

# Digitalna slika

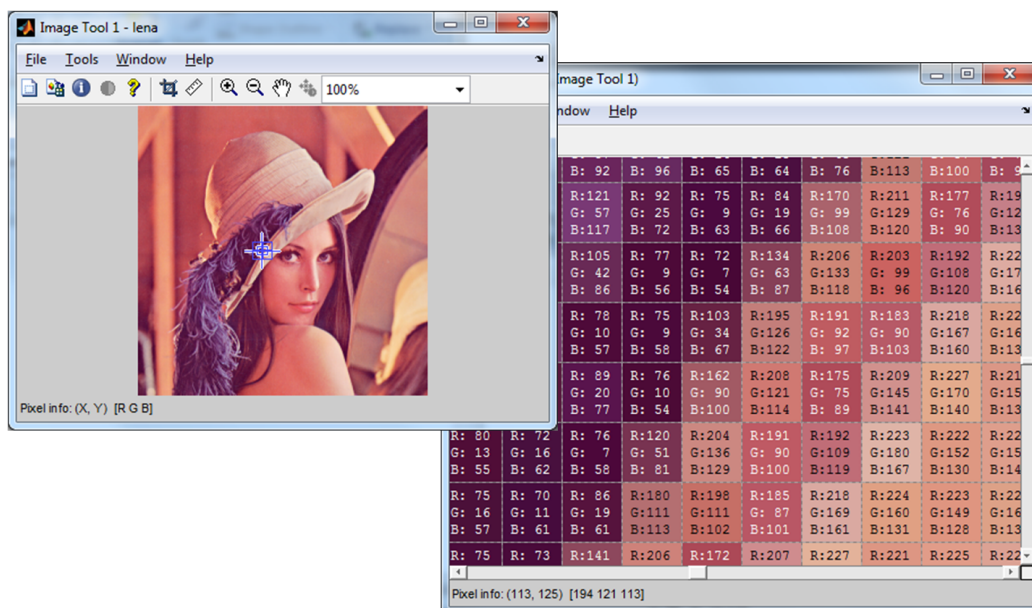
20. novembar 2015

Slika je medij koji je predmet vizuelne percepcije. Po svojoj prirodi slika je analogni medij i njena upotreba u multimedijalnim sistemima podrazumijeva digitalnu reprezentaciju. Digitalna slika je odmjerena i kvantovana (numerička) reprezentacija slike.

Matematički slika može da se predstavi kao funkcija dvije realne promjenljive,  $f(x, y)$ . Promjenljive,  $(x, y)$ , su prostorne koordinate, a vrijednost funkcije se može neformalno povezati sa intenzitetom neke fizičke veličine, npr. svjetlosti, odnosno, zračenja uopšte, u datoj tački. U multimedijalnim sistemima se bavimo uglavnom slikama formiranim zračenjem u vidljivom dijelu spektra tako da možemo smatrati da je slika formirana optičkim sredstvima.

## 1 Odmjeravanje slike

Slika se najčešće odmjerava u jednako razmaknutim tačkama i kvantuje jednakim intervalima amplitude, ali to nije obavezno. Digitalna slika je, dakle, dvodimenzionalni digitalni signal. Vrijednost odmjerka,  $f(m, n)$  zavisi od dvije diskretne prostorne koordinate  $(m, n)$ . Obično se smatra da prostorne koordinate,  $m$  i  $n$ , uzimaju vrijednosti iz skupova  $\{0, 1, \dots, M\}$  i  $\{0, 1, \dots, N\}$ , respektivno. Umjesto termina odmjerki za elemente digitalne slike se koristi termin pikseli (picture element – pixel). Dakle, digitalna slika je dvodimenzionalni niz vrijednosti piksela. Pored termina digitalna slika koriste se i termini bitmapa i piksmapa. Termin bitmapa dolazi iz programerske terminologije i znači mapa (niz) bitova. Pošto bit može imati samo dvije vrijednosti, za slike kod kojih se pikselu pridružuje više bitova koristi se i termin piksmapa. Ipak, uobičajeno je da termin bitmapa označava strukturu podataka u kojoj se čuva digitalna slika. Takođe, koristi se i termin rasterska slika, gdje se raster odnosi na mrežu lokacija piksela. Svakom pikselu je pridružena određena vrijednost (ili više vrijednosti), Slika 1.



