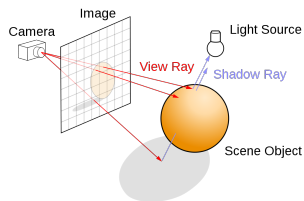
Algoritmusok

Megközelítési módok

Algoritmusok

Megközelítési módok

- Sugárkövetés

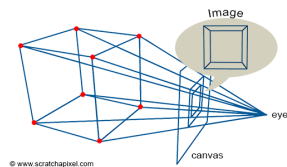


Henrik, Wikipedia

Algoritmusok

Megközelítési módok

- Sugárkövetés
- Inkrementális képszintézis



Algoritmusok

Megközelítési módok

- Sugárkövetés
- Inkrementális képszintézis

Fényjelenségek

Algoritmusok

Megközelítési módok

- Sugárkövetés
- Inkrementális képszintézis

Fényjelenségek

- Tükröződés, fénytörés



Gilles Tran, Oyonale.com

Algoritmusok

Megközelítési módok

- Sugárkövetés
- Inkrementális képszintézis

Fényjelenségek

- Tükröződés, fénytörés
- Vetett árnyékok



CryEngine2

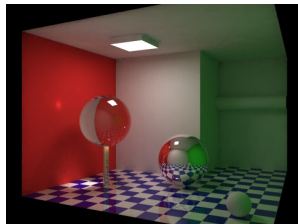
Algoritmusok

Megközelítési módok

- Sugárkövetés
- Inkrementális képszintézis

Fényjelenségek

- Tükröződés, fénytörés
- Vetett árnyékok
- Globális illumináció



Algoritmusok

Megközelítési módok

- Sugárkövetés
- Inkrementális képszintézis

Fényjelenségek

- Tükröződés, fénytörés
- Vetett árnyékok
- Globális illumináció
- Térfogati jelenségek



BlendELF.com

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás**
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás**
 - Motiváció**
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

Motiváció

- Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:

Motiváció

- Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:
 - Kép készítése a számítógép számára:

Motiváció

- Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:
 - Kép készítése a számítógép számára: ilyenkor a tényleges megjelenítéssel nem kell foglalkozni, egy leírást kell csak átadni (hol, milyen szín van)

Motiváció

- Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:
 - Kép készítése a számítógép számára: ilyenkor a tényleges megjelenítéssel nem kell foglalkozni, egy leírást kell csak átadni (hol, milyen szín van)
 - Kép készítése ember számára:

Motiváció

- Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:
 - Kép készítése a számítógép számára: ilyenkor a tényleges megjelenítéssel nem kell foglalkozni, egy leírást kell csak átadni (hol, milyen szín van)
 - Kép készítése ember számára: meg kell jeleníteni a képet → ehhez tisztában kell lenni az emberi látás bizonyos alap tulajdonságaival, hogy minél kevesebb torzuláson essen át az átadni kívánt információ

Motiváció

- Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:
 - Kép készítése a számítógép számára: ilyenkor a tényleges megjelenítéssel nem kell foglalkozni, egy leírást kell csak átadni (hol, milyen szín van)
 - Kép készítése ember számára: meg kell jeleníteni a képet → ehhez tisztában kell lenni az emberi látás bizonyos alap tulajdonságaival, hogy minél kevesebb torzuláson essen át az átadni kívánt információ
- Mi az utóbbival fogunk foglalkozni; az emberi látás pedig sok tényezőtől függ, már maguk a fények, árnyékok aktuális állapota is befolyásoló tényezők

Cydonia – 1978



Cydonia – 2001 VS 1978



[en.wikipedia.org/wiki/Cydonia_\(Mars\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cydonia_(Mars))

Célunk

- A képszintézissel a célunk megmondani, hogy adott helyen milyen színt kell, hogy megjelenítsen a kijelző

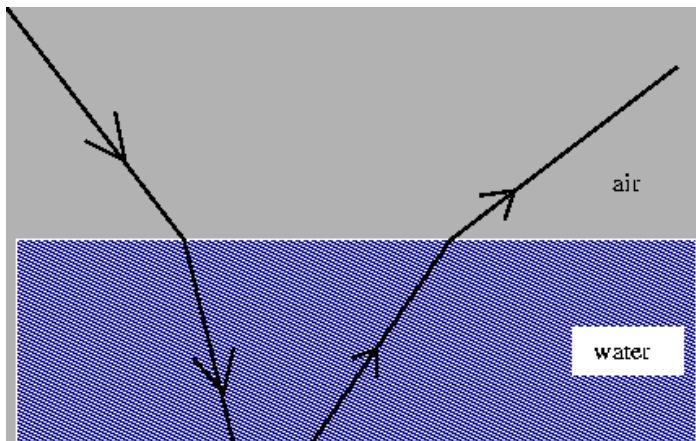
Célunk

- A képszintézissel a célunk megmondani, hogy adott helyen milyen színt kell, hogy megjelenítsen a kijelző
- Fontos ezért, hogy absztrakt és konkrét leírást is tudjunk adni

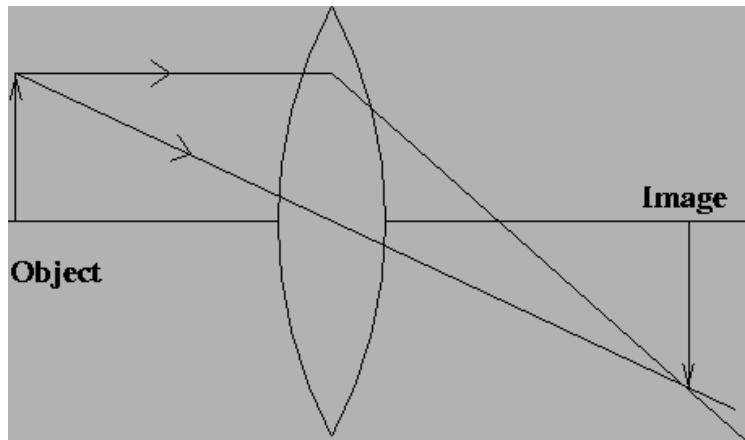
Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás**
 - Motiváció
 - A fény**
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

