



Számítógépes Grafika

Valasek Gábor

valasek@inf.elte.hu

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Informatikai Kar

2011/2012. őszi félév



Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fisiológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás

Motiváció

Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fisiológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás

Motiváció

- Az eddigiekben megvizsgáltuk, hogyan reprezentálhatjuk virtuális világunk pontjait és egyszerű elemeit

Motiváció

- Az eddigiekben megvizsgáltuk, hogyan reprezentálhatjuk virtuális világunk pontjait és egyszerű elemeit
 - Láttuk hogyan végezhetünk műveleteket, transzformációkat a pontokon

Motiváció

- Az eddigiekben megvizsgáltuk, hogyan reprezentálhatjuk virtuális világunk pontjait és egyszerű elemeit
 - Láttuk hogyan végezhetünk műveleteket, transzformációkat a pontokon
 - Az eddigiekben tehát megalapoztunk világunk geometriájának leírását



Motiváció

- Az eddigiekben megvizsgáltuk, hogyan reprezentálhatjuk virtuális világunk pontjait és egyszerű elemeit
 - Láttuk hogyan végezhetünk műveleteket, transzformációkat a pontokon
 - Az eddigiekben tehát megalapoztunk világunk geometriájának leírását
 - Most megnézzük, hogyan tudjuk a világunkat benépesítő elemek anyagjellemzőit, színét megadni



Motiváció

Motiváció

- Az eddigiekben megvizsgáltuk, hogyan reprezentálhatjuk virtuális világunk pontjait és egyszerű elemeit
- Láttuk hogyan végezhetünk műveleteket, transzformációkat a pontokon
- Az eddigiekben tehát megalapoztunk világunk geometriájának leírását
- Most megnézzük, hogyan tudjuk a világunkat benépesítő elemek anyagjellemzőit, színét megadni
- Ehhez a színek számítógépes reprezentációját vizsgáljuk

Motiváció

Motiváció

- Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:



Motiváció

Motiváció

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



Motiváció

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

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

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

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 befolyásol



Cydonia - 1978





Cydonia - 2001 VS 1978



Link a Mars-arc történetéhez

Motiváció

Célunk

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

Motiváció

Célunk

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

A látás fiziológiája

Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fiziológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás



A látás fiziológiája

A látás

- Fiziológiai és pszichológiai aspektusai is vannak



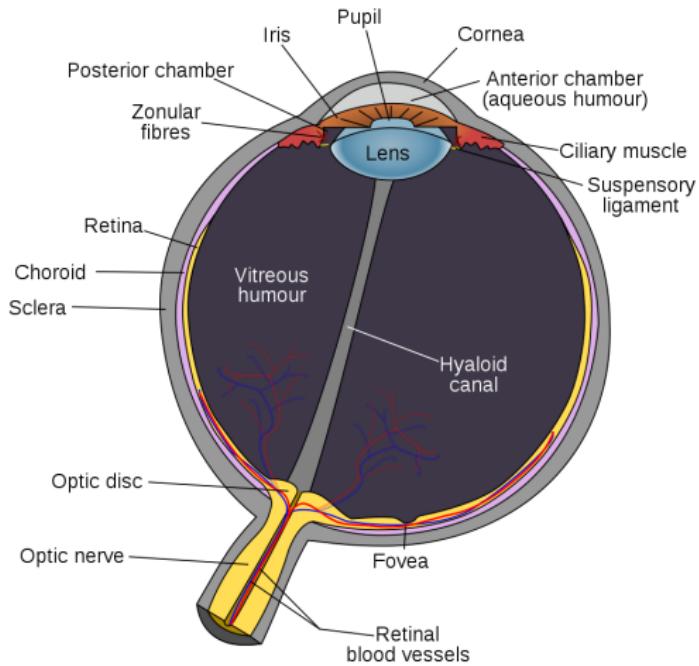
A látás fiziológiája

A látás

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

A látás fiziológiája

Az emberi szem felépítése



A fény útja a szemben

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

A látás fiziológiája

A fény útja a szemben

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

A látás fiziológiája

A fény útja a szemben

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



A látás fiziológiája

A fény útja a szemben

- A különböző hullámhosszú fény másképp törik

A látás fiziológiája

A fény útja a szemben

- A különböző hullámhosszú fény másképp törik
- Ahhoz, hogy a szemlencse ezeket is a retinára tudja fókuszálni a sugárizomnak módosítania kell a szemlencse alakját

A látás fiziológiája

A fény útja a szemben

- A különböző hullámhosszú fény másképp törik
- Ahhoz, hogy a szemlencse ezeket is a retinára tudja fókuszálni a sugárizomnak módosítania kell a szemlencse alakját
- Ugyanaz történik, mint amikor közelre, vagy távolra nézünk!

A fény útja a szemben

- A különböző hullámhosszú fény másképp törik
 - Ahhoz, hogy a szemlencse ezeket is a retinára tudja fókuszálni a sugárizomnak módosítania kell a szemlencse alakját
 - Ugyanaz történik, mint amikor közelre, vagy távolra nézünk!
 - → a piros szín azért kelt közelség érzetet, mert ugyanaz játszódik le piros felületre fókuszáláskor, mint amikor közelebbre nézünk

A fény útja a szemben

- A különböző hullámhosszú fény másképp törik
- Ahhoz, hogy a szemlencse ezeket is a retinára tudja fókuszálni a sugárizomnak módosítania kell a szemlencse alakját
- Ugyanaz történik, mint amikor közelre, vagy távolra nézünk!
 - → a piros szín azért kelt közelség érzetet, mert ugyanaz játszódik le piros felületre fókuszáláskor, mint amikor közelebbre nézünk
 - → a kék színnél pedig ugyanaz játszódik le, mint amikor távolabba nézünk, ezért kelt tágasabb érzést



A látás fiziológiája

A fény útja a szemben

x

•



A látás fiziológiája

Fényreceptorok

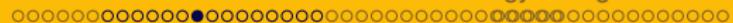
- A retinában kétféle fény érzékelésére szolgáló idegsejt található:



A látás fiziológiája

Fényreceptorok

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



Fényreceptorok

- A retinában kétféle fény érzékelésére 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 érzékelésére 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 érzékelésére 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 nm = 10^{-9} m) közötti hullámhosszú részével foglalkozunk, ez a *visual band*



Fotoreceptorok

- Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy neurális jelet küldenek az agy felé, úgynevezett *fotopigmentet*

A látás fiziológiája

Fotoreceptorok

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



A látás fiziológiája

Fotoreceptorok

- Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy neurális jelet küldenek az agy felé, úgynevezett *fotopigmentet*
- 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 neurális jelet küldenek az agy felé, úgynevezett *fotopigmentet*
- 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 neurális jelet küldenek az agy felé, úgynevezett *fotopigmentet*
 - 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); minden egyik különböző hullámhosszú fényre ad maximális reakciót, azoktól fokozatosan eltérőkre egyre kisebbet
 - A fotopigmentek csak az érzékelés tényét rögzítik: pontos hullámhosz nem továbbítódik az agy felé! (Térbeli és frekvenciabeli felbontás "trade-off")



A látás fiziológiája

Fotoreceptorok - csapok

- Háromféle csap található a szemben:



A látás fiziológiája

Fotoreceptorok - csapok

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



A látás fiziológiája

Fotoreceptorok - csapok

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



A látás fiziológiája

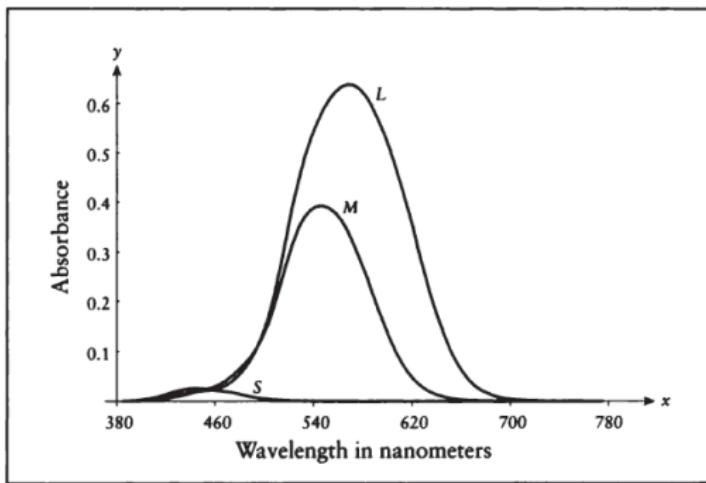
Fotoreceptorok - csapok

- 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)

A látás fiziológiája

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)





A látás fiziológiája

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 látás fiziológiája

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 látás fiziológiája

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 látogödör, ami a vakfolttól oldalra található az éleslátás helye, a közepe a foveola, ahol kizárolag csapok találhatóak (150000 csap per mm, de: sólyomnál 1 millió a legsűrűbb rész)



A látás fiziológiája

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 látogödör, ami a vakfolttól oldalra található az éleslátás helye, a közepe a foveola, ahol kizárolag csapok találhatóak (150000 csap per mm, de: sólyomnál 1 millió a legsűrűbb rész)
- A foveolától kifelé haladva a csapok egyre ritkábbak és a pálcikák váltják fel őket