Slika 1: Primjer bitmape.

U kontekstu multimedijalnog sistema, digitalna slika može nastati renderovanjem vektorske grafike ili digitalizacijom analogne slike. Digitalizacija obuhvata:

- Odmjeravanje – mjerenje svjetline na mjestu svakog piksela i
- Kvantizaciju – dodjeljivanje diskretnih vrijednosti izmjenjenim nivoima svjetline.

U procesu odmjeravanja mjeri se vrijednost svjetline na mjestu svakog piksela određenom rasterom i izmjerene vrijednosti se čuvaju u memoriji, kao što je ilustrovano na Slici 2.

## 2 Rezolucija slike i uređaja

Sa odmjeravanjem slike povezan je pojam prostorne rezolucije slike. Prostorna rezolucija slike je broj piksela u digitalnoj slici i kada se govori o rezoluciji slike obično se misli na prostornu rezoluciju. Viša rezolucija uvijek znači bolji kvalitet slike, kao što je ilustrovano na Slici 3.

Rezolucija uređaja je koncept koji se razlikuje od rezolucije slike. Rezolucija uređaja je mjera koja pokazuje koliko dobro uređaj aproksimira kontinualne slike upotrebom konačnog broja piksela. Rezolucija različitih uređaja se



kontinualna slika

raster

odmjerena slika

Slika 2: Postupak odmjeravanja slike. Vrijednosti svjetline date kontinualne slike se mjere na lokacijama određenim rasterom i dodjeljuju pikselima.



Slika 3: Ista slika prikazana na dvije različite rezolucije. Slika lijevo ima višu rezoluciju i njen vizuelni kvalitet je bolji.

izražava gustinom piksela (tačkaka). Uobičajeno se kao mjera rezolucije koristi horizontalna ili vertikalna gustina piksela (tačkaka). U slučaju kvadratnih piksela obje gustine su jednake. Gustina piksela se izražava brojem piksela po inču (pixels per inch – PPI), a gustina tačkaka tačkaka po inču (dots per inch – DPI).

Rezolucija štampača se izražava brojem tačkaka po inču. Tako, na primjer, moderni inkjet štampači imaju (izlaznu) rezoluciju u opsegu 300-720 DPI, a moderni laserski štampači u opsegu 600-2400 DPI. Gustina piksela kod štampača obično nije fiksna već zavisi od modaliteta štampanja. Rezolucija displeja zavisi od broja piksela u horizontalnom/vertikalnom smjeru i za računarske monitore se izražava broje piksela po inču. Gustina piksela, u ovom slučaju, zavisi od postavki rezolucije i određena je veličinom displeja i ukupnim brojem piksela u horizontalnom/vertikalnom smjeru. Za

računarski monitor gustina piksela se može izračunati na sljedeći način. Prvo je potrebno izračunati dijagonalnu rezoluciju u pikselima

$$d_p = \sqrt{w_p^2 + h_p^2}, \quad (1)$$

gdje su  $w_p$  i  $h_p$  broj piksela u horizontalnom i vertikalnom smjeru, respektivno. Zatim se gustina piksela izračunava kao odnos dijagonalne rezolucije u pikselima i veličine dijagonale ekrana u inčima,  $d_i$ ,

$$PPI = \frac{d_p}{d_i}. \quad (2)$$

Za moderne računarske monitore uobičajena je rezolucija do 200 PPI, a za displeje telefona i 400-600 PPI.