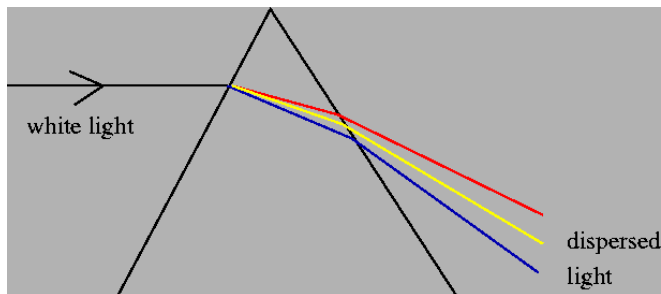
A fény tulajdonságai – fénytörés



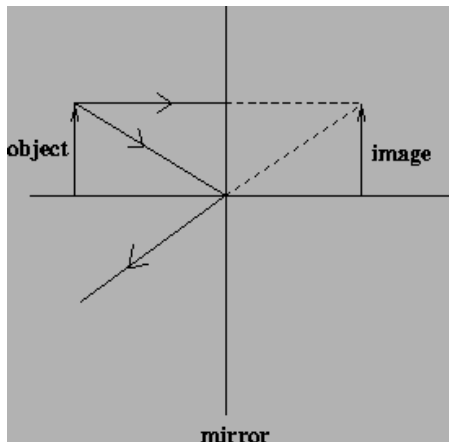
A fény tulajdonságai – fénytörés



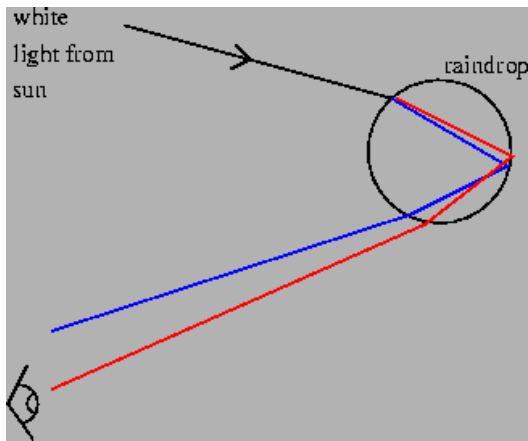
A fény tulajdonságai – fénytörés prizmával



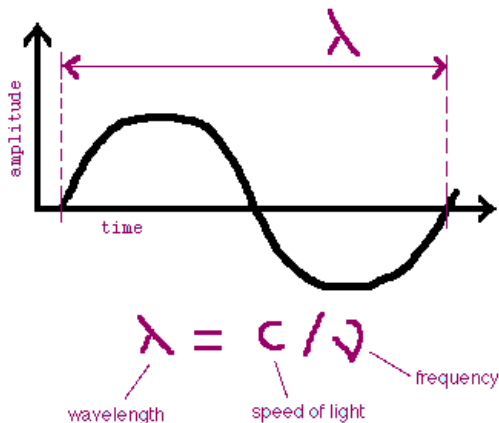
A fény tulajdonságai – visszaverődés



A fény tulajdonságai – szivárvány



A fény tulajdonságai – hullám?



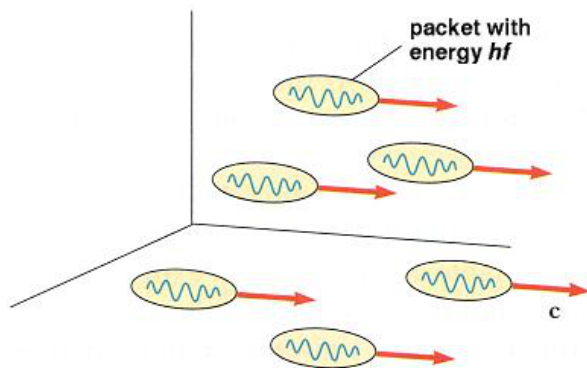
A fény tulajdonságai – részecske?

$$E = hf$$

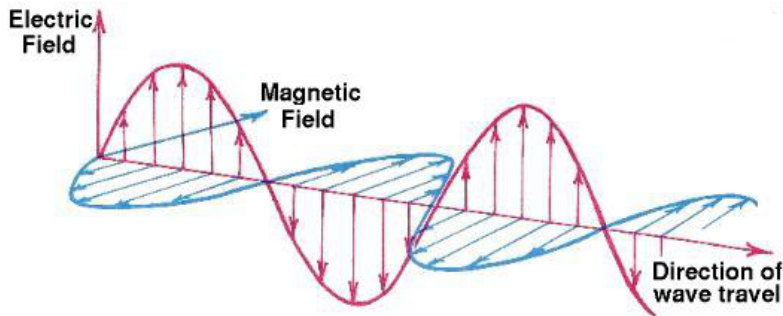


$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Joules} \cdot \text{sec}$$

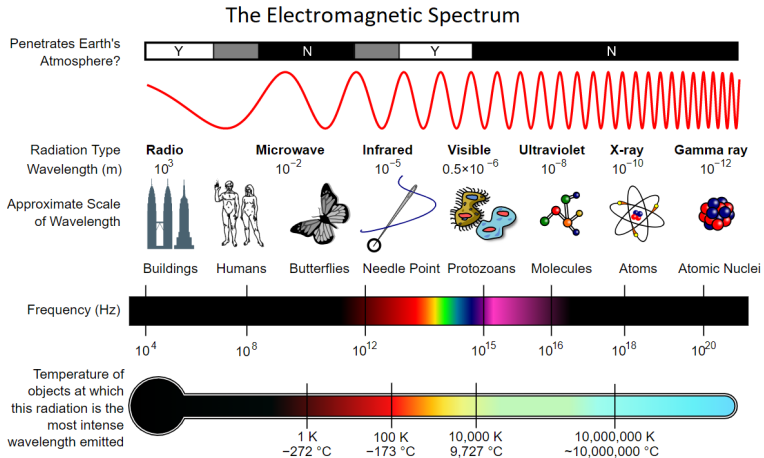
A fény tulajdonságai – fotonok



A fény tulajdonságai – a fény elektromágneses sugárzás



Elektromágneses sugárzás



Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás**
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája**
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