A fotoreceptor jele

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

A látás fiziológiája

A fotoreceptor jele

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

A látás fiziológiája

A fotoreceptor jele

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



A látás fiziológiája

A fotoreceptor jele

- Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk

A látás fiziológiája

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 képfolyamnak

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
- 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
- A flicker rate sok tényezőtől függ (háttérmegvilágítás, a megjelenített kép nagysága stb.)
- Ideális körülmények között nagyjából 60Hz (méheknél ugyanez 300Hz)



A látás fiziológiája

Megjegyzés

- A beérkező fényintenzitáshoz hatalmas tartományban tud alkalmazkodni az emberi szem (akár $10^{10} \text{ candela/m}^2$)

Megjegyzés

- A beérkező fényintenzitáshoz hatalmas tartományban tud alkalmazkodni az emberi szem (akár $10^{10} \text{ candela/m}^2$)
 - Erős fényben kisebb, alacsonyabb megvilágításban nagyobb érzékenységet ad

Megjegyzés

- A beérkező fényintenzitáshoz hatalmas tartományban tud alkalmazkodni az emberi szem (akár $10^{10} \text{ candela/m}^2$)
 - Erős fényben kisebb, alacsonyabb megvilágításban nagyobb érzékenységet ad
 - A látásban egyúttal a fényintenzitásra érzékenyebb az agyunk, mint a színinformációra

Megjegyzés

- A beérkező fényintenzitáshoz hatalmas tartományban tud alkalmazkodni az emberi szem (akár $10^{10} \text{ candela/m}^2$)
- Erős fényben kisebb, alacsonyabb megvilágításban nagyobb érzékenységet ad
- A látásban egyúttal a fényintenzitásra érzékenyebb az agunk, mint a színinformációra
- Az eddigiek alapján néhány kitüntetett hullámhosszat felhasználva tudnánk színinformációt tárolni a számítógépen

A látás fiziológiája

Út az agyba

- Leonardo da Vinci 1500 körül leírta, hogy bizonyos színeket milyen környezetben látjuk a legerősebbnek (a piros sárgán a legerősebb stb.)

Út az agyba

- Leonardo da Vinci 1500 körül leírta, hogy bizonyos színeket milyen környezetben látjuk a legerősebbnek (a piros sárgán a legerősebb stb.)
 - Ezazzal is magyarázhat, hogy az agy felé küldött információ nem egyszerűen a háromféle csap által leadott jel

A látás fiziológiája

Út az agyba

- Leonardo da Vinci 1500 körül leírta, hogy bizonyos színeket milyen környezetben látjuk a legerősebbnek (a piros sárgán a legerősebb stb.)
- Ezazzal is magyarázhat, hogy az agy felé küldött információ nem egyszerűen a háromféle csap által leadott jel
- Ehelyett az S, M, L által leadott jelek összege vagy különbsége indul az agyba

Út az agyba

- Az agy felé három idegkötegen halad a színinformáció
 - $A = M+L$: az M és az L csapok által adott válaszok összege, akromatikus csatorna (valószínűleg ez volt az első látásra kifejlesztett csatorna)

Út az agyba

- Az agy felé három idegkötegen halad a színinformáció
 - $A = M+L$: az M és az L csapok által adott válaszok összege, akromatikus csatorna (valószínűleg ez volt az első látásra kifejlesztett csatorna)
 - $R/G = M - L$: vörös-zöld különbség

Út az agyba

- Az agy felé három idegkötegen halad a színinformáció
 - $A = M+L$: az M és az L csapok által adott válaszok összege, akromatikus csatorna (valószínűleg ez volt az első látásra kifejlesztett csatorna)
 - $R/G = M - L$: vörös-zöld különbség
 - $B/Y = S - A$: a kék és az akromatikus csatorna (kb sárga) különbsége

Út az agyba

- Az agy felé három idegkötegen halad a színinformáció
 - $A = M+L$: az M és az L csapok által adott válaszok összege, akromatikus csatorna (valószínűleg ez volt az első látásra kifejlesztett csatorna)
 - $R/G = M - L$: vörös-zöld különbség
 - $B/Y = S - A$: a kék és az akromatikus csatorna (kb sárga) különbsége
 - → A színek a következő három koordinátatengely mentén jutnak el az agyba: intenzitás, vörös-zöld, kék-sárga

Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fisiológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás

Színek a számítógépen

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)

- 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.)

Színek a számítógépen

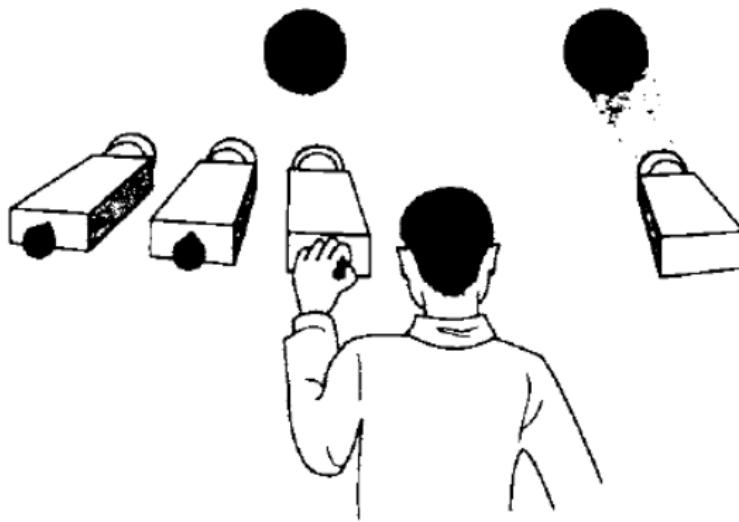
CIE

- 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.)
- → Bármely színérzet kódolható egy számhármaszal, *tristimulus* értékkel

- 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.)
- → Bármely színérzeti kódolható egy számhármaszal, *tristimulus* értékkel
- De ne feledjük: a színérzetet akár az étrend is befolyásolhatja (ld. 2. vh. haditengerészes kísérlet)

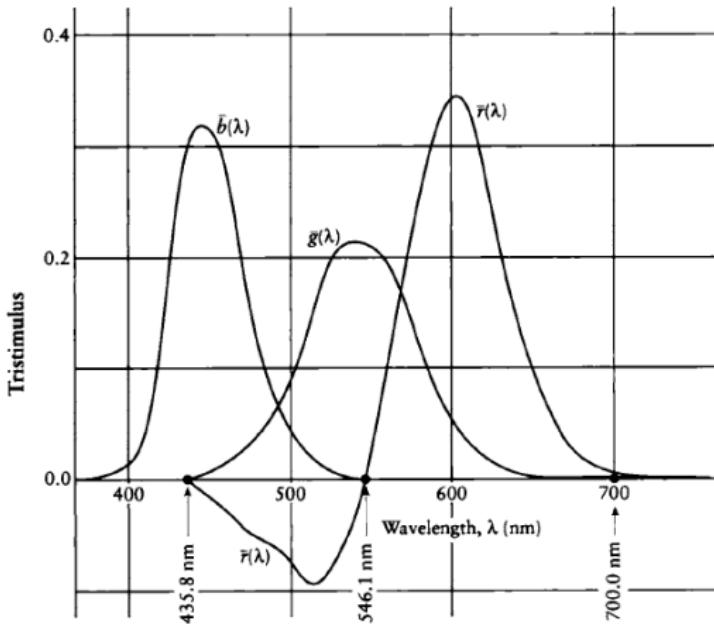
Színek a számítógépen

CIE



Színek a számítógépen

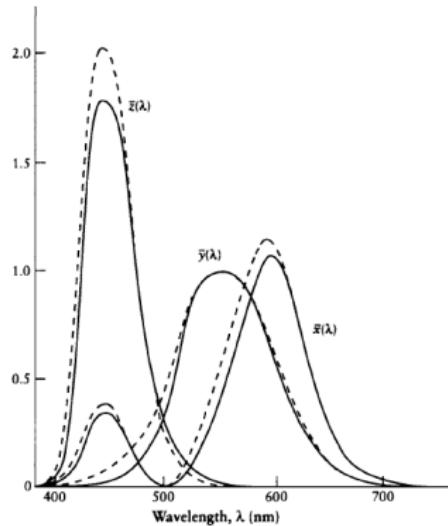
CIE





Színek a számítógépen

CIE





Színek a számítógépen

CIE

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



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

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

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



Színek a számítógépen

Tristimulus értékek

- Színérzeti → színtér



Színek a számítógépen

Tristimulus értékek

- Színérzet → színtér
- Itt kijelölhető egy koordináta rendszer három "független" bázis-vektorral.

Színek a számítógépen

Tristimulus értékek

- Színérzeti → színtér
- Itt kijelölhető egy koordináta rendszer három "független" bázis-vektorral.
- Válasszunk három kellően távoli hullámhoszt, majd minden színérzetre adjuk meg, hogy három ilyen *monokromatikus* (csak az adott hullámhoszt tartalmazó) fénynyaláb milyen keverékéből áll össze.

