

BARVNI VID

ALEŠ MOHORIČ

Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani
Institut Jožef Stefan

PACS: 42.66.Ne

V članku so predstavljeni človeški barvni vid, osnove barvnih sistemov in način, kako prikazemo barvo določenega svetlobnega spektra z dostopno programsko opremo.

COLOR VISION

The article describes human color vision, basics of color systems and a way of representing color of a light with a given spectrum by readily available software.

Kadar pri pouku obravnavamo mavrico ali interferenco na uklonski mrežici, brez zadrege opišemo mavrične barve. Pri opisu interferenčnih barv milnične opne ali plasti olja na luži pa imamo že težave. To je zato, ker barve v prvem primeru opišemo z enobarvno svetlobo in vsaki barvi pripišemo svetlobo določene valovne dolžine. V drugem primeru nastanejo barve s sestavljanjem enobarvnih svetlob različnih spektralnih gostot in enostavnega odgovora niti ne moremo dati. Za določeno smer opazovanja enostavno povemo le, katera enobarvna sestavina je v tej smeri najbolj ojačana in katera najbolj oslabiljena. To velja za primere, ko nastane opazovani pojav zaradi bele svetlobe. Težav z opisom nimamo, ko pojav povzroči enobarvna svetloba. Tedaj vidimo le bolj ali manj svetle točke iste barve. Slika na naslovnici kaže a) mavrične barve, ki nastanejo z interferenco svetlobe iz žarnice na uklonski mrežici, in b) milnično opno, na kateri nastanejo barve zaradi odboja in interference sončne svetlobe na tanki plasti.

V fiziki svetlobo, ki je sestavljena iz množice enobarvnih sestavin, opišemo s spektrom. Spekter je porazdelitev gostote energijskega toka svetlobe po valovni dolžini. Svetlobni tok merimo s fotometri. Fotometri so umerjeni fotodetektorji in jih je več vrst. Nekateri temeljijo na merjenju temperature senzorja, ki ga greje vpadni svetlobni tok. Taki so bolometri: termouporniki, počrtnjeni termočleni in termistorji. Ti detektorji so občutljivi za vse valovne dolžine enako. Občutljivost fotometrov, ki temeljijo na fotoefektu (fotocelice in fotopomnoževalke), polprevodniških fotometrov (fotodiode, sončne celice, CCD) ter kemičnih detektorjev (fotografski film) je odvisna od valovne dolžine svetlobe. Spektralne lastnosti svetlobe merimo tako, da svetlobo razklonimo s prizmo ali uklonsko mrežico. Iz šopa razklonjene svetlobe z zaslonko izberemo tanek curek enobarvne svetlobe in njen tok izmerimo s fotometrom. Spekter enobarvne ali monokromatične

svetlobe ima pri ustrezni valovni dolžini en ozek vrh, ki ga imenujemo tudi črta, druge pa je enak nič. Spekter sončne svetlobe ali svetlobe žarnice je zvezen in ga približno opišemo s Planckovim spektrom sevanja črnega telesa. Spekter svetlobe atomov plina, ki se relaksirajo iz vzbujenih stanj, je črtast. V splošnem je spekter svetlobe mešanica zveznega in črtastega spektra. Taka svetloba v očeh (pravzaprav v možganih) ustvari občutek, ki mu pripišemo svetlost in barvo. Svetlost je povezana z gostoto energijskega toka svetlobe, ki vpada na očesno zenico. Kakšna pa je barva, ki ustreza določenemu spektru? Odgovor dobimo, če si podrobneje ogledamo, kako deluje barvni vid pri ljudeh.