A látás

- A fény érzékelése

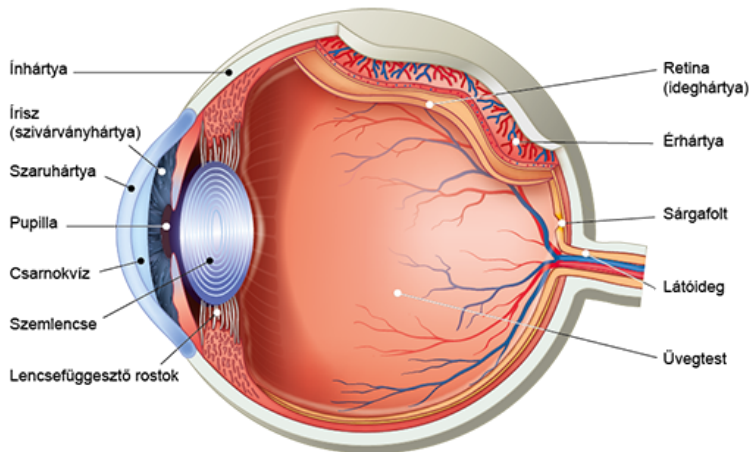
A látás

- A fény érzékelése
- Fiziológiai és pszichológiai aspektusai is vannak

A látás

- A fény érzékelése
- Fiziológiai és pszichológiai aspektusai is vannak
- A szem és az agy vesz részt benne

Az emberi szem felépítése



A fény útja a szemben

- A fény a szaruhártyán megtörve jut a szembe – ez lényegében egy fény-gyűjtőlencse

A fény útja a szemben

- A fény a szaruhártyán megtörve jut a szembe – ez lényegében egy fény-gyűjtőlencse
- A szivárványhártya (írisz) csökkenti a szembe jutó fény mennyiségét (szűri), a pupilla pedig fényreteként funkcionál

A fény útja a szemben

- A fény a szaruhártyán megtörve jut a szembe – ez lényegében egy fény-gyűjtőlencse
- A szivárványhártya (írisz) csökkenti a szembe jutó fény mennyiségét (szűri), a pupilla pedig fényreteként funkcionál
- A szemlencse a második gyűjtőlencse; a belépő fénysugarakat a recehártyára (retinára) fókuszálja (az „egészséges” szemben)

A szem ereje

- A szem különböző részeit összesítve kb. +60, +80D erejű – ez 16-12.5mm fókusztávolságot jelent

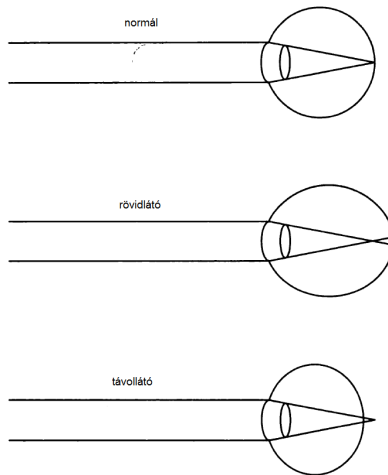
A szem ereje

- A szem különböző részeit összesítve kb. +60, +80D erejű – ez 16-12.5mm fókusztávolságot jelent
- Az átlagos emberi szem 24mm hosszú a szaruhártyától a retináig – a sárgafoltra fókuszláshoz így kb. 42D-t kell

A szem ereje

- A szem különböző részeit összesítve kb. +60, +80D erejű – ez 16-12.5mm fókusztávolságot jelent
- Az átlagos emberi szem 24mm hosszú a szaruhártyától a retináig – a sárgafoltra fókuszláshoz így kb. 42D-t kell
- A szemben maradó optikai erő a szem alakjának tökéletlenségeinek kompenzálására kellenek illetve a nagyon közeli és nagyon távoli objektumokra való fókuszlásnál

A fény útja a szemben



Fényreceptorok

- A retinában kétféle fény érzékelésre szolgáló idegsejt található:

Fényreceptorok

- A retinában kétféle fény érzékelésre szolgáló idegsejt található:
 - *Pálcikák (rod)*: alacsonyabb intenzitású fényre érzékenyek, a sötét-világos megkülönböztetésére alkalmas, alacsonyabb felbontásúak

Fényreceptorok

- A retinában kétféle fény érzékelésre szolgáló idegsejt található:
 - *Pálcikák (rod)*: alacsonyabb intenzitású fényre érzékenyek, a sötét-világos megkülönböztetésére alkalmas, alacsonyabb felbontásúak
 - *Csapok (cone)*: erősebb fényingert igénylő idegsejtek, a színlátást és éleslátást szolgálják, tizedannyira érzékenyek a fényre, mint a pálcikák

Fényreceptorok

- A retinában kétféle fény érzékelésre szolgáló idegsejt található:
 - *Pálcikák (rod)*: alacsonyabb intenzitású fényre érzékenyek, a sötét-világos megkülönböztetésére alkalmas, alacsonyabb felbontásúak
 - *Csapok (cone)*: erősebb fényingert igénylő idegsejtek, a színlátást és éleslátást szolgálják, tizedannyira érzékenyek a fényre, mint a pálcikák
- Az elektromágneses energia egy bizonyos sávjára érzékenyek csak a fenti sejtek

Fényreceptorok

- A retinában kétféle fény érzékelésre szolgáló idegsejt található:
 - *Pálcikák (rod)*: alacsonyabb intenzitású fényre érzékenyek, a sötét-világos megkülönböztetésére alkalmas, alacsonyabb felbontásúak
 - *Csapok (cone)*: erősebb fényingert igénylő idegsejtek, a színlátást és éleslátást szolgálják, tizedannyira érzékenyek a fényre, mint a pálcikák
- Az elektromágneses energia egy bizonyos sávjára érzékenyek csak a fenti sejtek
- Gyakorlati számításokban ennek a 380-780 nanométer (1 nanométer = $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) közötti hullámhosszú részével foglalkozunk, ez a látható színtartomány (*visual band*)

Fotoreceptorok

- Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy elektromos impulzust küldenek az agy felé

Fotoreceptorok

- Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy elektromos impulzust küldenek az agy felé
- Az egyes fotoreceptorok más-más mértékben reagálnak (érzékenyek) a különböző hullámhosszú fényekre:

Fotoreceptorok

- Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy elektromos impulzust küldenek az agy felé
- Az egyes fotoreceptorok más-más mértékben reagálnak (érzékenyek) a különböző hullámhosszú fényekre:
 - *Pálcikák*: hullámhossztól függően az ugyanolyan erős fényre adott reakció nagysága harang-görbe jellegű görbével írható le
 - az ember éjszakai látásának nagyjából megfelelő módon

Fotoreceptorok

- Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy elektromos impulzust küldenek az agy felé
- Az egyes fotoreceptorok más-más mértékben reagálnak (érzékenyek) a különböző hullámhosszú fényekre:
 - *Pálcikák*: hullámhossztól függően az ugyanolyan erős fényre adott reakció nagysága harang-görbe jellegű görbével írható le – az ember éjszakai látásának nagyjából megfelelő módon
 - *Csapok*: háromféle van belőlük (S, M, L jelűek); mindegyik különböző hullámhosszú fényre ad maximális reakciót, azoktól fokozatosan eltérőkre egyre kisebbet

