



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *elektrotehniko*

Nastanek slike #2

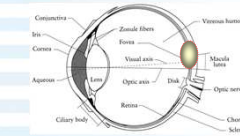
Stanislav Kovačič



<http://vision.fe.uni-lj.si/>



Oko "kamera"



V orientaciji:

Premer mrežnice (retine): cca 30mm

Premer makule: cca 6mm

Fovea: cca 1,5mm

„jamica“: cca 0,2mm

Debelina retine: cca 0,5mm

Število čepkov: cca 7M

Število paličic: cca 100M

Pojmovanje barv je posledica človeškega vidnega zaznavanja

Svetlobni receptorji:

paličice ("ne ločijo barv"), niso spektralno selektivne

čepki ("ločijo barve"), so v vidnem spektru spektralno selektivni

Tri vrste spektralno selektivnih čepkov:

(**R**, **G**, **B**) oziroma (**L**(ong), **M**(edium), **S**(hort))

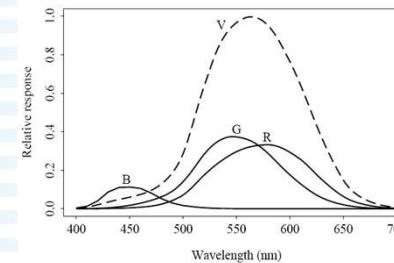


Iz vsebine

- Osnovno o merjenju svetlobnih učinkov
- Oko
- Fotometrična enačba leče
- Nekaj o lečah in kamerah
- Nekatere tehnike osvetlitve
- Barve, zaznavanje barv in barvni prostori



Spektralna občutljivost očesa



Oko je najobčutljivejše na svetlobo sredi vidnega spektra.

Čepki "integrirajo" svetlobno energijo v treh spektralnih pasovih ("filtrirajo") - trikromatizem. Zato zaznavamo barve.

"Dar" zaznavanja barv je za vsakega od nas neprecenljivo bogastvo.



Seštevanje (mešanje) barv

Modra
Zelena
Rdeča



Turkizna
Rumena
Škrlatna

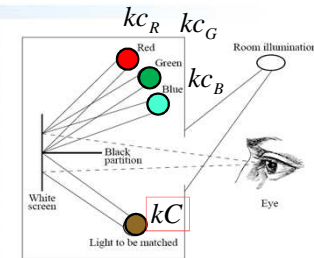
Z mešanjem treh primarnih (osnovnih) barv se da dobiti skoraj vsako barvo, ki jo zazna človeško oko.
Pogoj "primarnosti" je, da se z mešanjem dveh ne da dobiti tretje.

http://en.wikipedia.org/wiki/File:RGB_illumination.jpg



Seštevanje barv 2/4

Grassmanov zakon aditivnosti



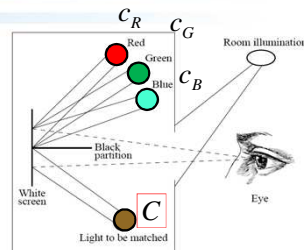
$$C = c_R R + c_G G + c_B B$$

$$kC = kc_R R + kc_G G + kc_B B$$



Seštevanje barv 1/4

Grassmanov zakon aditivnosti

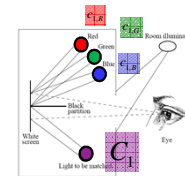


$$C = c_R R + c_G G + c_B B$$

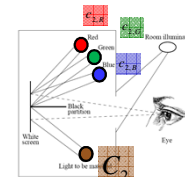


Seštevanje barv 3/4

$$C_1 = c_{1,R} R + c_{1,G} G + c_{1,B} B$$



$$C_2 = c_{2,R} R + c_{2,G} G + c_{2,B} B$$



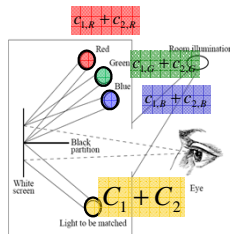
$$C_1 = C_2 \Leftrightarrow [c_{1,R} \quad c_{1,G} \quad c_{1,B}] = [c_{2,R} \quad c_{2,G} \quad c_{2,B}]$$



Seštevanje barv 4/4

$$C_1 = c_{1,R}R + c_{1,G}G + c_{1,B}B$$

$$C_2 = c_{2,R}R + c_{2,G}G + c_{2,B}B$$

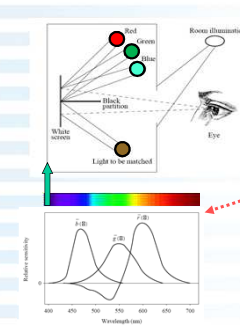


$$C_1 + C_2 = (c_{1,R} + c_{2,R})R + (c_{1,G} + c_{2,G})G + (c_{1,B} + c_{2,B})B$$