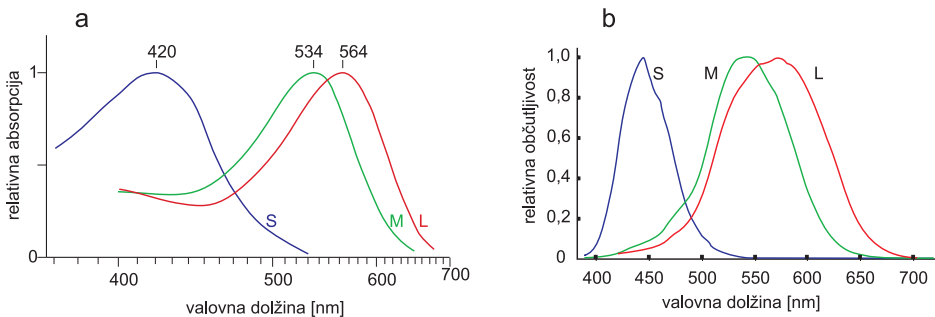
Okno

Svetlobo zaznavamo z očmi. Roženica in leča preslikata osvetljen predmet ali svetilko na mrežnico. V mrežnici sta dve vrsti svetlobnih čutnic: paličnice in čepnice. V normalnem očesu je preko 100 milijonov paličnic in več kot 6 milijonov čepnic. V točki na mrežnici, ki leži blizu optične osi očesne leče, je gostota (število na ploskovno enoto) čepnic največja. To področje mrežnice imenujemo rumena pega. Osrednji del rumene pege ima polmer 1,25 mm in gostota čepnic tam doseže $150\,000\text{ mm}^{-2}$. Drugod po mrežnici prevladujejo paličnice. Njihova gostota je približno homogena in tudi enaka $150\,000\text{ mm}^{-2}$. Na mrežnici razločimo še slepo pego. V njej vidni živci vstopa v mrežnico in na tem delu mrežnica nima čutnic. Tega dela vidnega polja oko ne zazna. Pri vidu nas to ne moti, saj oči stalno premikamo in možgani poskrbijo za primerno interpretacijo slike.

V razmerah šibke svetlobe so v mrežnici aktivne paličnice. Tak vid imenujemo skotopični vid. Skotopični vid je črno-bel; s paličnicami samo zaznavamo svetlobo, barv pa ne. Ponoči smo barvno slepi. Gostota paličnic je v rumeni pegi zanemarljivo majhna, zunaj pa je večja in približno konstantna. To je razlog, zakaj vidimo ponoči šibke zvezde bolje zunaj osi zornega polja. V razmerah močne svetlobe so v mrežnici aktivne čepnice. Tak vid je fotopični vid. V normalnem očesu so tri vrste čepnic, barvno slepi pa jih imajo manj.

Občutljivost čepnic je odvisna od valovne dolžine svetlobe in se razlikuje med vrstami čepnic. Spektralno občutljivost posameznih čepnic določajo na vzorcu ljudi. Pri enem od načinov merjenja merijo absorpcijo svetlobe v čepnicah. To metodo imenujemo mikrospektrofotometrija. Rezultati teh meritev so opisani v [1] in jih kaže slika 1a. Pri teh meritvah ne izmerijo absorpcijskih lastnosti zrkla pred mrežnico, lahko pa to dodatno upoštevajo s primernimi popravki. Drug način merjenja spektralne občutljivosti čepnic je psihofizičen. V tem primeru merijo tako, da dve vrsti čepnic opazovalca desenzibilizirajo z dovolj močnim in dolgotrajnim osvetljevanjem s svetlobo

primerne valovne dolžine. Valovna dolžina mora biti taka, da nasiti čutnice, katerih občutljivosti ne merimo, merjene čutnice pa je ne zaznavajo. Po desenzibilizaciji se meri občutljivost na enobarvno svetlobo z opazovanjem utripajoče svetlobe. Te meritve primerjajo z meritvami spektralne občutljivosti pri barvno slepih dikromatih (protanopi – brez čepnic L, devteranopi – brez čepnic M in zelo redki tritanopi – brez čepnic S). Spektralne občutljivosti treh vrst čutnic, ki so rezultati meritev v [5], kaže slika 1b.



Slika 1. a) Relativna spektralna občutljivost čepnic, merjena z mikrospektrofotometrijo, pri kateri merijo absorpcijo svetlobe v čutnicah, in b) relativna spektralna občutljivost čepnic, določena s psihofizičnimi meritvami. Na obeh grafih prepoznamo tri različne vrste čepnic. Čepnice bolj občutljive za kratkovalovno svetlobo imenujemo S, čepnice občutljive na srednjevalovno svetlobo M in čepnice občutljive na dolgovalovno svetlobo L.