Fotoreceptorok

- Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy elektromos impulzust küldenek az agy felé
- Az egyes fotoreceptorok más-más mértékben reagálnak (érzékenyek) a különböző hullámhosszú fényekre:
 - *Pálcikák*: hullámhossztól függően az ugyanolyan erős fényre adott reakció nagysága harang-görbe jellegű görbével írható le – az ember éjszakai látásának nagyjából megfelelő módon
 - *Csapok*: háromféle van belőlük (S, M, L jelűek); mindegyik különböző hullámhosszú fényre ad maximális reakciót, azoktól fokozatosan eltérőkre egyre kisebbet
- Az elektromos impulzusok csak az érzékelés tényét rögzítik: pontos hullámhossz nem továbbítódik az agy felé! (Térbeli és frekvenciabeli felbontás „trade-off”)

Fotoreceptorok – csapok

- Háromféle csap található a szemben:

Fotoreceptorok – csapok

- Háromféle csap található a szemben:
 - S csap: 420nm körüli fényre a legérzékenyebb (kék)

Fotoreceptorok – csapok

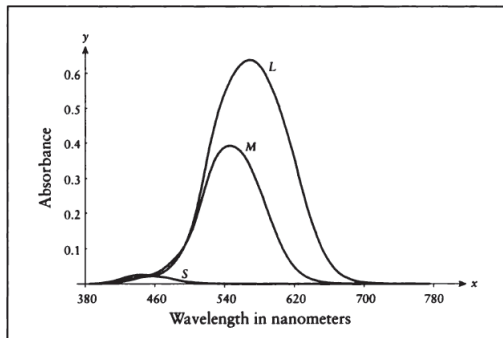
- Háromféle csap található a szemben:
 - S csap: 420nm körüli fényre a legérzékenyebb (kék)
 - M csap: 530nm körüli fényre a legérzékenyebb (zöld)

Fotoreceptorok – csapok

- Háromféle csap található a szemben:
 - S csap: 420nm körüli fényre a legérzékenyebb (kék)
 - M csap: 530nm körüli fényre a legérzékenyebb (zöld)
 - L csap: 560nm körüli fényre a legérzékenyebb (vörös)

Fotoreceptorok – csapok

- Háromféle csap található a szemben:
 - S csap: 420nm körüli fényre a legérzékenyebb (kék)
 - M csap: 530nm körüli fényre a legérzékenyebb (zöld)
 - L csap: 560nm körüli fényre a legérzékenyebb (vörös)



Fotoreceptorok – csapok

- Ha egy csap egy adott hullámhosszra 30%-ban érzékeny az azt jelenti, hogy 10-ből 3-szor fogja abszorbeálni az olyan hullámhosszú fénykomponenst és küld jelet az agy felé

Fotoreceptorok – csapok

- Ha egy csap egy adott hullámhosszra 30%-ban érzékeny az azt jelenti, hogy 10-ből 3-szor fogja abszorbeálni az olyan hullámhosszú fénykomponenst és küld jelet az agy felé
- A fényreceptorok észleléseit a látóideg továbbítja az agy felé

Fotoreceptorok – csapok

- Ha egy csap egy adott hullámhosszra 30%-ban érzékeny az azt jelenti, hogy 10-ből 3-szor fogja abszorbeálni az olyan hullámhosszú fénykomponenst és küld jelet az agy felé
- A fényreceptorok észleléseit a látóideg továbbítja az agy felé
- A látóideg csatlakozási pontja a szemgolyóhoz a vakfolt, itt nincsenek sem csapok, sem pálcikák

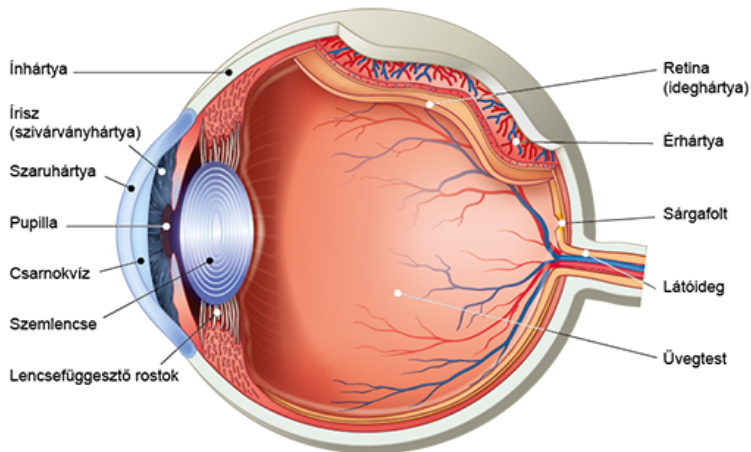
Fotoreceptorok – csapok

- Ha egy csap egy adott hullámhosszra 30%-ban érzékeny az azt jelenti, hogy 10-ből 3-szor fogja abszorbeálni az olyan hullámhosszú fénykomponenst és küld jelet az agy felé
- A fényreceptorok észleléseit a látóideg továbbítja az agy felé
- A látóideg csatlakozási pontja a szemgolyóhoz a vakfolt, itt nincsenek sem csapok, sem pálcikák
- A látógödör, ami a vakfolttól oldalra található az éleslátás helye, a közepe a foveola, ahol kizárólag csapok találhatóak (150000 csap per mm^2 , de: sólyomnál 1 millió a legsűrűbb rész)

Fotoreceptorok – csapok

- Ha egy csap egy adott hullámhosszra 30%-ban érzékeny az azt jelenti, hogy 10-ből 3-szor fogja abszorbeálni az olyan hullámhosszú fénykomponenst és küld jelet az agy felé
- A fényreceptorok észleléseit a látóideg továbbítja az agy felé
- A látóideg csatlakozási pontja a szemgolyóhoz a vakfolt, itt nincsenek sem csapok, sem pálcikák
- A látógödör, ami a vakfolttól oldalra található az éleslátás helye, a közepe a foveola, ahol kizárólag csapok találhatóak (150000 csap per mm^2 , de: sólyomnál 1 millió a legsűrűbb rész)
- A foveolától kifelé haladva a csapok egyre ritkábbak és a pálcikák váltják fel őket

Az emberi szem felépítése



A vakfolt kimutatása

x



A fotoreceptor jele

- Az egyetlen fotonra adott neurális jel néhány ms-ig tart

A fotoreceptor jele

- Az egyetlen fotonra adott neurális jel néhány ms-ig tart
- Minden egyes újabb beérkező foton hatása hozzáadódik az előzőhöz