Funkcije barvnega ujemanja 2/5

Poskus ponovimo za vse valovne dolžine (oz spektralne pasove) v vidnem spektru ($i=0,1,2,\dots,N-1$).



$$U(\lambda_i) = r(\lambda_i)R + g(\lambda_i)G + b(\lambda_i)B$$

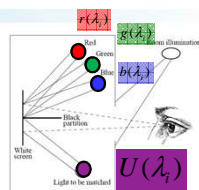
Rezultat eksperimenta so tri funkcije ujemanja barv, "color matching functions".

Zaradi lastnosti linearnosti smemo pričakovati, da se da na podlagi teh funkcij določiti deleže primarnih barv za vsak svetlobni vir z bogatejšo spektralno vsebino.



Funkcije barvnega ujemanja 1/5

Sevanje **enokromatskega/monokromatskega** (enobarvnega) svetlobnega vira **moči ene enote ene valovne dolžine** oz ozkega pasu valovnih dolžin (npr 5nm) primerjamo z viri izbranih primarnih barv, **R, G, B**.

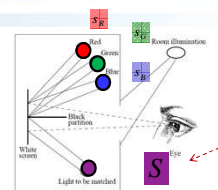


$$U(\lambda_i) = r(\lambda_i)R + g(\lambda_i)G + b(\lambda_i)B$$



Funkcije barvnega ujemanja 3/5

Vzemimo (ponovno) poljuben, spektralno bogatejši svetlobni vir, **S**



$$S = s_R R + s_G G + s_B B$$

Naj bo spekter vira **S** naslednji:

$$S = [S(\lambda_0), S(\lambda_1), \dots, S(\lambda_i), \dots, S(\lambda_{N-1})]$$



Funkcije barvnega ujemanja 4/5

Na podlagi linearnosti (seštevanja, množenja) sledi:

$$S = S(\lambda_0)U(\lambda_0) + S(\lambda_1)U(\lambda_1) + \dots + S(\lambda_i)U(\lambda_i) + \dots + S(\lambda_{N-1})U(\lambda_{N-1}) = \sum_{i=0}^{i=N-1} S(\lambda_i)U(\lambda_i)$$

$$S = \sum_{i=0}^{i=N-1} S(\lambda_i)U(\lambda_i) = \sum_{i=0}^{i=N-1} S(\lambda_i)[r(\lambda_i)R + g(\lambda_i)G + b(\lambda_i)B]$$

$$S = \sum_{i=0}^{i=N-1} [S(\lambda_i)r(\lambda_i)]R + \sum_{i=0}^{i=N-1} [S(\lambda_i)g(\lambda_i)]G + \sum_{i=0}^{i=N-1} [S(\lambda_i)b(\lambda_i)]B$$

$$S = s_R R + s_G G + s_B B$$

Komponente vira S (mešanico primarnih barv) se da določiti s "projekcijo" vira na funkcije ujemanja ali s prilagajanjem uteži primarnih barv

Op.: v zveznem bi namesto vsot imeli integrale $s_R = \int S(\lambda)r(\lambda)d\lambda$



Pogled z "druge strani"

Za izbrane tri primarne barve z dano spektralno vsebino se da s primerno izbiro uteži ustvariti želen spektralni potek in torej želeno barvo.

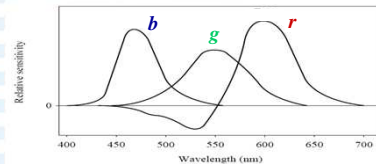
$$\begin{bmatrix} S(\lambda_0) \\ S(\lambda_1) \\ \vdots \\ S(\lambda_i) \\ \vdots \\ S(\lambda_{N-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R(\lambda_0) & G(\lambda_0) & B(\lambda_0) \\ R(\lambda_1) & G(\lambda_1) & B(\lambda_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R(\lambda_i) & G(\lambda_i) & B(\lambda_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R(\lambda_{N-1}) & G(\lambda_{N-1}) & B(\lambda_{N-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s \\ g_s \\ b_s \end{bmatrix}$$