Színek a számítógépen

Tristimulus értékek

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



Színek a számítógépen

RGB színtér

- Egy Additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

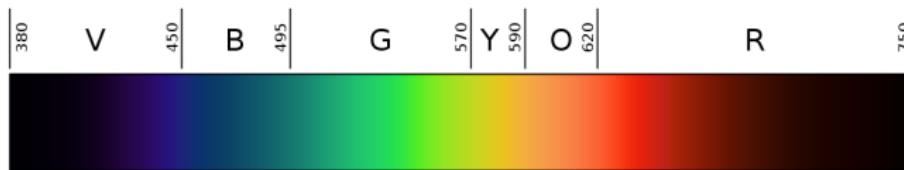
Színek a számítógépen

RGB színtér

- Egy Additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



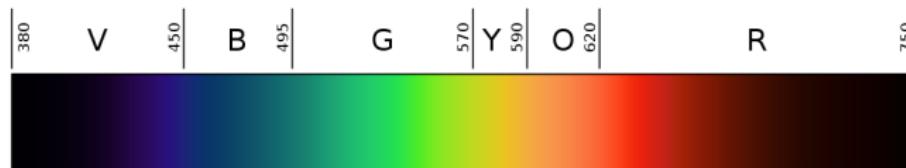
Színek a számítógépen

RGB színtér

- Egy Additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



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

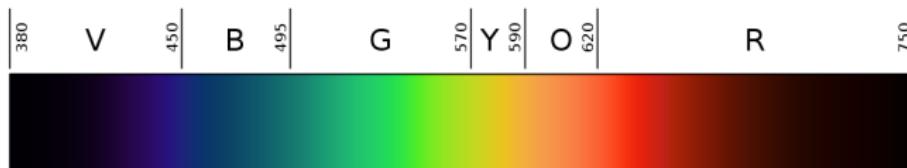
Színek a számítógépen

RGB színtér

- Egy Additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



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

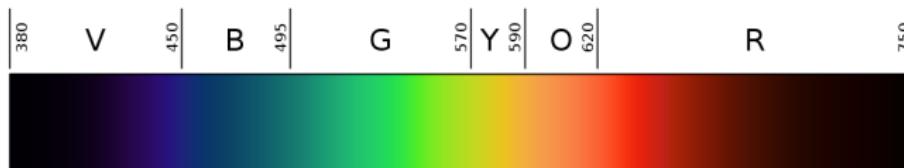
Színek a számítógépen

RGB színtér

- Egy Additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



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

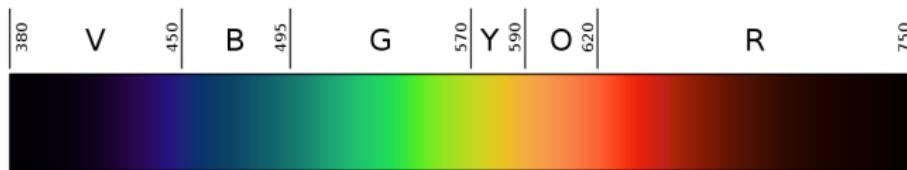
Színek a számítógépen

RGB színtér

- Egy Additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



- Ekkor a hozzá tartozó 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?

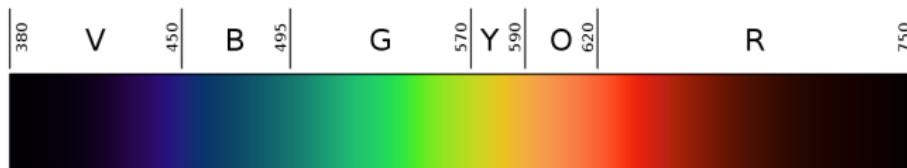
Színek a számítógépen

RGB színtér

- Egy Additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

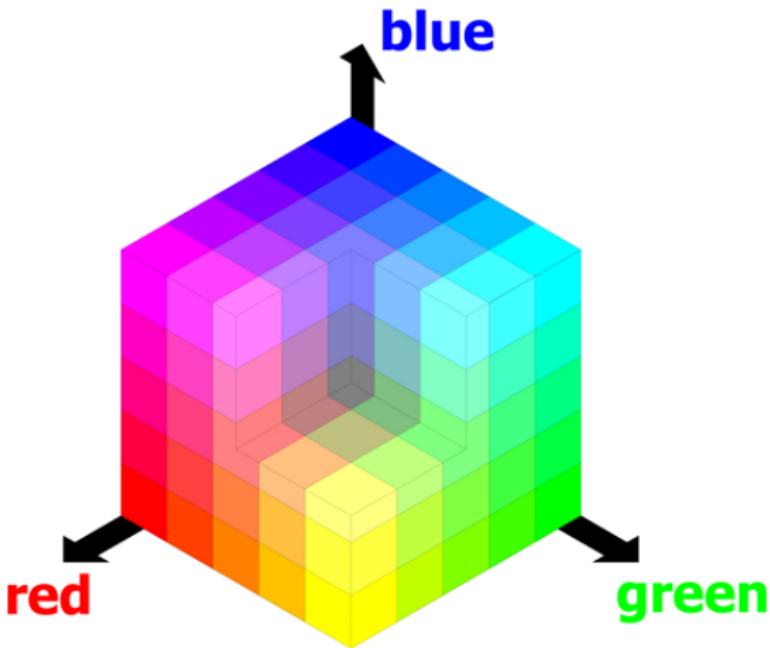
- Legyen λ egy monokromatikus fénynyaláb.



- Ekkor a hozzá tartozó 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.

Színek a számítógépen

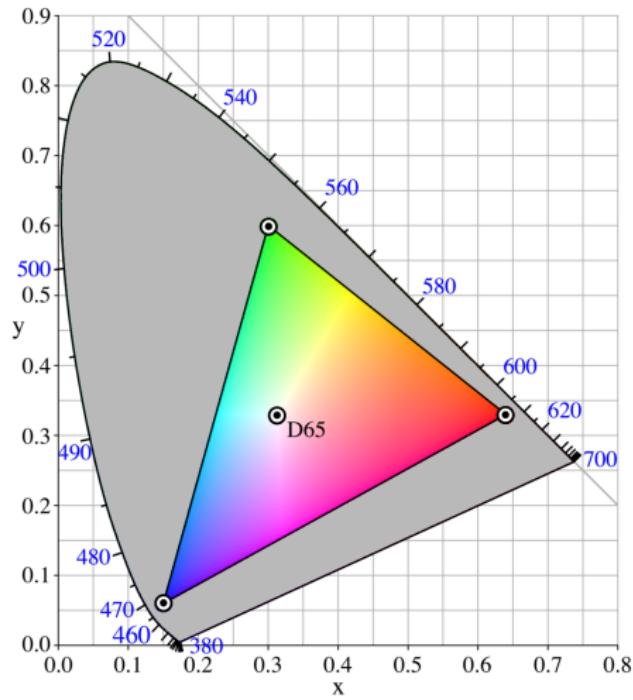
RGB színkocka



Ethan Hein, Flickr

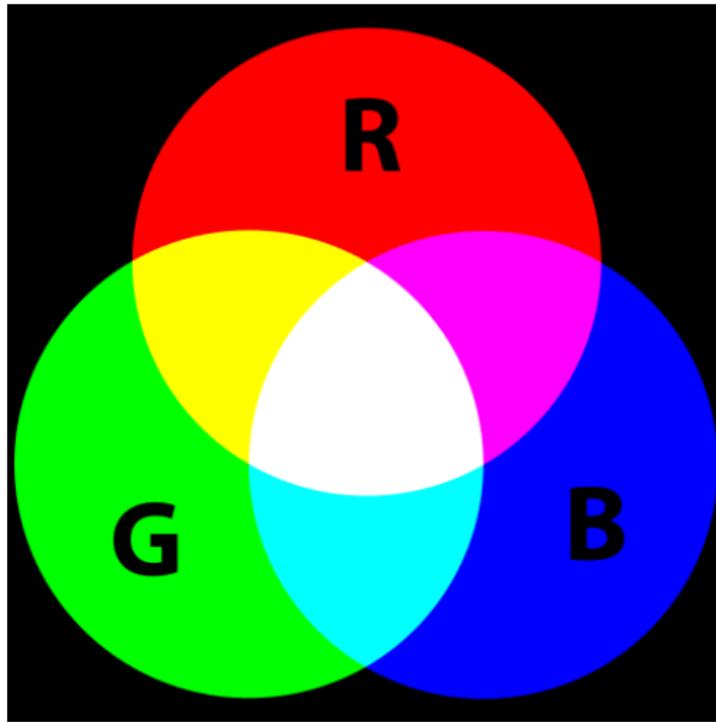
Színek a számítógépen

RGB-ben leírható színek



Színek a számítógépen

Additív színkeverés





Színek a számítógépen

CMY(K)

- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel "szemközti" tengelyeket!



Színek a számítógépen

CMY(K)

- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel "szemközti" tengelyeket!
- Ezek a ciánkék (C), bíbor (M) és sárga (Y).