A fotoreceptor jele

- Az egyetlen fotonra adott neurális jel néhány ms-ig tart
- Minden egyes újabb beérkező foton hatása hozzáadódik az előzőhöz
- → A receptor által leadott jel lényegében egy időbeli átlag, egy alul-áteresztő szűrő, aminek vágási frekvenciája függ a megvilágítási körülményektől

A fotoreceptor jele

- Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk

A fotoreceptor jele

- Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk
- Azonban ha a felvillanások között eltelt idő egyre kisebb, akkor a fotoreceptorok által leadott jelek „összetorlódnak” (eléri a *Critical flicker frequency*-t) → folyamatos fénypontként érzékeljük a látottakat

A fotoreceptor jele

- Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk
- Azonban ha a felvillanások között eltelt idő egyre kisebb, akkor a fotoreceptorok által leadott jelek „összetorlódnak” (eléri a *Critical flicker frequency*-t) → folyamatos fénypontként érzékeljük a látottakat
- A fenti képsorozatokra is igaz: CFF alatt a felvillanó képeket különálló elemekként kezeljük, azt átlépve folytonos képfolynamnak. Ezen alapul az animáció

A fotoreceptor jele

- Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk
- Azonban ha a felvillanások között eltelt idő egyre kisebb, akkor a fotoreceptorok által leadott jelek „összetorlódnak” (eléri a *Critical flicker frequency*-t) → folyamatos fénypontként érzékeljük a látottakat
- A fenti képsorozatokra is igaz: CFF alatt a felvillanó képeket különálló elemekként kezeljük, azt átlépve folytonos képfolynak. Ezen alapul az animáció
- A flicker rate sok tényezőtől függ (háttérmegvilágítás, a megjelenített kép nagysága stb.)

A fotoreceptor jele

- Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk
- Azonban ha a felvillanások között eltelt idő egyre kisebb, akkor a fotoreceptorok által leadott jelek „összetorlódnak” (eléri a *Critical flicker frequency*-t) → folyamatos fénypontként érzékeljük a látottakat
- A fenti képsorozatokra is igaz: CFF alatt a felvillanó képeket különálló elemekként kezeljük, azt átlépve folytonos képfolyamnak. Ezen alapul az animáció
- A flicker rate sok tényezőtől függ (háttérmegvilágítás, a megjelenített kép nagysága stb.)
- Ideális körülmények között nagyjából 60Hz (méheknél ugyanez 300Hz)

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás**
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

CIE

- International Commission on Illumination, 1931.: hogyan lehetne egy „standard” leírást adni arra, hogy egy ember miképp érzékeli a színeket

CIE

- International Commission on Illumination, 1931.: hogyan lehetne egy „standard” leírást adni arra, hogy egy ember miképp érzékeli a színeket
- A kísérletek egyik eredménye volt, hogy bármely szín előállítható három, megfelelő szín keverékeként (itt: színes fények egymásra vetítésével)

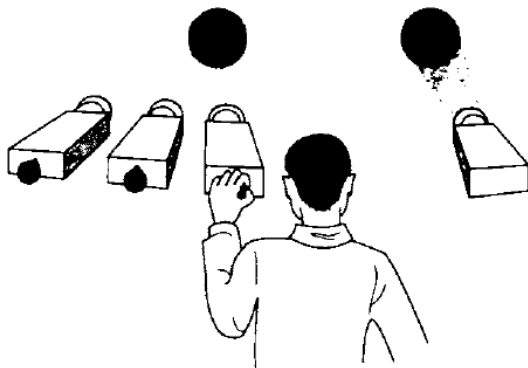
CIE

- International Commission on Illumination, 1931.: hogyan lehetne egy „standard” leírást adni arra, hogy egy ember miképp érzékeli a színeket
- A kísérletek egyik eredménye volt, hogy bármely szín előállítható három, megfelelő szín keverékeként (itt: színes fények egymásra vetítésével)
- Ugyanaz a szín többféleképpen is előállhat különböző színek kombinációjaként! Ezek a metamerek. (pl. nátriumlámpa vs. sárga szín a monitoron)

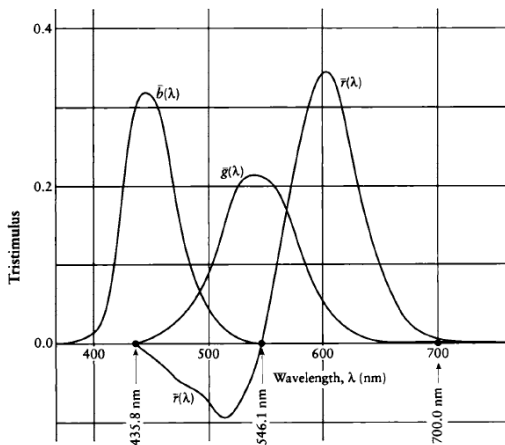
CIE

- International Commission on Illumination, 1931.: hogyan lehetne egy „standard” leírást adni arra, hogy egy ember miképp érzékeli a színeket
- A kísérletek egyik eredménye volt, hogy bármely szín előállítható három, megfelelő szín keverékeként (itt: színes fények egymásra vetítésével)
- Ugyanaz a szín többféleképpen is előállhat különböző színek kombinációjaként! Ezek a metamerek. (pl. nátriumlámpa vs. sárga szín a monitoron)
- → Bármely színérzet kódolható egy számhármassal, *tristimulus* értékkel

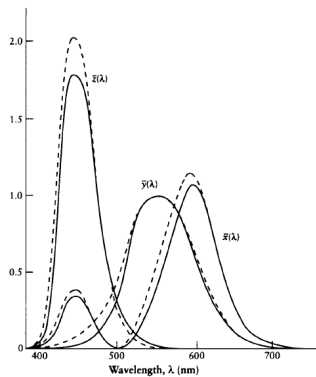
CIE



CIE



CIE



CIE

$$C(\lambda) = X \bar{x}(\lambda) + Y \bar{y}(\lambda) + Z \bar{z}(\lambda)$$



$$X = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_v} C(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_v} C(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_v} C(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Tristimulus értékek

- Színérzet $\rightarrow$ színtér

Tristimulus értékek

- Színérzet $\rightarrow$ *színtér*
- Itt kijelölhető egy koordináta rendszer három „független” bázis-vektorral.