Meritve pokažejo, da so čepnice treh različnih vrst. Čepnice vrste L (iz ang. Long wavelength) so najbolj občutljive na svetlobo dolgih valovnih dolžin. Čepnice vrste M (iz ang. Middle wavelength) so najbolj občutljive na svetlobo srednjih valovnih dolžin. Intervala valovnih dolžin, za katere so občutljive čepnice L in M, sta dokaj podobna. Tretji tip čepnic je S (iz ang. Short wavelength). Te čepnice so najbolj občutljive za najkrajše valovne dolžine vidne svetlobe. Nekdaj so čepnice imenovali rdeča, zelena in modra, vendar to imenovanje ni ustrezno. Vsako od teh barv zazna več vrst čepnic, ne le ena. Tudi največje občutljivosti čutnic ne ustrezajo tem barvam, temveč po vrsti rumenozeleni, zeleni in vijolični.

Razlike v barvnih vtisih različnih spektrov nastanejo zato, ker so razmerja živčnih signalov posameznih čepnic drugačna. Enako razmerje signalov lahko dosežemo z različnimi svetlobnimi spektri. Npr. mešanica rdeče in zelene enobarvne svetlobe ustvari v možganih enak vtis kot rumena enobarvna svetloba.

Barvni sistemi

Tribarvni vid je preslikava iz Hilbertovega prostora spektralnih gostot v trirazsežni realni prostor (signali treh različnih čepnic). Barvni vtis vsake svetlobe lahko reproduciramo s primerno kombinacijo svetlob treh osnovnih barv. Te tri osnovne barve so baza trirazsežnega barvnega prostora. V tem prostoru vsaka barva, ki jo razloči oko, ustreza točki znotraj konveksnega lika. Lik je konveksen zato, ker ima kombinacija svetlob poljubnih dveh barv tudi neko vidno barvo. Za osnovne barve lahko vzamemo katerekoli tri različne barve, s katerimi lahko vzbudimo vse tri vrste čepnic. Pri izbiri osnovnih barv upoštevamo možnost realizacije in spektralne občutljivosti čepnic. Svetlobe morajo imeti take valovne dolžine, da jih enostavno reproduciramo s svetili ali barvili. Poleg tega barve svetlob ne smejo biti preveč podobne, da nimamo težav z ločevanjem podobnih barv in premajhnim barvnim obsegom. Barvni obsegi (gamut) različnih barvnih sistemov niso enaki. Z nekaterimi sistemi ne moremo opisati vseh barv, ki jih lahko zazna oko.

Praktičnih barvnih sistemov je več vrst. Najbolj naravni je kar sistem SML, ki temelji na občutljivosti čepnic. Uporabna in znana sta še sistem RGB, ki ga uporabljamo za aditivno mešanje barv pri barvnih prikazovalnikih, in sistem CMYK, ki ga uporabljamo pri barvnem tisku. Oznaka RGB sledi iz začetnic angleških izrazov za osnovne barve: Red (rdeča), Green (zelena) in Blue (modra). CMYK je akronim za sinja (Cyan), škrlatna (Magenta) in rumena (ang. Yellow), ki so osnovne barve pri subtraktivnem mešanju barv. Ker mešanica vseh treh ne ustvari črne ampak sivorjavo, pri tisku uporabljamo dodatno črno barvilo (ang. Key ali black). Pomanjkljivost sistemov RGB in CMYK je, da je njun barvni obseg manjši od obsega očesa. Prehod med barvnimi sistemi je enostaven – vrednosti v enem sistemu preslikamo v vrednosti drugega sistema z matriko 3×3 .

Opišimo poskus, s katerim določijo sistem RGB. V referencah [4, 6] so osnovne barve naredili s tremi svetilkami z enobarvnimi svetlobami valovnih dolžin 436 nm (modra), 546 nm (zelena) in 700 nm (rdeča). Te svetilke so svetile v primerjalno polovico vidnega polja. To polje so opazovali udeleženci poskusa, ki so prilagajali jakosti svetilk, dokler se ni barva mešanice njihovih svetlob v primerjalnem polju ujemala z barvo, ki jo je na drugi, testni polovici vidnega polja ustvarjala enobarvna svetilka. Poskus so ponovili pri vrsti različnih enobarvnih svetlob. Zorna velikost testnega polja je bila 2° , zato da v zaznavi sodelujejo le čutnice z rumene pege. Na opisani način so katerikoli valovni dolžini enobarvne svetlobe v testnem polju pripisali tri vrednosti – jakosti, s katero v primerjalno polje svetijo svetilke osnovnih barv, ki razpenjajo barvni prostor RGB. Ustrezno normirane vrednosti teh jakosti so funkcije barvnega ujemanja $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$. Grafe funkcij