Színek a számítógépen

CMY(K)

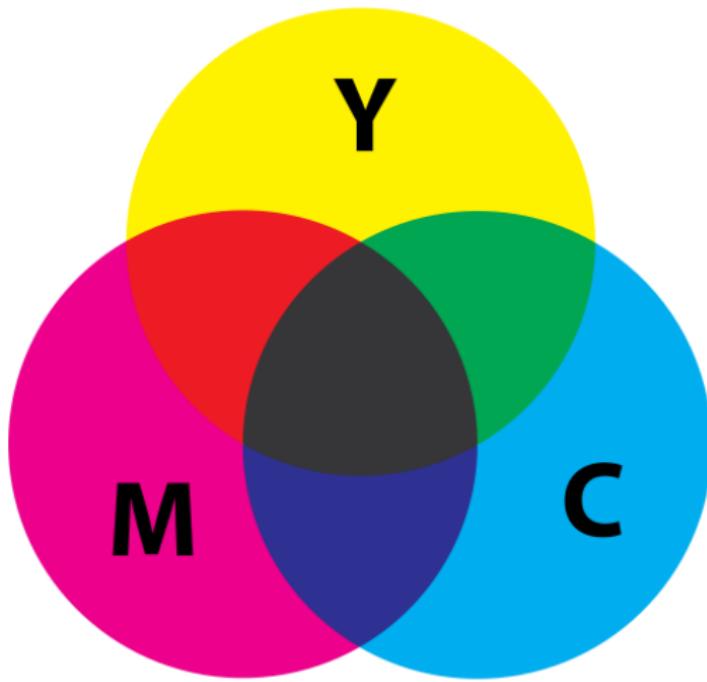
- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel "szemközti" tengelyeket!
- Ezek a ciánkék (C), bíbor (M) és sárga (Y).
- Ez a három "tengely" ugyan úgy kifeszíti a színteret.

Színek a számítógépen

CMY(K)

- Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel "szemközti" tengelyeket!
- Ezek a ciánkék (C), bíbor (M) és sárga (Y).
- Ez a három "tengely" ugyan úgy kifeszíti a színteret.
- Ezt használják a színes nyomtatáshoz (ott: CMYK - K a fekete, hogy ne kelljen a fekete nyomtatásához a másik három patronját egyszerre használni)

Szubsztraktív színkeverés



Színek a számítógépen

HSL és HSV - motiváció

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

Színek a számítógépen

HSL és HSV - motiváció

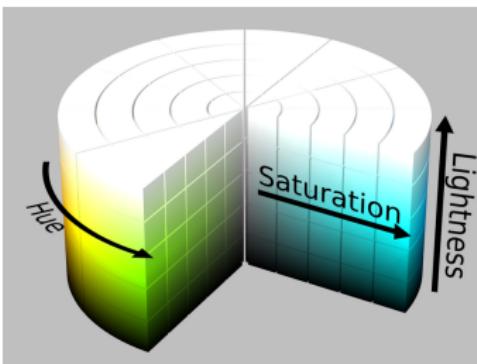
- Amikor színekről beszélünk gyakran használunk olyan fogalmakat, hogy *telitettség*, *élénkség*, *világosság* vagy *sötétség*. Hogyan használhatjuk ezeket RGB színtérben?
- Vegyünk RGB-ben egy színt. Keressük egy kevésbé élénk árnyalatát!



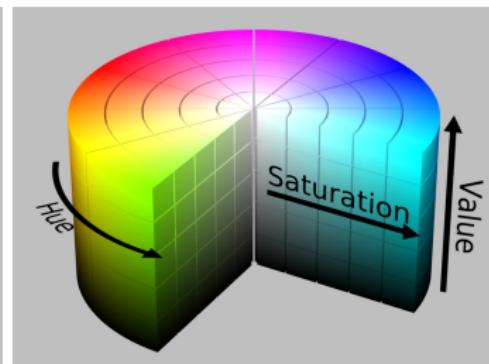
Jacobolus, Wikipedia

HSL és HSV

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



SharkD, Wikipedia



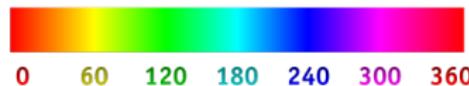
SharkD, Wikipedia



Színek a számítógépen

HSL és HSV

- *Hue* skála:



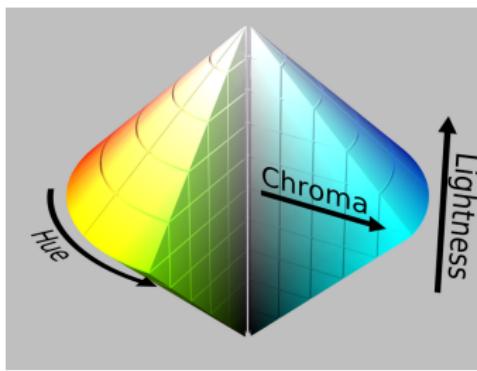
Színek a számítógépen

HSL és HSV

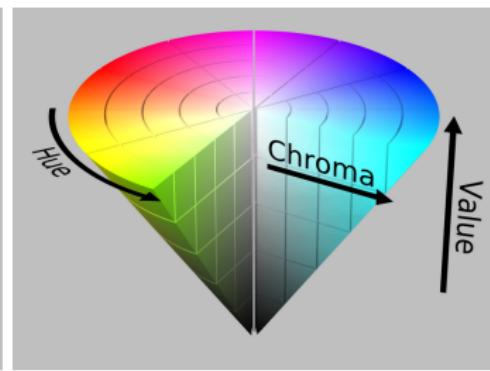
- *Hue* skála:



- Azonos színek:



SharkD, Wikipedia



SharkD, Wikipedia



Görbék

Tartalom

1 Az emberi látás

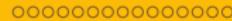
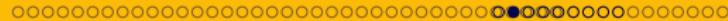
- Motiváció
- A látás fiziológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás



Görbék

Görbék, felületek leírása

- Az görbéket, felületeket (amik közé az egyenes és a sík is tartozik) egy-egy ponthalmaznak tekintjük.



Görbék

Görbék, felületek leírása

- Az görbéket, felületeket (amik közé az egyenes és a sík is tartozik) egy-egy ponthalmaznak tekintjük.
- Hogyan adjuk meg ezeket a halmazokat?
 - explicit: $y = f(x)$



Görbék

Görbék, felületek leírása

- Az görbéket, felületeket (amik közé az egyenes és a sík is tartozik) egy-egy ponthalmaznak tekintjük.
- Hogyan adjuk meg ezeket a halmazokat?
 - explicit: $y = f(x)$ → mi van ha vissza akarjuk "fordítani"?



Görbék

Görbék, felületek leírása

- Az görbéket, felületeket (amik közé az egyenes és a sík is tartozik) egy-egy ponthalmaznak tekintjük.
- Hogyan adjuk meg ezeket a halmazokat?
 - explicit: $y = f(x) \rightarrow$ mi van ha vissza akarjuk "fordítani"?
 - parametrikus: $\mathbf{p}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}, t \in \mathbb{R}$

Görbék

Görbék, felületek leírása

- Az görbéket, felületeket (amik közé az egyenes és a sík is tartozik) egy-egy ponthalmaznak tekintjük.
- Hogyan adjuk meg ezeket a halmazokat?
 - explicit: $y = f(x) \rightarrow$ mi van ha vissza akarjuk "fordítani"?
 - parametrikus: $\mathbf{p}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}, t \in \mathbb{R}$
 - implicit: $x^2 + y^2 - 9 = 0$

Görbék

Görbék, felületek leírása

- Az görbéket, felületeket (amik közé az egyenes és a sík is tartozik) egy-egy ponthalmaznak tekintjük.
- Hogyan adjuk meg ezeket a halmazokat?
 - explicit: $y = f(x) \rightarrow$ mi van ha vissza akarjuk "fordítani"?
 - parametrikus: $\mathbf{p}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}, t \in \mathbb{R}$
 - implicit: $x^2 + y^2 - 9 = 0$
- De hogyan tudom ezeket kirajzolni?



Görbék

Parabola

- Az y tengelyű, $(0, p)$ fókuszpontú parabola egy
 - Implicit egyenlete: $x^2 = 4py$



Görbék

Parabola

- Az y tengelyű, $(0, p)$ fókuszpontú parabola egy
 - Implicit egyenlete: $x^2 = 4py$
 - Explicit egyenlete: $y = \frac{x^2}{4p}$, $t \in \mathbb{R}$



Görbék

Parabola

- Az y tengelyű, $(0, p)$ fókuszpontú parabola egy
 - Implicit egyenlete: $x^2 = 4py$
 - Explicit egyenlete: $y = \frac{x^2}{4p}$, $t \in \mathbb{R}$
 - Parametrikus egyenlete: $\mathbf{p}(t) = [t, \frac{t^2}{4p}]^T$, $t \in \mathbb{R}$



Görbék

Parabola

- Mi van, ha a **c** pontba akarom eltolni az origóból a parabolát?



Görbék

Parabola

- Mi van, ha a **c** pontba akarom eltolni az origóból a parabolát?
- Az implicit és explicit alakban be kell vinni a (c_x, c_y) koordinátákat (pl. implicitből $(x - c_x)^2 = 4p(y - c_y)$ lesz)



Görbék

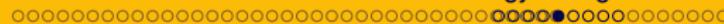
Parabola

- Mi van, ha a **c** pontba akarom eltolni az origóból a parabolát?
- Az implicit és explicit alakban be kell vinni a (c_x, c_y) koordinátákat (pl. implicitből $(x - c_x)^2 = 4p(y - c_y)$ lesz)
- Parametrikus alakban egyszerűen $\mathbf{p}(t) + \mathbf{c}$ lesz az új alak.