U kontekstu uređaja za digitalizaciju slike, kao što je npr. skener, PPI znači broj odmjeraka slike po jednom inču (samples per inch – SPI). Sa druge strane, rezolucija digitalnih fotoaparata je ukupan broj piksela u najvećoj slici koja može biti kreirana upotrebom fotoaparata. U digitalnoj fotografiji gustina piksela je broj piksela podijeljen površinom senzora. Na primjer, DSLR (Digital Single-Lens Reflex) imaju rezoluciju od 1-6,2 MP/cm<sup>2</sup>, a kompaktne kamere od 20-70 MP/cm<sup>2</sup>. Ovaj podatak na prvi pogled izgleda neintuitivno zato što se očekuje da bolji kvalitet slike koji postiže DSLR kamera mora odgovarati većoj gustini piksela. Međutim, bolji kvalitet slike koju postiže DSLR je posljedica većeg senzora i većih fotodioda. Paradoksalno, ovo je istovremeno i razlog njegove manje rezolucije.

Rezolucija rasterske slike je broj piksela slike, ali rasterske slike po sebi nemaju gustinu piksela, odnosno, nisu povezane sa fizičkim prostornim mjerama. Međutim, u kontekstu digitalizacije i renderovanja (prikazivanja) slike mogu se povezati rezolucija slike, rezolucija uređaja i fizičke dimenzije slike. Tako, rezolucija slike u memoriji zavisi od gustine piksela (PPI) uređaja za digitalizaciju

$$dim[px] = PPI \times dim[in]. \quad (3)$$

Dakle, ako su fizičke dimenzije slike  $3 \times 3$  inča, skeniranjem na skeneru sa gustinom tačaka od 300 ppi dobija se slika rezolucije  $900 \times 900$  piksela. U ovom slučaju će promjena vrijednosti ppi, za iste fizičke dimenzije slike, promijeniti njenu rezoluciju.

Sa druge strane, veličina prikazane slike zavisi od gustine piksela (tačaka) uređaja (DPI) na kojem se slika prikazuje

$$dim[in] = DPI \times dim[px] \quad (4)$$

Kao primjer, pretpostavimo da je na raspolaganju slika rezolucije  $1000 \times 1000$  piksela. Njena veličina u pikselima ne zavisi od gustine tačaka izlaznog

uređaja, ali će se štampom na uređaju rezolucije 250 dpi dobiti slika veličine  $4 \times 4$  inča, dok će se štampom na uređaju rezolucije 100 dpi dobiti slika veličine  $10 \times 10$  inča. Promjena vrijednosti dpi neće promijeniti veličin slike u pikselima, ali će uticati na fizičke dimenzije prikazane slike.

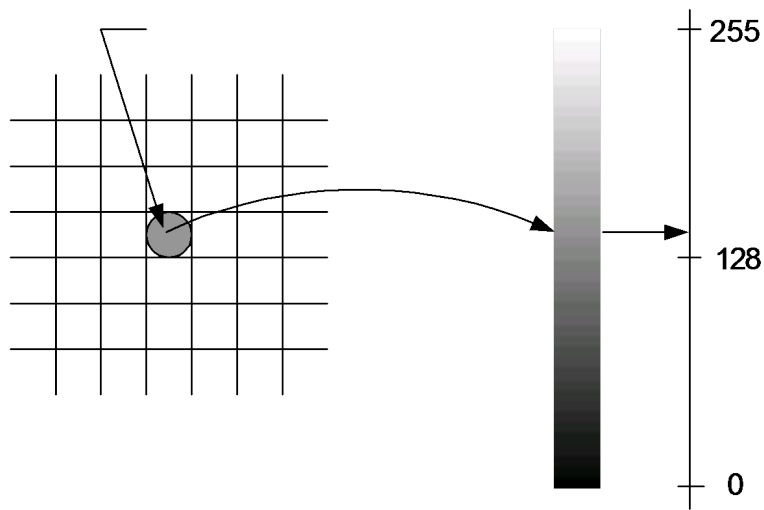
Neki formati za rasterske slike čuvaju i podatak o gustini piksela. Ovaj podatak se koristi pri štampanju slike da bi se odredila fizička veličina rezultujuće slike. Takođe, ta vrijednost može odgovarati i gustini piksela skenera kojim je slika digitalizovana. U ovom slučaju, on omogućava da se odredi originalna veličina skeniranog objekta.