barvnega ujemanja sistema RGB kaže slika 2a. Funkcije so normirane tako, da so plosčine pod vsemi krivuljami enake. Vrednosti treh funkcij pri neki valovni dolžini povedo, v kakšnem razmerju moramo zmešati svetlobe svetilk osnovnih barv, da ustvarimo barvni vtis enobarvne svetlobe s to valovno dolžino: $j(\lambda) \equiv r(\lambda)j_r + g(\lambda)j_g + b(\lambda)j_b$. Moči svetilk so v fiziološkem merilu med seboj v razmerju $j_r : j_g : j_b = 1 : 4,6 : 0,060$. Vrednosti funkcij barvnega ujemanja ustrezajo moči svetilk tako, da bela svetloba nastane takrat, ko se na opazovanem polju mešajo med seboj rdeča, zelena in modra svetloba s svetlostmi v razmerju $1 : 4,6 : 0,060$. Tako normiranje funkcij barvnega ujemanja je izbrano zato, ker je oko za zeleno svetlobo bolj občutljivo kot za modro ali rdečo, želimo pa, da je razpon posameznih barvnih komponent približno enak. Razmerja so določena tako, da se vsota normiranih funkcij barvnega ujemanja z ustreznimi utežmi ujema s spektralno občutljivostjo očesa $V(\lambda) = r(\lambda) + 4,6g(\lambda) + 0,060b(\lambda)$. Podroben opis normiranja funkcij barvnega ujemanja je v [3].

V intervalu okoli 500 nm so vrednosti funkcij ujemanja za rdečo svetlobo negativne, kar pomeni, da barvnega vtisa svetlobe tiste valovne dolžine ne moremo reproducirati z mešanico primarnih barv. Namesto tega moramo z rdečo svetlobo ustrezne jakosti posvetiti na testni del ploskve, kar seveda spremeni iskano barvo. Tako je, na nekoliko nenavaden način, definirano odštevanje v barvnem prostoru.

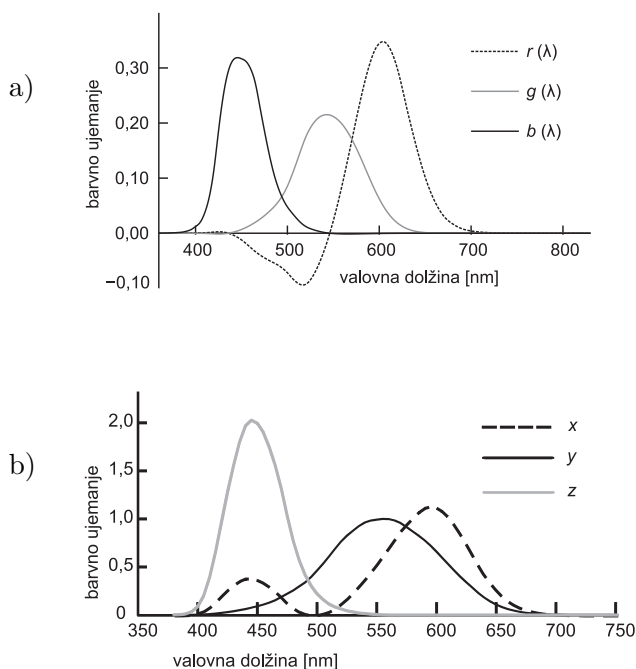
Ker so v sistemu RGB nekatere vrednosti funkcij barvnega ujemanja negativne in obstaja več različnih dogovorov, je ICE (Mednarodna zveza za razsvetljavo) sprejela enotni standardizirani barvni sistem XYZ [8]. Funkcije barvnega ujemanja tega sistema kaže slika 2b. Krivulje približno opišemo z Gaussovimi funkcijami ali njihovimi vsotami:

$$\begin{aligned} x(\lambda) &= 0,401 \exp \left(- \left(\frac{\lambda - 444}{28,1} \right)^2 \right) + 1,13 \exp \left(- \left(\frac{\lambda - 593}{48,6} \right)^2 \right), \\ y(\lambda) &= 1,01 \exp \left(- \left(\frac{\lambda - 556}{65,3} \right)^2 \right), \\ z(\lambda) &= 2,06 \exp \left(- \left(\frac{\lambda - 448}{31,9} \right)^2 \right). \end{aligned}$$

Valovne dolžine moramo v zgornjih izrazih vstaviti v nanometrih.