Tristimulus értékek

- Színérzet $\rightarrow$ színtér
- Itt kijelölhető egy koordináta rendszer három „független” bázis-vektorral.
- Válasszunk három kellően távoli hullámhosszt, majd minden színérzetre adjuk meg, hogy három ilyen *monokromatikus* (csak az adott hullámhosszt tartalmazó) fénynyaláb milyen keverékéből áll össze.

Tristimulus értékek

- Színérzet $\rightarrow$ színtér
- Itt kijelölhető egy koordináta rendszer három „független” bázis-vektorral.
- Válasszunk három kellően távoli hullámhosszt, majd minden színérzetre adjuk meg, hogy három ilyen *monokromatikus* (csak az adott hullámhosszt tartalmazó) fénynyaláb milyen keverékéből áll össze.
- Ezek lesznek az adott színérzet *tristimulus koordinátái*

RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

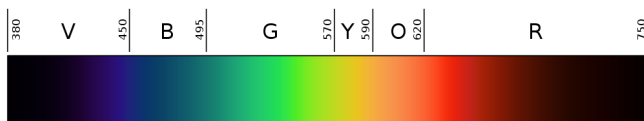
$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



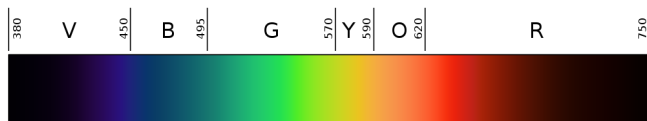
- Ekkor a hozzátartozó RGB értékeket megadására használjuk az $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ színillesztő függvényeket.

RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



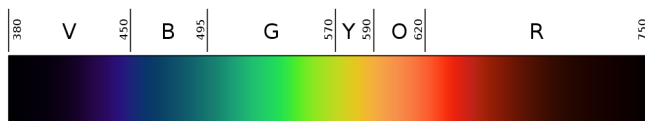
- Ekkor a hozzátartozó RGB értékeket megadására használjuk az $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ *színillesztő függvényeket*.
- A spektrum minden színe megadható így?

RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



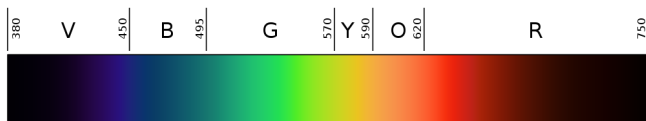
- Ekkor a hozzátartozó RGB értékeket megadására használjuk az $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ *színillesztő függvényeket*.
- A spektrum minden színe megadható így? Nem.

RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



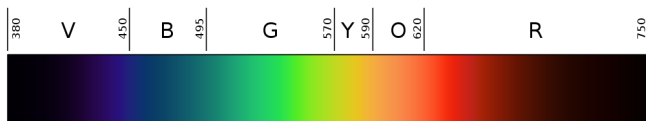
- Ekkor a hozzátartozó RGB értékeket megadására használjuk az $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ *színillesztő függvényeket*.
- A spektrum minden színe megadható így? Nem.
- Az ember által érzékelhető minden szín megadható így?

RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



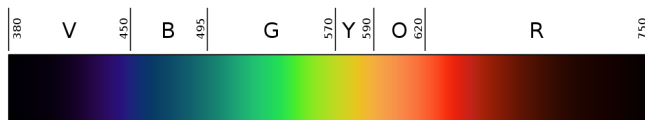
- Ekkor a hozzátartozó RGB értékeket megadására használjuk az $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ *színillesztő függvényeket*.
- A spektrum minden színe megadható így? Nem.
- Az ember által érzékelhető minden szín megadható így? Nem.

RGB színtér

- Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

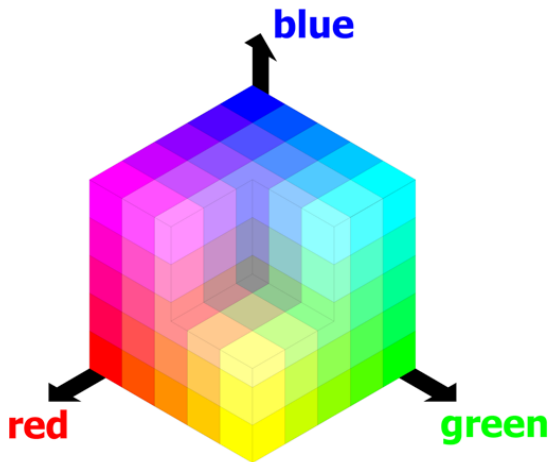
$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



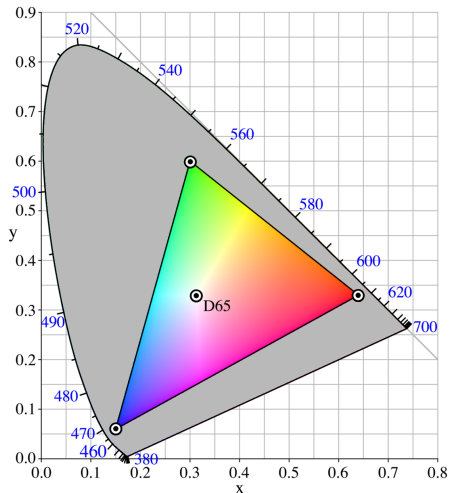
- Ekkor a hozzátartozó RGB értékeket megadására használjuk az $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ *színillesztő függvényeket*.
- A spektrum minden színe megadható így? Nem.
- Az ember által érzékelhető minden szín megadható így? Nem.
- További színérzékeléssel kapcsolatos furcsaságok: [videó]

RGB színekocka



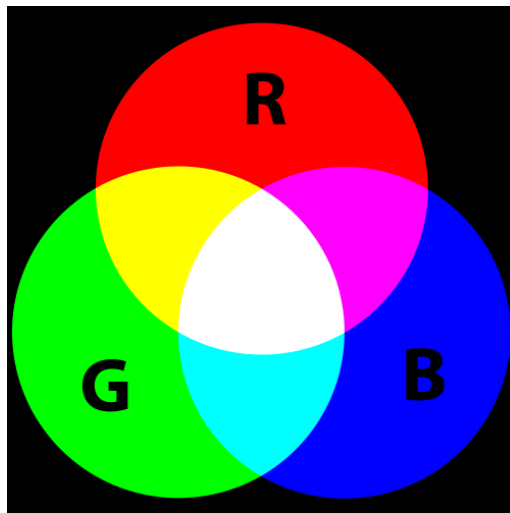
Ethan Hein, Flickr

RGB-ben leírható színek



Dicklyon, Wikipedia

Additív színkeverés



A monitor/projektor fényt bocsát ki (összeadunk)

CMY(K)

- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel „szemközti” tengelyeket!