Dakle, fizičke dimenzije rasterske slike se mogu promijeniti bilo promjenom njene rezolucije, bilo promjenom gustine tačaka uređaja na kojem se slika prikazuje. Sa druge strane, kod vektorske grafike nema potrebe za promjenom rezolucije prilikom promjene fizičke veličine slike. U ovom slučaju, vrijednost PPI se ne bilježi u fajl zato što je njegov sadržaj nezavisan od rezolucije. Kad se u fajlu nalazi isključivo vektorska grafika on će biti adekvatno renderovan na svakom uređaju. Međutim, problemi mogu nastati ako se u istom fajlu nalaze i rasterski i vektorski elementi. Sada je neophodno da se pri renderovanju sadržaja fajla usklade veličine pojedinih elemenata slike. U zavisnosti od toga da li je konačan format slike vektorski ili rasterski moguće su dvije opcije. Ako je konačan format vektorski, moguće je promijeniti PPI rasterskog dijela da bi se veličina rasterske slike prilagodila veličini štampanog medija. Ovo je pristup koji je usvojila firma Adobe u svom Portable Document Formatu (PDF). Sa druge strane, ako je konačni format rasterski, moguće je prilagoditi veličinu vektorskog dijela pri promjeni PPI rasterskog dijela. Ovo rješenje je firma Adobe usvojila u Photoshopu.

### 3 Kvantizacija vrijednost piksela

U postupku kvantizacije svakom pikselu slike se dodjeljuje vrijednost iz predefinisano skupa intenziteta, Slika 4. Finoća kvantizacije vrijednosti piksela se ponekad posmatra i kao rezolucija slike po intenzitetu i obično se izražava brojem bita koji se koriste za reprezentaciju intenziteta jednog piksela. Na Slici 5 prikazana je ista slika korištenjem različitog broja nivoa intenziteta.

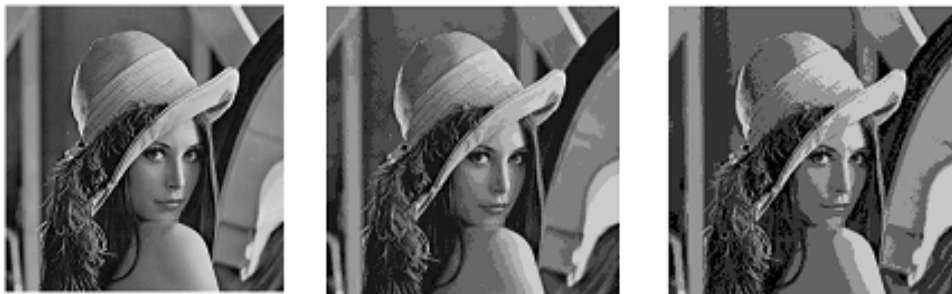
Kada se za reprezentaciju piksela koristi samo 1 bit, govorimo o binarnim ili 1-bitnim monohromatskim slikama. Svaki piksel može da ima vrijednost 0 ili 1 pa je na ovaj način moguće predstaviti samo dvije boje ili dva nivoa svjetline. Primjeri binarnih slika prikazani su na Slici 6. Broj bita potrebnih za čuvanje binarne slike jednak je broju piksela slike, odnosno, proizvodu njene širine i visine u pikselima. Na primjer, za binarnu sliku dimenzija  $640 \times$



Slika 4: Kvantizacija vrijednosti piksela.