Funkcije barvnega ujemanja 5/5

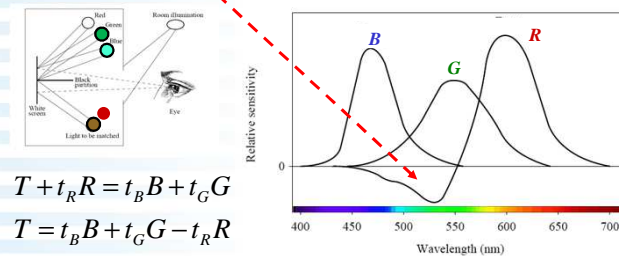
Za izbrane tri primarne barve se da s tremi funkcijami ujemanja barv določiti mešanico primarnih barv za spektralno bogatejši svetlobni vir, S

$$\begin{bmatrix} s_R \\ s_G \\ s_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(\lambda_0) & r(\lambda_1) & \dots & r(\lambda_i) & \dots & r(\lambda_{N-1}) \\ g(\lambda_0) & g(\lambda_1) & \dots & g(\lambda_i) & \dots & g(\lambda_{N-1}) \\ b(\lambda_0) & b(\lambda_1) & \dots & b(\lambda_i) & \dots & b(\lambda_{N-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S(\lambda_0) \\ S(\lambda_1) \\ \vdots \\ S(\lambda_i) \\ \vdots \\ S(\lambda_{N-1}) \end{bmatrix}$$



CIE funkcije barvnega ujemanja

Opazite kaj nenavadnega v poteku funkcij ujemanja barv? Negativne uteži?



$$T + t_R R = t_B B + t_G G$$

$$T = t_B B + t_G G - t_R R$$

Z realnimi primarnimi barvami se ne da ustvariti vseh zaznavnih barv - funkcije niso povsod nenegativne.



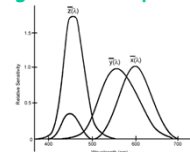
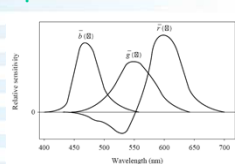
CIE funkcije barvnega ujemanja

CIE (1931) je na podlagi eksperimentalnih krivulj določila krivulje ujemanja barv, ki nimajo negativnih vrednosti, a za "izmišljene" - imaginarne primarne barve.

Standardni "barvni prostor" CIE XYZ (Color space)

$$X = \int E(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad Y = \int E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad Z = \int E(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda$$

Op.: V diskretnem imamo namesto integralov vsote produktov



CIE 1931 standardni opazovalec (za 2° zorni kot - fovea)



Kromatični diagram

Področje podkvasne oblike pokriva zaznavne barve človeškega vida (gamut). Z mešanjem dveh barv, A in B, lahko dobimo barve na daljci AB.

(gamut je daljica).

Z mešanjem treh barv A, B in C, lahko dobimo barve v trikotniku ABC

(gamut je trikotnik).

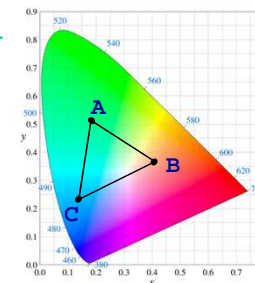
Noben trikotnik ne pokrije cele podkve

(ne pokrije gamuta človeških oči).

Mešanica enakih deležev barv A in B ne leži na sredini daljice (barvni prostor ni zaznavno "homogen").

To pomeni:

Evklidska razdalja med barvama ni sorazmerna zaznani razliki barv



Kromatični diagram

Vizualizacija 3D barvnega prostora (X,Y,Z) CIE X Y Z predstavlja sama po sebi problem.

Zato je CIE vpeljal normiran barvni prostor CIE x y

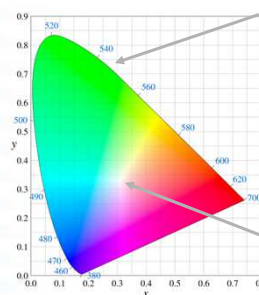
$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$X+Y+Z=1$$

Intenziteta ne vpliva (bitveno) na percepcijo barve



Barve bolj nasičene ("čiste") na robu.

Barve manj nasičene v sredini (bela).



Barvni prostori RGB

Nastali za potrebe barvnih (CRT) zaslonov.

Barvni prostor RGB je linearen, aditiven.

R = 645,16 nm, G = 526,32 nm, B = 444,44 nm

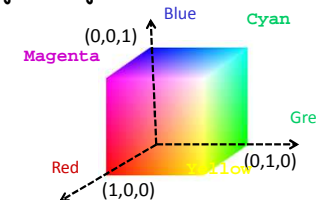
CIE RGB (1976)

R = 700,0 nm, G = 546,1 nm, B = 435,8 nm

Op.: v bistvu je izbira RGB "primarijev" dokaj svobodna.

$$\begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Različni RGB sistemi različno definirajo matriko: (sRGB, Adobe RGB, Adobe wide gamut RGB)





Barvni prostori: HSV

HSV (kot tudi HSL, HSI) so izpeljani iz RGB prostora.