V barvnem sistemu XYZ izračunamo komponente svetlobe, ki jo opiše spekter $I(\lambda)$, z integrali:

$$X = \int_{380}^{780} I(\lambda)x(\lambda)d\lambda, \quad Y = \int_{380}^{780} I(\lambda)y(\lambda)d\lambda \quad \text{in} \quad Z = \int_{380}^{780} I(\lambda)z(\lambda)d\lambda.$$



Slika 2. a) Grafi treh funkcij barvnega ujemanja sistema RGB. Vrednosti funkcij pri določeni valovni dolžini so povezane z jakostmi enobarvnih svetlob primarnih barv, ki aditivno zmešane ustvarijo enak barvni vtis kot enobarvna svetloba s to valovno dolžino. Navpična skala je izbrana tako, da imajo vse krivulje enako ploščino. Negativne vrednosti rdeče v intervalu okoli 500 nm pomenijo, da barv v tem intervalu ne moremo realizirati s kombinacijo izbranih osnovnih barv. Namesto na primerjalno polje moramo z rdečo svetlobo posvetiti na testno polje. b) Grafi funkcij barvnega ujemanja barvnega sistema XYZ [8].

Ti integrali pomenijo projekcijo Hilbertovega prostora (spektra svetlobe) na trirazsežni prostor komponent X , Y in Z , ki ustrezajo določeni barvi. Z dogovorom [8] so spekter $I(\lambda)$ in funkcije barvnega ujemanja normirani tako, da ima spekter sevanja črnega telesa, segretega na 2856 K (standardno svetilo A), vrednost 100 pri valovni dolžini 560 nm in valovno dolžino v integralih izrazimo normirano na nanometer.

Funkcije barvnega ujemanja v sistemu XYZ so izbrane tako, da y približno ustreza občutljivosti čutnic M. V razmerah močne svetlobe normalno oko dojema svetlobo zelenega dela spektra svetleje kot rdečo ali modro svetlobo enake moči. Povprečna svetlobna občutljivost očesa se približno ujema s spektralno občutljivostjo čepnic M. V sistemu XYZ zato svetlost ustreza komponenti Y . Funkcija $z(\lambda)$ ustreza občutljivosti očesa za modro barvo (občutljivosti čepnic S). Funkcija $x(\lambda)$ je taka kombinacija odzivov čepnic, da nobena od funkcij barvnega ujemanja ni negativna.

Pri taki definiciji sistema pomeni komponenta Y svetlost barve, komponenti X in Z pa opišeta vse barvne odtenke pri tej svetlosti. Zato trojico X , Y in Z lahko prikažemo s trojico (x, y, Y) , kjer sta deleža barvnih vrednosti definirana z $x = X/(X + Y + Z)$ in $y = Y/(X + Y + Z)$. Projekcija ploskve $X + Y + Z = 1$ na ravnino (x, y) je lik z obliko podkve. Na ukrivljenem delu oboda tega lika so spektralne barve, krajišča krakov podkve pa povezuje škrlatna daljica. Lik imenujemo barvni diagram CIE. Točke v liku določajo deleže barvnih vrednosti. Barvni diagram CIE kaže slika c na naslovnici.

Barve, kot jih zazna oko, lahko merimo s kolorimetri. V kolorimetru merimo svetlobo, ki na detektor vpada skozi različne barvne filtre. Če so spektralne prepustnosti filtrov poznane, iz izmerjenih signalov lahko izračunamo komponente barve v barvnem sistemu. Kolorimetre uporabljajo za preverjanje barv barvnih zaslonov in v barvnem tisku.