480 piksela potrebno je  $640 \times 480 = 307200$  bita = 38400 bajtova = 37,5 kB. Zbog malog broja kvantizacionih nivoa, binarne slike su zadovoljavajuće za čuvanje jednostavne grafike i teksta. Ipak, značajne su u postupcima analize slike, kao i u crno-bijeloj štampi.

Za kvantizaciju vrijednosti svjetline na poziciji određenog piksela najčešće se koristi 8 bita. Na ovaj način je moguće predstaviti  $2^8 = 256$  nivoa intenziteta piksela. Obično se vrijednost 0 pridružuje crnom pikselu, a vrijednost 255 bijelom pikselu. Ostale vrijednosti između 0 i 255 predstavljaju različite nijanse sive. Zbog toga se ovakve slike nazivaju sive (graylevel, grayscale) slike. U digitalnoj obradi slike se pored termina sive slike koristi i termin in-



Slika 5: Slika Lena prikazana korištenjem različitog broja nivoa intenziteta. Slijeva udesno: 256 (8 bita), 64 (6 bita) i 16 (4 bita) nivoa.



Slika 6: Primjeri binarnih slika.

tenziteteske slike. U fotografskoj terminologiji ovakve slike se nazivaju crno-bijele slike. Primjer sive slike prikazan je na Slici 7. Siva slika dimenzija  $W \times H$  piksela zauzima isto toliko bajtova. Tako je za sivu sliku dimenzija  $640 \times 480$  piksela potrebno  $640 \times 480 = 307200$  bajtova = 300 kB.

Ako bismo pokušali sivu sliku da odštampamo na crno-bijelom štampaču rezultat bi bio kao na Slici 8 što odgovara binarnoj reprezentaciji slike dobijenoj upoređivanjem vrijednosti svakog piksela slike sa fiksnom vrijednošću praga. Ovaj rezultat je relativno lošeg kvaliteta i umjesto direktnog štampanja slike koristi se proces pod nazivom diterovanje (dithering). Diterovanje poboljšava izgled slike po cijenu smanjenja prostorne rezolucije. Da bi se ovo postiglo svaki piksel originalne slike se mijenja većim uzorkom, npr.  $2 \times 2$  ili  $4 \times 4$  piksela crno-bijelih tačaka, tako da odštampane tačke formiraju uzorak u kojem broj odštampanih tačaka aproksimira vrijednost originalnog piksela. Na primjer, ako koristimo uzorak veličine  $2 \times 2$  možemo da predstavimo intenzitete od 0 (nijedna tačka) do 4 (sve tačke). Sada prvo, dijeljenjem sa  $256/5$ , preslikavamo vrijednosti piksela iz opsega 0-255 u opseg 0-4 i zaokružujemo rezultat. Pretpostavimo da koristimo "matricu diterovanja" oblika

$$\begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}.$$

Sada svaki piksel mijenjamo matricom tačaka u kojoj je tačka odštampana



Slika 7: Siva slika.

ukoliko je preslikana vrijednost piksela veća od odgovarajuće vrijednosti u matrici diterovanja. Na primjer, ukoliko je preslikavanjem dobijena vrijednost piksela 0, ne štampano ni jednu tačku. Ako je vrijednost piksela jednaka 4, štampano sve četiri tačke. Dobijeni rezultat, vizuelno odgovara slici sa 5 nivoa svjetline.

Korištenjem  $2 \times 2$  matrice diterovanja ne postižu se posebno dobri rezultati i potrebno je koristiti veće matrice, npr.  $4 \times 4$  oblika

$$\begin{bmatrix} 0 & 8 & 2 & 10 \\ 12 & 4 & 14 & 6 \\ 3 & 11 & 1 & 9 \\ 15 & 7 & 13 & 5 \end{bmatrix}.$$