So bližji človeškemu zaznavanju svetlobe.

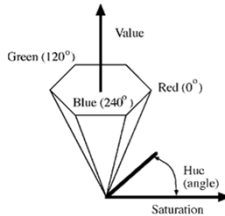
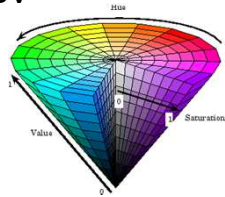
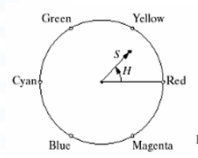
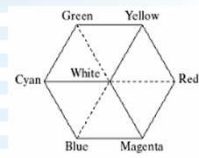
HSV (Hue, Saturation, Value)

(barvnost), (nasičenost), (svetlost)

Priljubljen pri slikarskih programih

Nelinearen: barvnost po kotu

Matlab: hsv2rgb, rgb2hsv



Barvno homogeni prostori

CIE 1976 (u'v')

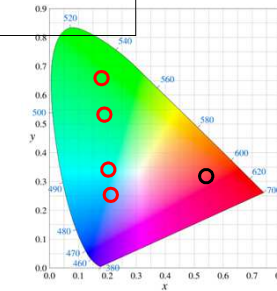
$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z) = 4x / (-2x + 12y + 3)$$

$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z) = 9y / (-2x + 12y + 3)$$

„starejši“ Lu

$$u = u'$$

$$v = (2/3)v'$$



Barvno homogeni prostori

Barve transformira tako, da bolje odražajo človeško zaznavanje barve. Če sta človeku dve barvi enako podobni, naj sta si enako „blizu“ tudi v barvnem prostoru.

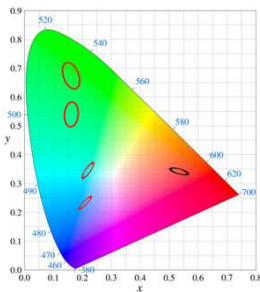
Op.: človek dobro ovrednoti razliko med podobnimi barvami in težko med zelo različnimi.

Mc Adamove elipse:

elipse še opazne barvne razlike

V prostoru x y ta ni povsod in v vseh smereh enaka (elipsa, velikost elipse)

Možna rešitev: projektivna transformacija, Ki iz elips naredi kar se da enake kroge.



Barvno homogeni prostori

CIE 1976 L a* b*

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{(1/3)} - 16 \quad \Delta E = \sqrt{(L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{(1/3)} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{(1/3)} \right] \quad b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{(1/3)} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{(1/3)} \right]$$

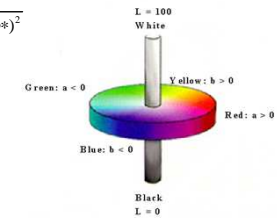
(X_n, Y_n, Z_n) je vrednost bele barve v CIE XYZ

CIE 1976 L u* v*

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{(1/3)} - 16$$

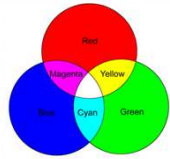
$$u^* = 13L(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L(v' - v'_n)$$

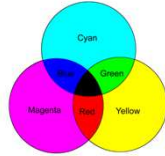




Barvni modeli



Subtraktivni modeli



Subtraktivni modeli so uveljavljeni v tiskarstvu, **CMYK**
Z nanašanjem barve - pigmenta "odštevamo" barve.

Na primer, rdeča barva je pigment, ki absorbira zeleno in modro ter prepusti rdečo do bele podlage, kjer se odbije.

Cyan = White - Red

Magenta = White - Green

Yellow = White - Blue

Na primer: $(W-R) + (W-G) = R+G+B-R-G=B$



Viri

- Forsyth, Ponce: *Computer vision, a modern approach*
- Trucco, Verri: *Introductory techniques for 3D Computer Vision*.
- Wikipedia
- Szeliski draft book (Web)
- Corke book (Web)
- R.W.G.Hunt, M.R.Pointer: *Measuring Colour*
- Brown Uni CV course
- Matej Kristan
- ...



Še o barvnih modelih

Obstaja zelo veliko barvnih modelov:

- CIE RGB, sRGB, HSV, HSL, HSI, Lab, Luv, ...

Standardi za kodiranje videa in slike temeljijo na specifičnih barvnih modelih:

- Analogne naprave, Severna Amerika in Japonska: YIQ
- Analogne naprave, Evropa: YUV
- Digitalna televizija: YCbCr