Zgledi

Opišimo nekaj zgledov, v katerih opazujemo znane spektre svetlobe, ki jim želimo določiti barvo. Prvi zgled je na uklonski mrežici uklonjena svetloba curka bele svetlobe (slika a na naslovnici). Bela svetloba se po prehodu ukloni tako, da je pod nekim kotom glede na smer prvotnega curka svetloba enobarvna. Spekter enobarvne svetlobe je črta (porazdelitev delta) pri določeni valovni dolžini. Komponente barvnega prostora za enobarvno svetlobo z relativno gostoto svetlobnega toka 1 so kar enake vrednostim funkcij barvnega ujemanja $X = x(\lambda)$, $Y = y(\lambda)$ in $Z = z(\lambda)$. Slika d na naslovnici kaže trak mavričnih barv, ki je sestavljen iz ožjih trakov, katerih barve po vrsti od leve proti desni ustrezajo enobarvnim svetlobam vedno večje valovne dolžine. Za risanje uporabimo program, ki zna interpretirati barve v prostoru XYZ . Za prikaz na zaslonu te barve potem pretvorimo v prostor RGB, za tisk pa v prostor CMYK. Primeren program je npr. Mathematica, s katerim sliko izrišemo z ukazom:

```
sp=Table[{XYZColor[x[1],y[1],z[1]],
Rectangle[{1,0},{1+1,100}]}],{1,300,800,1}];
Graphics[Flatten[sp,1]]
```

Enostavno lahko pojasnimo tudi, kako lahko svetlobi z različnima spektroma ustvarita v možganih enak barvni vtis. Npr. enobarvna rumena svetloba z valovno dolžino 573 nm in normirano jakostjo ena ima komponente barvnega prostora enake $X = 0,95$, $Y = 0,94$ in $Z = 0$. Komponenti X in Y sta približno enaki, komponenta Z pa je enaka 0. Enobarvna zelena svetloba z valovno dolžino 549 nm in normirano jakostjo 1 ima komponente $(0,50, 1,0, 0)$, rdeča svetloba z valovno dolžino 665 nm in normirano jakostjo 1 pa $(0,13, 0,062, 0)$. Če zmešamo zeleno svetlobo z normirano jakostjo 0,9

in rdečo z normirano jakostjo 4, dobimo v očesu enak vtis kot z rumeno svetlobo: $(0,95, 0,94, 0) = 0,9(0,50, 1,0, 0) + 4(0,13, 0,062, 0)$. Tako mešanje barv demonstrira slika e na naslovnici. V splošnem velja, da linearna kombinacija katerihkoli barv, ki jih predstavimo v prostoru XYZ , ustvari neko barvo, ki jo lahko predstavimo v tem prostoru.

Opišimo barvo segretega črnega telesa. Spekter segretega črnega telesa opiše Planckov zakon:

$$I_{ct}(\lambda, T) \propto \frac{1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)}.$$

Tu so h Planckova konstanta, c svetlobna hitrost, k Boltzmannova konstanta in T absolutna temperatura. Normiranje spektra je opisano v razdelku Barvni sistemi.

Rezultat predstavimo tako, da zaporedno narišemo trakove v barvah, ki ustrezajo vedno višji temperaturi (slika f na naslovnici). Telesa s sobno temperaturo sevajo večino svetlobe v infrardečem delu spektra in jih z očmi ne opazimo (opisujemo črno telo). Pri temperaturi okoli 1000 K telo žari v rdeči barvi. Ko temperatura telesa narašča, se barva preko oranžne in rumene spremeni v belo, ki ustreza telesu, segretemu na 6000 K. To je temperatura površja Sonca in njegovo svetlobo oko zazna kot belo. Še bolj segreta telesa imajo modrikast barvni ton.

Opišimo še barve tanke milnične plasti, od katere se odbija bela svetloba. Človeško oko je prilagojeno na sončno svetlobo in kot belo – barvo brez tona – zazna sončno svetlobo, to je svetloba črnega telesa, segretega na 6000 K. Žarnice so segrete na nižjo temperaturo (pod 3000 K) in njihovo svetlobo vidimo kot nenasičeno rumeno, vendar še vedno približno belo. Vprašanje, kakšen je barvni vtis svetila, zelo zanima industrijo svetil. V našem zgledu bomo kot belo svetlobo vzeli svetlobo s konstantnim spektrom. Spekter svetlobe, odbite pod pravim kotom, lahko opišemo z izrazom:

$$I_m(\lambda, d) \propto \cos^2 \left(\frac{n2\pi d}{\lambda} + \frac{\pi}{2} \right).$$