Görbék

Kör

- A $\mathbf{c} \in \mathbb{E}^2$ középpontú, r sugarú kör egy
 - Implicit egyenlete: $(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 = r^2$



Görbék

Kör

- A $\mathbf{c} \in \mathbb{E}^2$ középpontú, r sugarú kör egy
 - Implicit egyenlete: $(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 = r^2$
 - Explicit alakban nem tudod az egész kört leírni egy függvénnyel



Görbék

Kör

- A $\mathbf{c} \in \mathbb{E}^2$ középpontú, r sugarú kör egy
 - Implicit egyenlete: $(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 = r^2$
 - Explicit alakban nem tudod az egész kört leírni egy függvénnnyel (DE két darabban menne, pl. $\mathbf{c} = \mathbf{0}$, $r = 1$ mellett $y = \pm\sqrt{1 - x^2}$, ahol $x \in [-1, 1]$)



Görbék

Kör

- A $\mathbf{c} \in \mathbb{E}^2$ középpontú, r sugarú kör egy
 - Implicit egyenlete: $(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 = r^2$
 - Explicit alakban nem tudod az egész kört leírni egy függvénnnyel (DE két darabban menne, pl. $\mathbf{c} = \mathbf{0}$, $r = 1$ mellett $y = \pm\sqrt{1 - x^2}$, ahol $x \in [-1, 1]$)
 - Parametrikus egyenlete: $\mathbf{p}(t) = r[\cos t, \sin t]^T + \mathbf{c}$, ahol $t \in [0, 2\pi)$



Görbék

Ellipszis

- A $\mathbf{c} \in \mathbb{E}^2$ középpontú, nagytengelyével az x tengellyel párhuzamos, $2a$ nagytengelyű és $2b$ kistengelyű ellipszis egy
 - Implicit egyenlete: $\frac{(x-c_x)^2}{a^2} + \frac{(y-c_y)^2}{b^2} = 1$



Görbék

Ellipszis

- A $\mathbf{c} \in \mathbb{E}^2$ középpontú, nagytengelyével az x tengellyel párhuzamos, $2a$ nagytengelyű és $2b$ kistengelyű ellipszis egy
 - Implicit egyenlete: $\frac{(x-c_x)^2}{a^2} + \frac{(y-c_y)^2}{b^2} = 1$
 - Explicit alakban lásd előbb



Görbék

Ellipszis

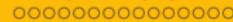
- A $\mathbf{c} \in \mathbb{E}^2$ középpontú, nagytengelyével az x tengellyel párhuzamos, $2a$ nagytengelyű és $2b$ kistengelyű ellipszis egy
 - Implicit egyenlete: $\frac{(x-c_x)^2}{a^2} + \frac{(y-c_y)^2}{b^2} = 1$
 - Explicit alakban lásd előbb
 - Parametrikus egyenlete: $\mathbf{p}(t) = [a \cos t, b \sin t]^T + \mathbf{c}$, ahol $t \in [0, 2\pi)$



Görbék

Ellipszis

- De mi van, ha nem akarom, hogy x, y tengellyel párhuzamosak legyenek a tengelyeink?
 - Implicit egyenlet: ez munkás, nekünk most nem kell...



Görbék

Ellipszis

- De mi van, ha nem akarom, hogy x, y tengellyel párhuzamosak legyenek a tengelyeink?
 - Implicit egyenlet: ez munkás, nekünk most nem kell...
 - Parametrikus egyenlete: báziscsere! Ha az új tengelyek \mathbf{k}, \mathbf{l} , akkor $\mathbf{p}(t) = a \cos t \mathbf{k} + b \sin t \mathbf{l} + \mathbf{c}$, ahol $t \in [0, 2\pi)$



Görbék

Szakasz

- Legyen adott két pont, $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{E}^3$. A két ponton átmenő egyenes parametrikus egyenlete:

$$\mathbf{p}(t) = (1 - t)\mathbf{a} + t\mathbf{b},$$

ahol $t \in \mathbb{R}$.

- Ha $t \in [0, 1]$, akkor az \mathbf{a}, \mathbf{b} pontokat összekötő egyenes szakaszt kapjuk.



Görbék

Görbék parametrikus alakja

- Deriváltak: $\mathbf{p}^{(i)}(t) = [x^{(i)}(t), y^{(i)}(t)]^T, t \in [...], i = 0, 1, 2, \dots$



Görbék

Görbék parametrikus alakja

- Deriváltak: $\mathbf{p}^{(i)}(t) = [x^{(i)}(t), y^{(i)}(t)]^T$, $t \in [...]$, $i = 0, 1, 2, \dots$
- Ha a görbét egy mozgó pont pályájának tekintjük, akkor az első derivált a sebességnek tekinthető, a második a gyorsulásnak stb.



Felületek

Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fisiológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás



Felületek

Megadás

- Explicit: $z = f(x, y)$



Felületek

Megadás

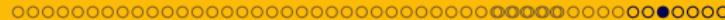
- Explicit: $z = f(x, y)$
- Implicit: $f(x, y, z) = 0$



Felületek

Megadás

- Explicit: $z = f(x, y)$
- Implicit: $f(x, y, z) = 0$
- Parametrikus': $\mathbf{p}(u, v) = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]^T$,
 $(u, v) \in [a, b] \times [c, d]$



Felületek

Felületek felületi normálisa

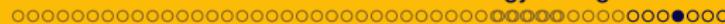
- A parametrikus alakban adott a felület:

$$\mathbf{n}(u, v) = \partial_u \mathbf{p}(u, v) \times \partial_v \mathbf{p}(u, v)$$

Felületek

Felületek felületi normálisa

- A parametrikus alakban adott a felület:
 $\mathbf{n}(u, v) = \partial_u \mathbf{p}(u, v) \times \partial_v \mathbf{p}(u, v)$
- Implicit alakban adott felületnél $\mathbf{n}(x, y, z) = \nabla f$, ahol
 $\nabla f = [f_x, f_y, f_z]^T$



Felületek

Gömb

- Implicit: $(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 = r^2$



Felületek

Gömb

- Implicit: $(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 = r^2$
- Parametrikus:

$$\mathbf{p}(u, v) = r[\cos u \sin v, \sin u \sin v, \cos v]^T + \mathbf{c}$$

,

$(u, v) \in [0, 2\pi) \times [0, \pi]$



Felületek

Ellipszoid

- Implicit: $\frac{(x-c_x)^2}{a^2} + \frac{(y-c_y)^2}{b^2} + \frac{(z-c_z)^2}{c^2} = 1$



Felületek

Ellipszoid

- Implicit: $\frac{(x-c_x)^2}{a^2} + \frac{(y-c_y)^2}{b^2} + \frac{(z-c_z)^2}{c^2} = 1$

- Parametrikus:

$$\mathbf{p}(u, v) = [a \cos u \sin v, b \sin u \sin v, c \cos v]^T + \mathbf{c},$$
$$(u, v) \in [0, 2\pi) \times [0, \pi]$$



Felületek

Egy egyszerű paraboloid

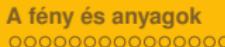
- Parametrikus: $\mathbf{p}(u, v) = [u, v, au^2 + bv^2]^T + \mathbf{c}$,
 $(u, v) \in [0, 2\pi) \times [0, \pi]$



Felületek

Amire figyelni érdemes

- Matematikában általában a felfelé mutató tengelynek a z tengelyt tekintik



Felületek

Amire figyelni érdemes

- Matematikában általában a felfelé mutató tengelynek a z tengelyt tekintik
- A fenti képletek is ennek megfelelően adják a "várt" képet



Felületek

Amire figyelni érdemes

- Matematikában általában a felfelé mutató tengelynek a z tengelyt tekintik
- A fenti képletek is ennek megfelelően adják a "várt" képet
- Grafikában viszont sokszor az y mutat felfelé!



A fény és anyagok

- A fény elektromágneses hullám

A fény és anyagok

- A fény elektromágneses hullám
- Az anyagokat olyan színűnek látjuk, amilyen színű fényt visszavernek

A fény és anyagok

- A fény elektromágneses hullám
- Az anyagokat olyan színűnek látjuk, amilyen színű fényt visszavernek
- Különböző anyagok különböző módon viselkednek a fénnel szemben



Anyagok

Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fisiológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás



Anyagok

Emittáló felületek

- Fénykibocsátó felületek emisszió anyagnak hívjuk



Anyagok

Emittáló felületek

- Fénykibocsátó felületek emisszió anyagnak hívjuk
- Ezeket hívjuk fényforrásoknak, ilyen a Nap, a lámpa stb.



Anyagok

Diffúz felületek

- A diffúz vagy matt felületeket minden irányból nézve ugyanolyan színűnek látjuk



Anyagok

Diffúz felületek

- A diffúz vagy matt felületeket minden irányból nézve ugyanolyan színűnek látjuk
- Ilyen például a frissen meszelt fal vagy a homok stb.