U ovom slučaju se, međutim, diterovanjem svaki piksel mijenja uzorkom od  $4 \times 4$  tačke, što znači da će rezultujuća slika biti 16 puta veća. Ovaj problem se rješava uređenim diterovanjem. Uređeno diterovanje podrazumijeva da se matrica diterovanja pomjera preko slike piksel po piksel i piksel se štampa ako je njegova vrijednost veća od vrijednosti u matrici na istoj poziciji. Implementacija uređenog diterovanja u MATLAB-u data je sljedećom funkcijom

```
function y = mydither(x)
[m, n] = size(x);
x = double(x);
x = x / (256 / 16);
```





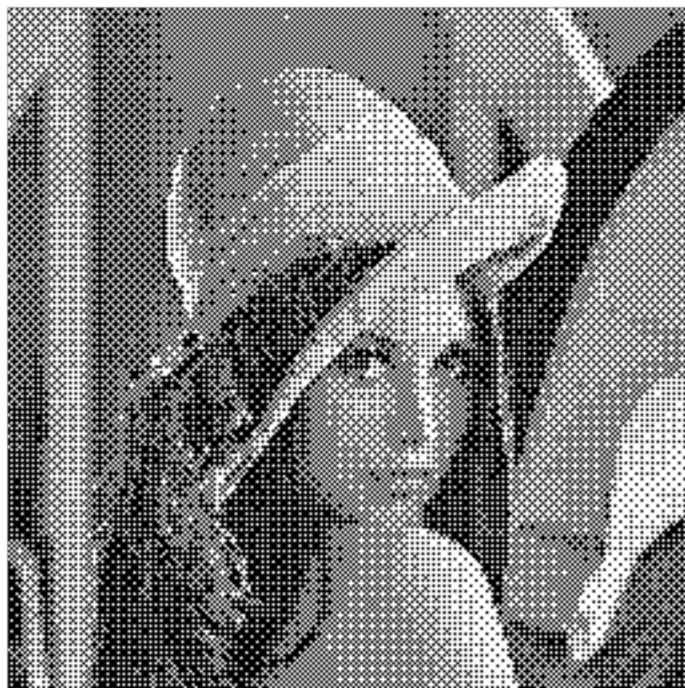
Slika 8: Binarna slika Lena.

```
x = floor(x);
dm = [0 8 2 10;
      12 4 14 6;
      3 11 1 9;
      15 7 13 5];
y = false(m, n);
for i = 1:m
    for j = 1:n
        ii = mod(i, 4) + 1;
        jj = mod(j, 4) + 1;
        if x(i, j) > dm(ii, jj)
            y(i, j) = true;
        end
    end
end
```

Primjenom ovog koda dobija se rezultat kao na Slici 9.

## 4 Strukture podataka za digitalne slike

Binarne i sive slike se u memoriji predstavljaju dvodimenzionalnim nizovima, odnosno, matricama čiji su elementi vrijednosti piksela. Kao što je razmatrano, memorija koju zauzimaju ove slike određena je njihovom rezolucijom. Međutim, kada su u pitanju slike u boji situacija je nešto složenija. Za



Slika 9: Slika Lena dobijena diterovanjem.

reprezentaciju slike u boji potrebne su tri komponente, odnosno tri vrijednosti svjetline, koje odgovaraju intenzitetima svjetlosti u spektralnim opsezima koji približno odgovaraju crvenoj, zelenoj i plavoj boji. Razlog za ovo leži u ljudskoj percepciji boje koja je zasnovana na postojanju različitih ćelija osjetljivih na svjetlost u navedenim spektralnim opsezima. Za opis boje se koriste različiti modeli o čemu će kasnije biti više govora. Displeji uglavnom koriste RGB model kod kojeg komponente (kolor-komponente) sadrže vrijednosti piksela u crvenom, zelenom i plavom dijelu spektra.