Tu je n lomni kvocient snovi v tanki plasti in d je debelina plasti. Slika g na zadnji strani kaže barvo plasti v odvisnosti od debeline plasti od 0 nm do 1500 nm. To sliko lahko primerjamo s sliko b na naslovnici vendar moramo upoštevati, da se debelina milnične plasti zaradi teže spreminja z višino (na dnu je večja kot na vrhu), vendar ne sorazmerno.

Sklep

Modeli barvnih prostorov ne ponujajo popolnega opisa barvnega vida. Barvo opišejo le s tremi parametri in ne upoštevajo percepcije – prilagajanja čutnic na svetlobo, razlike signalov sosednjih čutnic, vpliva obrobja vidnega

polja, vpliva paličnic idr. Popolnejši in matematično bolj zahtevni so modeli barvnega zaznavanja, v katerih barvo opišemo z njenim tonom, svetlostjo, sijajem, nasičenostjo, polnostjo in kromo [2]. Opis teh modelov presega okvir tega članka.

LITERATURA

- [1] J. Bowmaker in H. Dartnall, *Visual pigments of rods and cones in a human retina*, J. Physiol. 298: 501–511 (1980).
- [2] D. Javoršek, *Od CIE kolorimetrije do modelov barvnega zaznavanja*, Tekstilec **55** (2012), 3, 176–183.
- [3] V. C. Smith in J. Pokorny, *The Science of Color*, Elsevier, 2003.
- [4] W. Stiles in J. Burch, *N. P. L. Colour-matching Investigation: Final Report*, Optica Acta **6** (1959), 1, 1–26.
- [5] A. Stockman, D. MacLeod in N. Johnson, *Spectral sensitivities of the human cones*, J. Opt. Soc. of America A **10** (1993), 2491–2521.
- [6] W. D. Wright, *A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours*, Transactions of the Optical Society **30** (1928), 4, 141–164.
- [7] G. Wyszecki in W. Stiles, *Colour Science*, London: J. Wiley (1967).
- [8] http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/index.php?i_ca_id=298, ogled: 3. 6. 2015.

Na naslovnici: a) Barvni vzorec, ki nastane na zaslonu po uklonu svetlobe žarnice na uklonski mrežici. Na določeni razdalji navzgor ali navzdol od belega traku na sredini slike so ozki, vodoravni trakovi različnih barv. Vsaki barvi lahko pripišemo enobarvno svetlobo z določeno valovno dolžino. b) Odsev sončne svetlobe na milnični opni. Opazimo barve, ki jim ne moremo pripisati enobarvne svetlobe, npr. sinja ali škrlatna. c) Barvni diagram CIE. V diagram sta vrisana še barvni podprostor, ki ga razpenja sistem RGB, in točka beline. Po loku so nanizane spektralne barve, krajšiči loka povezuje škrlatna daljica. d) Navpični trakovi mavričnih barv enobarvne svetlobe, valovna dolžina narašča od leve (300 nm) proti desni (800 nm). e) Z aditivnim mešanjem zelene in rdeče enobarvne svetlobe ustvarimo v možganih enak barvni vtis kot z enobarvno rumeno svetlobo. f) Barva segretega črnega telesa kot funkcija temperature. Temperatura telesa narašča z leve proti desni od 1000 K do 10 000 K. Telo z nizko temperaturo žari rdeče, zelo vroča telesa pa so modrikasta. Telo s temperaturo 6000 K (temperatura površja Sonca) je videti belo.

Na zadnji strani: g) Barve milnične opne po pravokotnem vpadu bele svetlobe s konstantnim spektrom v odvisnosti od debeline plasti. Barve niso mavrične in jih ne moremo opisati le s svetlobo ene valovne dolžine, temveč s spektrom. Čim debelejša je plast, manj nasičene so barve. Videti so, kot da bi bile zmešane z belo. To sliko lahko primerjamo s sliko b, vendar moramo upoštevati, da debelina milnične plasti na sliki b ne narašča sorazmerno z oddaljenostjo od vrha zanke.