Anyagok

Diffúz felületek

- A diffúz vagy matt felületeket minden irányból nézve ugyanolyan színűnek látjuk
- Ilyen például a frissen meszelt fal vagy a homok stb.
- A diffúz felület a beérkező fénysugár energiáját minden irányban azonos intenzitással veri vissza



Anyagok

Spekuláris felületek

- Tükörző felületek, az ideális fénytörés irányába verik vissza nagyrészt a beérkező fényt



Anyagok

Átlátszó felületek

- Ezeken a felületeken áthalad a fény, a beérkező fénysugár energiájának java részét átereszti



Anyagok

Áttetsző felületek

- Ezek a beérkező fény nagy részét magukba engedik, de csak kis része lép ki az anyagból

Anyagok

Áttetsző felületek

- Ezek a beérkező fény nagy részét magukba engedik, de csak kis része lép ki az anyagból
- Pl. tej, bőr



Anyagok

Anizotróp felületek

- A felületet a tengelye körül forgatva, a beeső és visszaverődő szögeket tartva is változik a színe



Anyagok

Anizotróp felületek

- A felületet a tengelye körül forgatva, a beeső és visszaverődő szögeket tartva is változik a színe
- Mint például a CD

Fényforrás modellek

Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fisiológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- **Fényforrás modellek**
- Fény-felület kölcsönhatás



Fényforrás modellek

Fényforrás modellek

Fény

A fény elektromágneses hullám



Fényforrás modellek

Fényforrás modellek

Fény

A fény elektromágneses hullám

Absztrakt fényforrások



Fényforrás modellek

Fényforrás modellek

Fény

A fény elektromágneses hullám

Absztrakt fényforrások

- Irány fényforrás



Fényforrás modellek

Fényforrás modellek

Fény

A fény elektromágneses hullám

Absztrakt fényforrások

- Irány fényforrás
- Pont fényforrás



Fényforrás modellek

Fényforrás modellek

Fény

A fény elektromágneses hullám

Absztrakt fényforrások

- Irány fényforrás
- Pont fényforrás
- *Spot* fényforrás



Fényforrás modellek

Helmholtz-törvény

- Helmholtz-féle szimmetria: a fénysugár megfordítható



Fényforrás modellek

Helmholtz-törvény

- Helmholtz-féle szimmetria: a fénysugár megfordítható
- Azaz: $f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) = f_r(\mathbf{x}, \omega, \omega')$



Fényforrás modellek

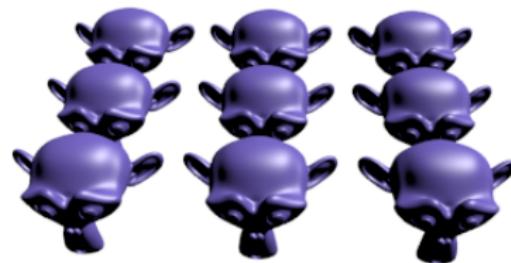
Helmholtz-törvény

- Helmholtz-féle szimmetria: a fénysugár megfordítható
- Azaz: $f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) = f_r(\mathbf{x}, \omega, \omega')$
- Ez két dologért is jó:
 - Garantálja, hogy végső soron a radiancia csökken.
 - Nézhetjük "visszafelé" a sugarakat.



Fényforrás modellek

Fényforrás modellek



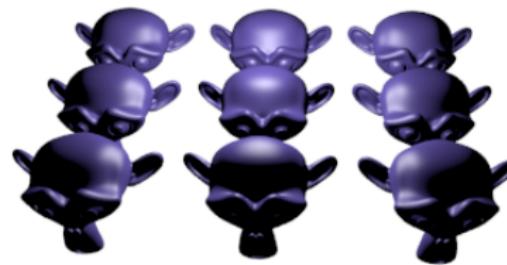
Irány fényforrás





Fényforrás modellek

Fényforrás modellek



Pont fényforrás





Fényforrás modellek

Fényforrás modellek



Spot fényforrás

Tartalom

1 Az emberi látás

- Motiváció
- A látás fiziológiája
- Színek a számítógépen

2 Egyszerű görbék és felületek

- Görbék
- Felületek

3 A fény és anyagok

- Anyagok
- Fényforrás modellek
- Fény-felület kölcsönhatás



Fény-felület kölcsönhatás

BRDF

- Legyen L^{in} egy adott adott irányból a felület egy pontjára beérkező, L pedig az onnan visszavert fény intenzitása

BRDF

- Legyen L^{in} egy adott adott irányból a felület egy pontjára beérkező, L pedig az onnan visszavert fény intenzitása
- Jelölje \mathbf{I} a fényforrás felé mutató egységvektort, \mathbf{v} a nézőpont felé mutató egységvektort, \mathbf{n} pedig a felületi normálist az adott pontban. A θ' legyen az \mathbf{n} és \mathbf{I} által bezárt szög

BRDF

- Legyen L^{in} egy adott adott irányból a felület egy pontjára beérkező, L pedig az onnan visszavert fény intenzitása
- Jelölje \mathbf{I} a fényforrás felé mutató egységvektort, \mathbf{v} a nézőpont felé mutató egységvektort, \mathbf{n} pedig a felületi normálist az adott pontban. A θ' legyen az \mathbf{n} és \mathbf{I} által bezárt szög
- Ekkor a kétirányú visszaverődéses eloszlási függvény, BRDF (bi-directional reflection distribution function) a következő:

BRDF

- Legyen L^{in} egy adott adott irányból a felület egy pontjára beérkező, L pedig az onnan visszavert fény intenzitása
- Jelölje \mathbf{l} a fényforrás felé mutató egységvektort, \mathbf{v} a nézőpont felé mutató egységvektort, \mathbf{n} pedig a felületi normálist az adott pontban. A θ' legyen az \mathbf{n} és \mathbf{l} által bezárt szög
- Ekkor a kétirányú visszaverődéses eloszlási függvény, BRDF (bi-directional reflection distribution function) a következő:

$$f_r(\mathbf{l}, \mathbf{v}) = \frac{L}{L^{in} \cos \theta'}$$

Jelölések

- $\mathbf{v} := \omega$ a nézeti irány, azaz a szem/kamera fele mutató vektor
- $\mathbf{l} := -\omega'$ a megvilágító, a fényt "adó" pont fele mutató vektor, ekkor a beesési irány $-\mathbf{l}$ ($= \omega'$)
- \mathbf{n} a felületi normális
- $\mathbf{v}, \mathbf{l}, \mathbf{n}$ egységvektorok
- θ' a \mathbf{l} és a \mathbf{n} által bezárt szög

Fény-felület kölcsönhatás

Ideális visszaverődés

Visszaverődési törvény

A beesési irány ($-I$), a felületi normális (n), és a kilépési irány (r) egy síkban van, valamint a beesési szög (θ') megegyezik a visszaverődési szöggel (θ).

Ideális visszaverődés

- Az ideális tükör csak az r tükörirányba ver vissza.

Ideális visszaverődés

- Az ideális tükör csak az \mathbf{r} tükörirányba ver vissza.
-

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_r \frac{\delta(\mathbf{r} - \mathbf{v})}{\cos \theta'}$$

Ideális visszaverődés

- Az ideális tükör csak az \mathbf{r} tükörirányba ver vissza.



$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_r \frac{\delta(\mathbf{r} - \mathbf{v})}{\cos \theta'}$$

- δ a *Dirac-delta* függvény, ami egy általánosított függvény, amely minden nem nulla paraméterre nullát ad, de a valós számok felett vett integrálja 1.

Ideális visszaverődés

- Az ideális tükör csak az \mathbf{r} tükörirányba ver vissza.
-

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_r \frac{\delta(\mathbf{r} - \mathbf{v})}{\cos \theta'}$$

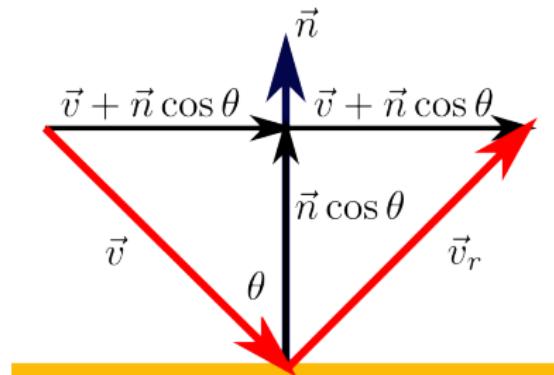
- δ a *Dirac-delta* függvény, ami egy általánosított függvény, amely minden nem nulla paraméterre nullát ad, de a valós számok felett vett integrálja 1.
- A k_r visszaverődési együttható a *Fresnel*-együttható. Ez függ az anyag törésmutatójából, és az elektromos vezetési képességeből származik.

Ideális visszaverődés

- Az ideális tükör csak az \mathbf{r} tükörirányba ver vissza.
- $$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_r \frac{\delta(\mathbf{r} - \mathbf{v})}{\cos \theta'}$$
- δ a *Dirac-delta* függvény, ami egy általánosított függvény, amely minden nem nulla paraméterre nullát ad, de a valós számok felett vett integrálja 1.
- A k_r visszaverődési együttható a *Fresnel-együttható*. Ez függ az anyag törésmutatójából, és az elektromos vezetési képességből származik.
- A *Fresnel-együttható* a visszavert és beeső energia hányadát fejezi ki.