CMY(K)

- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel „szemközti” tengelyeket!
- Ezek a ciánkék (C – cyan), bíbor (M – magenta) és sárga (Y – yellow).

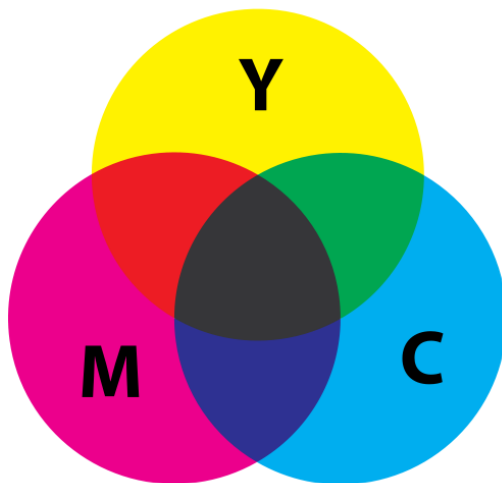
CMY(K)

- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel „szemközti” tengelyeket!
- Ezek a ciánkék (C – cyan), bíbor (M – magenta) és sárga (Y – yellow).
- Ez a három „tengely” ugyanúgy kifeszíti a színteret.

CMY(K)

- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel „szemközti” tengelyeket!
- Ezek a ciánkék (C – cyan), bíbor (M – magenta) és sárga (Y – yellow).
- Ez a három „tengely” ugyanúgy kifeszíti a színteret.
- Ezt használják a színes nyomtatáshoz. Itt CMYK, ahol K a fekete, pontosabban „Key” – kulcsszín, mivel ez adja a kontrasztot

Szubsztraktív színkeverés



A papír/festék fényt nyel el (kivonunk)

HSL és HSV – motiváció

- Amikor színekről beszélünk gyakran használunk olyan fogalmakat, hogy *telítettség*, *élénkség*, *világosság* vagy *sötétség*. Hogyan használhatjuk ezeket RGB színtérben?

HSL és HSV – motiváció

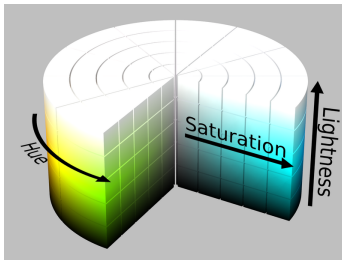
- Amikor színekről beszélünk gyakran használunk olyan fogalmakat, hogy *telítettség*, *élénkség*, *világosság* vagy *sötétség*. Hogyan használhatjuk ezeket RGB színtérben?
- Vegyünk RGB-ben egy színt. Keressük egy kevésbé élénk árnyalatát! Mi az összefüggés a komponensek és az élénkség között?



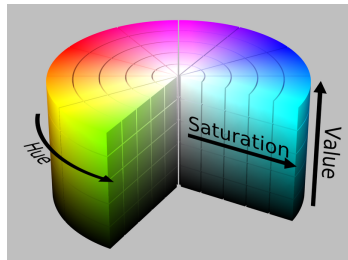
Jacobolus, Wikipedia

HSL és HSV

- A színeket egy hengerrel adjuk meg, egy színérték (*Hue*), egy telítettség (*Saturation*) és egy fényesség (*Lightness*) vagy világosság (*Value*) segítségével.



SharkD, Wikipedia



SharkD, Wikipedia

HSL és HSV

- *Hue* (színérték) skála:

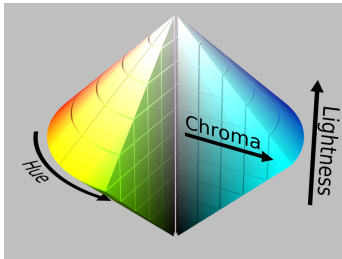


HSL és HSV

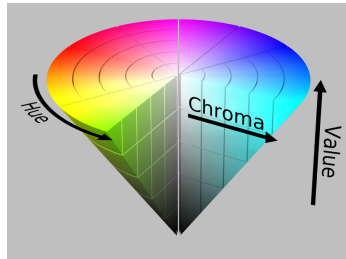
- *Hue* (színérték) skála:



- Azonos színek:



SharkD, Wikipedia



SharkD, Wikipedia

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök**
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika

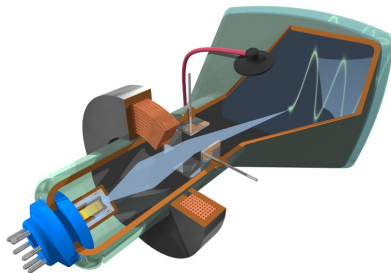
Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök**
 - Megjelenítők**
 - Raszter- és vektorgrafika

Eszközök – Oszcilloszkóp



Felix E. Guerrero, flickr

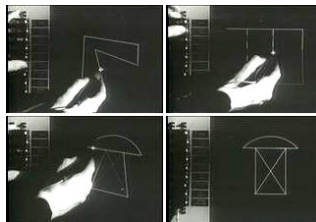


Søren Poo Pedersen, Wikipedia

- Az eszköz hátuljában található elektronágyú elektronokat bocsájt ki.
- Az elektronnyaláb útját elektromágnesekkel téríti el a vizsgált jel alapján.
- Az eszköz elején lévő foszforrétegbe csapódó elektronok bocsájtják ki a fényt.

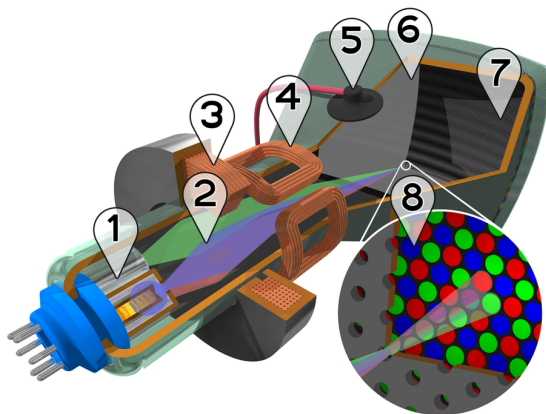
Eszközök – Sketchpad

Sutherland – Sketchpad, 1963 [link]



- a CAD alkalmazások őse
- 1024x1024-es kijelző
- fényceruzával + 40 nyomógombbal volt vezérelhető
- bevezette a kényszer alapú rajzolást: párhuzamos, merőleges stb.

Eszközök – CRT monitor

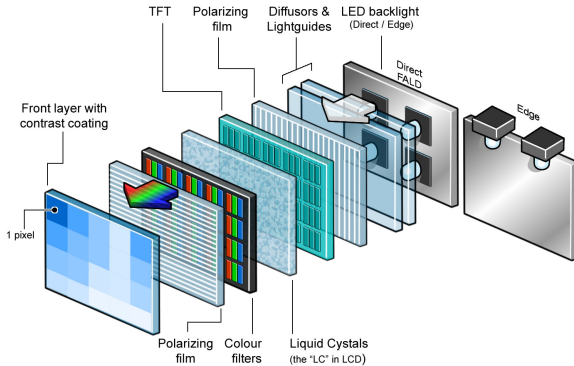


Søren Poo Pedersen, Wikipedia

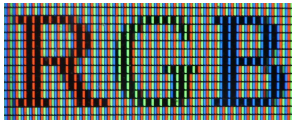
Eszközök – CRT monitor

- Őse az oszcilloszkóp – azonos működési elv.
- Az elektronnyaláb sorról sorra végigpásztazza a képernyőt másodpercenként többször is.
- A sugár ereje határozza meg fényerőt – a pásztázás során folyamatosan változik.
- Színek: három elektronágyú, a beesési szöghkülönbségből adódóan érik a megfelelő színszűrővel rendelkező területet.
- Alacsony válaszdő
- A kontrasztarány jó, a fekete tud valóban fekete lenni
- Már nem gyártják
- Lassított videó [link]

Eszközök – LCD monitor



flatpanelshd.com

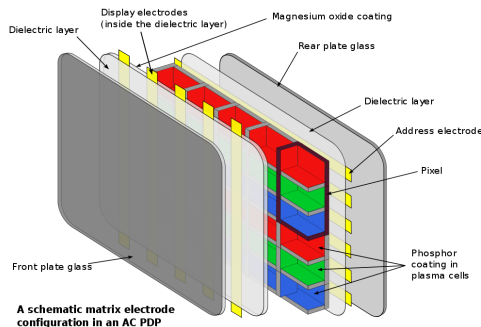


Luis Flávio Loreiro dos Santos, Wikipedia

Eszközök – LCD monitor

- Fehér háttérvilágítás
- Először egy polárszűrőn megy keresztül a fény
- Ezután következik a névadó folyadékkristály-réteg, melynek tulajdonsága, hogy elektromos feszültség hatására különböző mértékben forgatja el a fény polarizáltságát.
- Színek: minden színszűrőre különböző polarizáltságú fény jut.
- Végül a korábbira merőleges polárszűrőn jut át a fény, így szabályozva a kijutó fény mennyiségét.
- CRT-nél lassabb válaszidő
- Kontrasztaránya változó – fekete színhez aktívan ki kell szűrnie a háttérvilágítást.

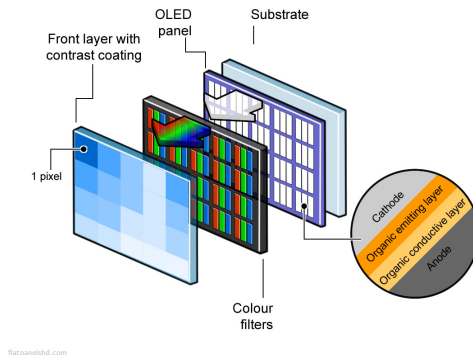
Eszközök – PDP kijelző (Plasma Display)



Wikipedia

- Minden képpont maga bocsájt ki fényt.
- A pixelekben nemesgáz van, ami feszültség hatására világít, a neoncsőhöz hasonló elven.
- Már nem gyártják.

Eszközök – OLED kijelző



- Minden pixel maga is fényforrás.
- Jó kontrasztarány
- Alacsony válaszidő

Eszközök – 3D megjelenítők

- *Stereoscopy*

Mást lát a két szem, nincs mozgás parallaxis

- *Head Mounted Display*
- *Shutter glasses*
- Polarizált lencsés szemüveg

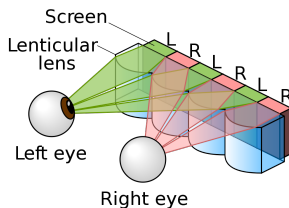
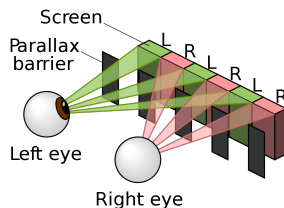
- *Autostereoscopy*

Nem kell hozzá külön eszköz a felhasználó részéről

- *Parallax barrier*
- *Lenticular lens*

Eszközök – 3D megjelenítők

Parallax és Lenticular



Marvin Raaijmakers, Wikipedia

és még...

- Nyomtatók
- 3D nyomtatók
- Plotterek
- Mini LED kijelzők
- Projektorok
- ...

Tartalom

- 1 Adminisztráció
- 2 Számítógépes grafika
 - Motiváció
 - Áttekintés
- 3 Az emberi látás
 - Motiváció
 - A fény
 - A látás fiziológiája
 - Színek a számítógépen
- 4 Megjelenítők, eszközök**
 - Megjelenítők
 - Raszter- és vektorgrafika**

Rasztergrafika



Doink, vecteezy.com

Rasztergrafika



Doink, vecteezy.com



Rasztergrafika

- Az ábra legkisebb egysége a pixel, ami egy színt reprezentál.
- A pixeleket valamilyen $N \times M$ -es tömbben tároljuk.
- Nagyításkor és kicsinyítéskor csak a pixelek látható méretét módosítjuk.
- A képen lévő alakzatok módosítása relatívan nehéz – festéshez hasonlítható
- A tárigény direktben a felbontástól függ (a tömörítéstől eltekintve)

Vektorgrafika



Doink, vecteezy.com

Vektorgrafika



Doink, vecteezy.com



Vektorgrafika

- A kép matematikailag leírható elemekből épül fel: görbék, síkidomok.
- Ezekhez vannak rendelve különböző tulajdonságok: szín, kitöltés, vonalvastagság.
- Az egyenes tényleg egyenes, a görbék bármilyen nagyítás alatt ívesek maradnak.
- A képen lévő alakzatok szerkesztése egyszerű.
- A tárigény az objektumok számával arányos, jellemzően hasonló tartalmú rasteres képeknél kevesebb.