Visszaverődési irány

- Általános esetben, egy \mathbf{v} beeső vektorból a visszaverődési- vagy tükörirány:
 - $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - 2\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})$
 - Mivel $\cos \theta = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}$, és \mathbf{n} , \mathbf{v} egységnyi hosszúak.



Ideális törés

Snellius-Descartes törvény

A beesési irány ($-I$), a felületi normális (n), és a törési irány (t) egy síkban van, valamint $\eta = \frac{\sin \theta'}{\sin \theta}$, ahol η az anyagok relatív törésmutatója.

Ideális törés

Snellius-Descartes törvény

A beesési irány ($-I$), a felületi normális (n), és a törési irány (t) egy síkban van, valamint $\eta = \frac{\sin \theta'}{\sin \theta}$, ahol η az anyagok relatív törésmutatója.

Néhány törésmutató

- Vákuum 1.0
- Levegő 1.0003
- Víz 1.3333
- Üveg 1.5
- Gyémánt 2.417



Fény-felület kölcsönhatás

Ideális törés

- Jelölje t az ideális törési irányt.

Fény-felület kölcsönhatás

Ideális törés

- Jelölje **t** az ideális törési irányt.
- Az ideális tükröhöz hasonlóan kapjuk:



Fény-felület kölcsönhatás

Ideális törés

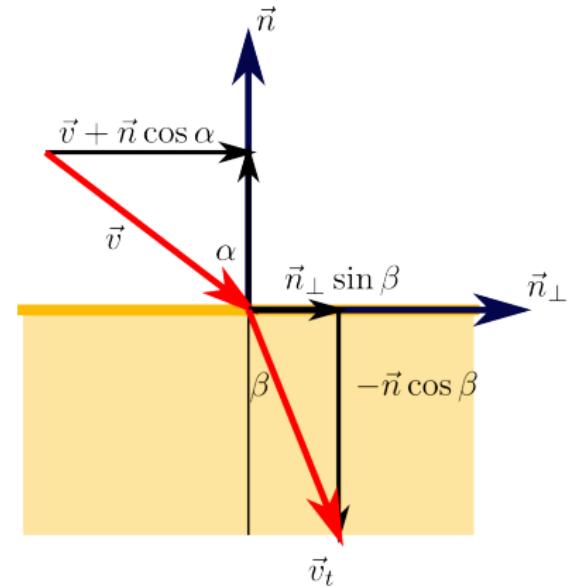
- Jelölje \mathbf{t} az ideális törési irányt.
- Az ideális tükörhöz hasonlóan kapjuk:
-

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_t \frac{\delta(\mathbf{t} - \mathbf{v})}{\cos \theta'}$$

Törési irány

- Snellius-Descartes

törvény: $\eta = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$



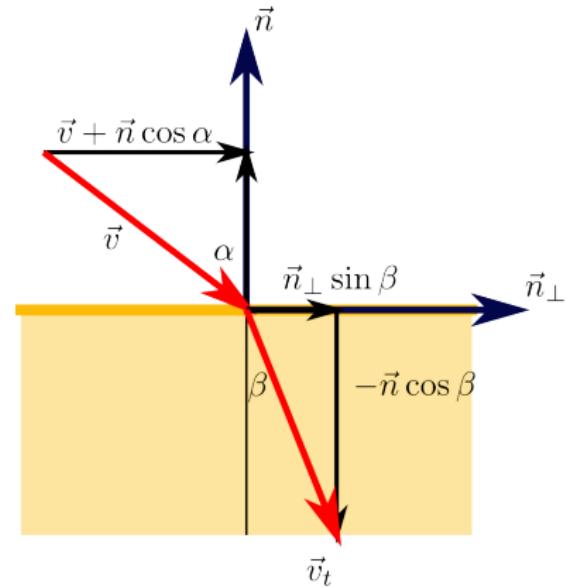
Fény-felület kölcsönhatás

Törési irány

- Snellius-Descartes

$$\text{törvény: } \eta = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

- $\mathbf{v}_t = \mathbf{n}_\perp \sin \beta - \mathbf{n} \cos \beta$



Fény-felület kölcsönhatás

Törési irány

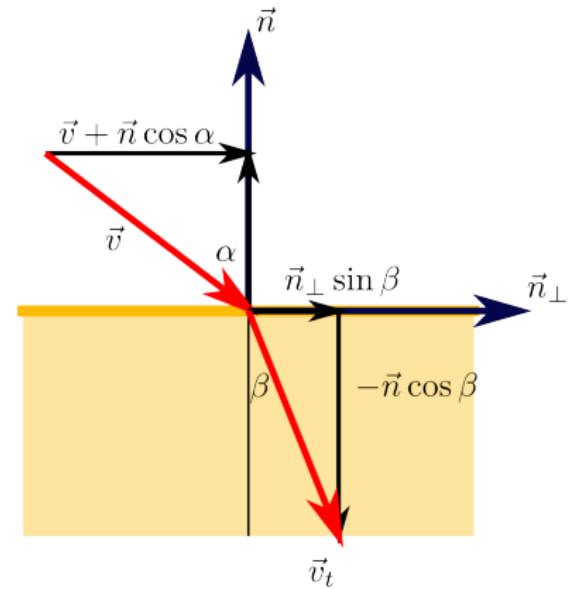
- Snellius-Descartes

$$\text{törvény: } \eta = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

- $\mathbf{v}_t = \mathbf{n}_{\perp} \sin \beta - \mathbf{n} \cos \beta$

- $\mathbf{n}_{\perp} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{n} \cos \alpha}{\sin \alpha}$

- $\mathbf{v}_t = \frac{\mathbf{v}}{\eta} + \mathbf{n} \left(\frac{\cos \alpha}{\eta} - \cos \beta \right)$



Fény-felület kölcsönhatás

Törési irány

- Snellius-Descartes

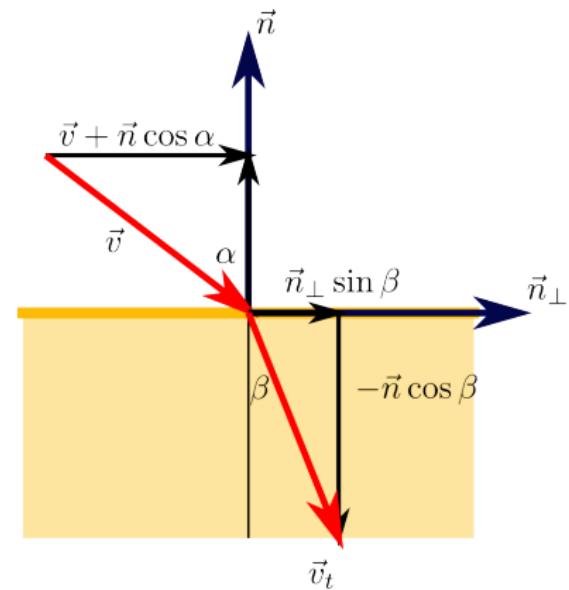
$$\text{törvény: } \eta = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

- $\mathbf{v}_t = \mathbf{n}_\perp \sin \beta - \mathbf{n} \cos \beta$

- $\mathbf{n}_\perp = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{n} \cos \alpha}{\sin \alpha}$

- $\mathbf{v}_t = \frac{\mathbf{v}}{\eta} + \mathbf{n} \left(\frac{\cos \alpha}{\eta} - \cos \beta \right)$

- $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\eta^2}}$



Törési irány

- ### • Snellius-Descartes

törvény: $\eta = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$

- $\mathbf{v}_t = \mathbf{n}_\perp \sin \beta - \mathbf{n} \cos \beta$

$$\bullet \quad n_{\perp} = \frac{v + n \cos \alpha}{\sin \alpha}$$

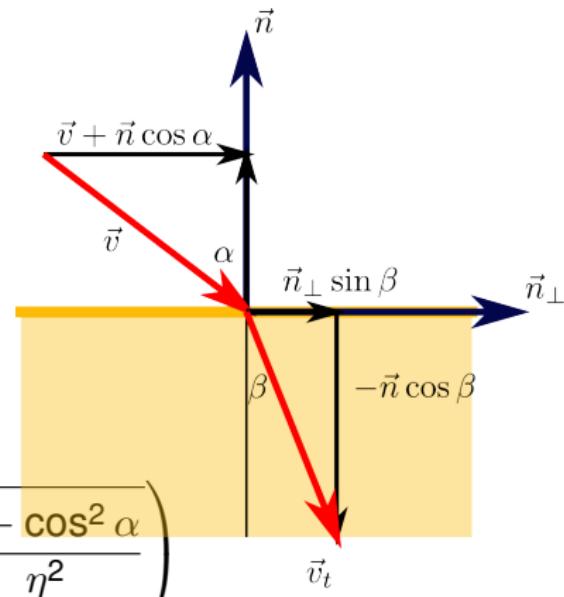
$$\bullet \quad \mathbf{v}_t = \frac{\mathbf{v}}{\eta} + \mathbf{n} \left(\frac{\cos \alpha}{\eta} - \cos \beta \right)$$

$$\bullet \cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} =$$

$$\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\eta^2}}$$

1

$$\mathbf{v}_t = \frac{\mathbf{v}}{\eta} + \mathbf{n} \left(\frac{\cos \alpha}{\eta} - \sqrt{1 - \frac{1 - \cos^2 \alpha}{\eta^2}} \right)$$

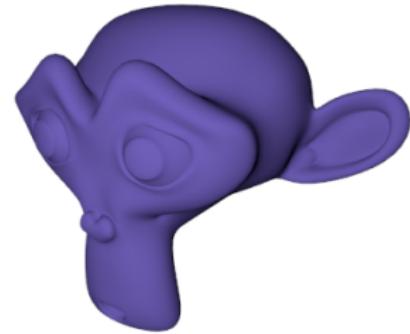




Fény-felület kölcsönhatás

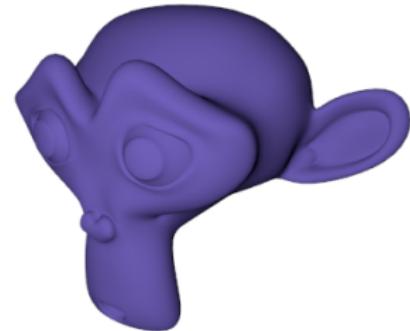
Lambert-törvény

- Optikailag durva, *diffúz* felületek leírására jó.



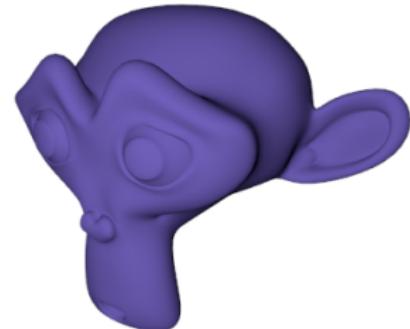
Lambert-törvény

- Optikailag durva, *diffúz* felületek leírására jó.
- Feltételezés: a visszavert fénymennyiség nem függ a nézeti iránytól.



Lambert-törvény

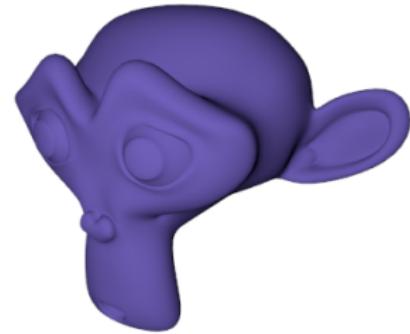
- Optikailag durva, *diffúz* felületek leírására jó.
- Feltételezés: a visszavert fénymennyiség nem függ a nézeti iránytól.
- Helmholtz-törvényt miatt akkor a bejövő iránytól sem függhet, azaz konstans:



Lambert-törvény

- Optikailag durva, *diffúz* felületek leírására jó.
- Feltételezés: a visszavert fénymennyiség nem függ a nézeti iránytól.
- Helmholtz-törvényt miatt akkor a bejövő iránytól sem függhet, azaz konstans:

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_d$$

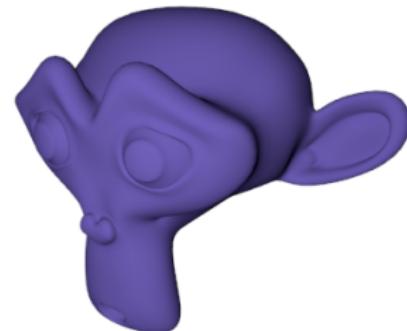


Fény-felület kölcsönhatás

Lambert-törvény

- Optikailag durva, *diffúz* felületek leírására jó.
- Feltételezés: a visszavert fénymennyiség nem függ a nézeti iránytól.
- Helmholtz-törvényt miatt akkor a bejövő iránytól sem függhet, azaz konstans:

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_d$$



- Csak ezt nézve:

$$L_{ref} = L_i k_d \cos^+ \theta'$$



Fény-felület kölcsönhatás

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

- A tükörirányban intenzíven visszaverő, de attól távolodva gyorsan elhaló "csillanás" adható meg vele.

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

- A tükörirányban intenzíven visszaverő, de attól távolodva gyorsan elhaló "csillanás" adható meg vele.
- Legyen ϕ az r tükörirány és a v nézeti irány által bezárt szög.

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

- A tükörirányban intenzíven visszaverő, de attól távolodva gyorsan elhaló "csillanás" adható meg vele.
- Legyen ϕ az \mathbf{r} tükörirány és a \mathbf{v} nézeti irány által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \phi = \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

- A tükörirányban intenzíven visszaverő, de attól távolodva gyorsan elhaló "csillanás" adható meg vele.
- Legyen ϕ az \mathbf{r} tükörirány és a \mathbf{v} nézeti irány által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \phi = \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$
- Olyan függvényt keresünk, ami $\phi = 0$ -ra nagy, de gyorsan elhal.

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

- A tükörirányban intenzíven visszaverő, de attól távolodva gyorsan elhaló "csillanás" adható meg vele.
- Legyen ϕ az \mathbf{r} tükörirány és a \mathbf{v} nézeti irány által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \phi = \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$
- Olyan függvényt keresünk, ami $\phi = 0$ -ra nagy, de gyorsan elhal.
-

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_s \frac{\cos^n \phi}{\cos \theta'}$$

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

- A tükörirányban intenzíven visszaverő, de attól távolodva gyorsan elhaló "csillanás" adható meg vele.
- Legyen ϕ az \mathbf{r} tükörirány és a \mathbf{v} nézeti irány által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \phi = \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$
- Olyan függvényt keresünk, ami $\phi = 0$ -ra nagy, de gyorsan elhal.
-

$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_s \frac{\cos^n \phi}{\cos \theta'}$$

Nem szimmetrikus!

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

- A tükörirányban intenzíven visszaverő, de attól távolodva gyorsan elhaló "csillanás" adható meg vele.
- Legyen ϕ az \mathbf{r} tükörirány és a \mathbf{v} nézeti irány által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \phi = \mathbf{r} \cdot \mathbf{v}$
- Olyan függvényt keresünk, ami $\phi = 0$ -ra nagy, de gyorsan elhal.
-

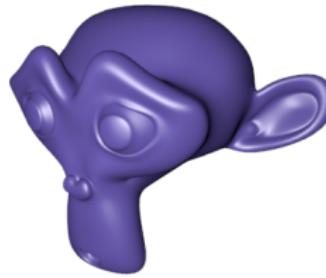
$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_s \frac{\cos^n \phi}{\cos \theta'}$$

Nem szimmetrikus!

- Csak ezt nézve: $L_{ref} = L_i k_s (\cos^+ \phi)^n$

Fény-felület kölcsönhatás

Spekuláris visszaverődés - Phong modell

 $n = 5$  $n = 25$  $n = 50$

Spekuláris visszaverődés - Phong-Blinn modell

- Legyen \mathbf{h} a nézeti irány és a megvilágító pont fele mutató vektorok felezővektora.

Spekuláris visszaverődés - Phong-Blinn modell

- Legyen \mathbf{h} a nézeti irány és a megvilágító pont fele mutató vektorok felezővektora.
-

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{l}}{\|\mathbf{v} + \mathbf{l}\|}$$

Spekuláris visszaverődés - Phong-Blinn modell

- Legyen \mathbf{h} a nézeti irány és a megvilágító pont fele mutató vektorok felezővektora.

-

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{l}}{\|\mathbf{v} + \mathbf{l}\|}$$

- Legyen δ a \mathbf{h} és az \mathbf{n} normálvektor által bezárt szög.

Spekuláris visszaverődés - Phong-Blinn modell

- Legyen \mathbf{h} a nézeti irány és a megvilágító pont fele mutató vektorok felezővektora.

-

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{l}}{\|\mathbf{v} + \mathbf{l}\|}$$

- Legyen δ a \mathbf{h} és az \mathbf{n} normálvektor által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \delta = \mathbf{h} \cdot \mathbf{n}$

Spekuláris visszaverődés - Phong-Blinn modell

- Legyen \mathbf{h} a nézeti irány és a megvilágító pont fele mutató vektorok felezővektora.



$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{l}}{\|\mathbf{v} + \mathbf{l}\|}$$

- Legyen δ a \mathbf{h} és az \mathbf{n} normálvektor által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \delta = \mathbf{h} \cdot \mathbf{n}$



$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_s \frac{\cos^n \delta}{\cos \theta'}$$

Spekuláris visszaverődés - Phong-Blinn modell

- Legyen \mathbf{h} a nézeti irány és a megvilágító pont fele mutató vektorok felezővektora.



$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{l}}{\|\mathbf{v} + \mathbf{l}\|}$$

- Legyen δ a \mathbf{h} és az \mathbf{n} normálvektor által bezárt szög.
- Ekkor $\cos \delta = \mathbf{h} \cdot \mathbf{n}$



$$f_r(\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{l}) = k_s \frac{\cos^n \delta}{\cos \theta'}$$

- Csak ezt nézve: $L_{ref} = L_i k_s (\cos \delta)^n$