Slike u boji je moguće predstaviti na dva načina, kao bitmapirane i kao indeksirane slike. Bitmapirane slike za reprezentaciju svakog piksela koriste tri bajta, odnosno,  $3 \times 8 = 24$  bita. Na ovaj način je moguće predstaviti  $256^3 = 16.777.216$  boja. Ove slike su u literaturi na engleskom poznate i kao truecolor slike. Sama slika se memoriše korištenjem tri matrice od kojih svaka sadrži vrijednosti intenziteta piksela za jednu komponentu. Alternativno, moguće je koristiti i trodimenzionalni niz, pri čemu dvije dimenzije odgovaraju prostornim koordinatama, a treća kolor-komponentama. Slika dimenzija  $640 \times 480$  piksela sada zauzima  $640 \times 480 \times 3$  bajtova = 900 kB. Primjer slike u boji i njenih kolor-komponentata prikazan je na Slici 10. Pojedine kolor-komponente su predstavljene kao sive slike, pri čemu su vrijednosti piksela



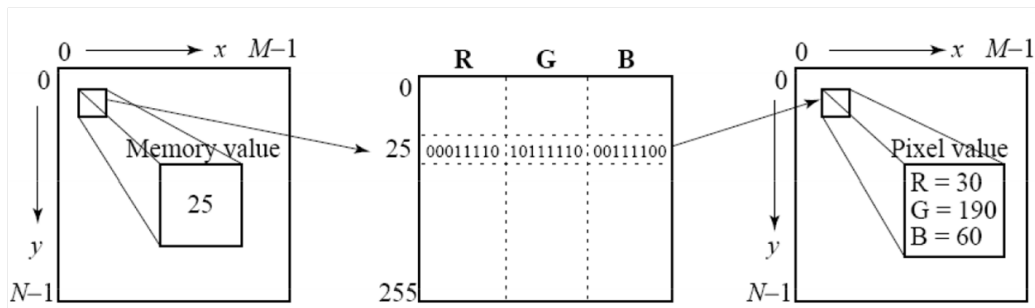
Slika 10: Slika Lena u boji i njene R, G i B komponente.

posmatrane kao intenziteti.

Često se 24-bitne slike memorišu kao 32-bitne, a dodatni bajt se koristi za  $\alpha$ -kanal kojim se može npr. opisati transparentnost slike u slučajevima kada pikseli dvije slike zauzimaju iste prostorne koordinate.

Bitmapirane slike u boji zauzimaju tri puta više memorije od sivih slika iste rezolucije. Međutim, ako se uzme u obzir da nisu sve od više od 16 miliona boja raspoloživih u 24-bitnoj reprezentaciji jednako zastupljene u svakoj slici, dolazimo do zaključka da je moguće sliku u boji predstaviti i korištenjem manje od 3 bajta po pikselu, uz eventualni gubitak vizuelnog kvaliteta. Indeksirane slike za reprezentaciju svakog piksela koriste jedan bajt uz korištenje pregledne (lookup) tabele za čuvanje informacija o bojama. U ovom kontekstu se pregledna tabela naziva i kolor-mapa ili paleta boja. Kada se za reprezentaciju piksela koristi jedan bajt, tada pregledna tabela ima 256 stavki što odgovara paleti od 256 boja.

Sada su za reprezentaciju slike potrebni matrica dimenzija jednakim rezoluciji slike i pregledna tabela. Svaki element matrice zauzima 1 bajt što znači da pregledna tabela ima 256 stavki koje zauzimaju po tri bajta – svaki bajt odgovara jednoj kolor-komponenti, R, G i B. U matrici slike se za svaki piksel čuva kodna vrijednost boje — indeks reda u paleti. Pri određivanju



Slika 11: Paleta boja za indeksirane 8-bitne slike u boji.

boje piksela potrebno je pročitati vrijednost reda u paleti, a onda iz palete i samu boju piksela. Ovaj proces je ilustrovan na Slici 11.

Kvalitet indeksirane slike je obično niži od odgovarajuće bitmapirane slike u boji. Dalje poboljšanje kvaliteta je moguće postići kolor-diterovanjem. Primjer 8-bitne slike u boji dat je na Slici 12. Na slici su primjetni artefakti smanjenja broja raspoloživih boja koji se ogledaju u vidljivim trakama piksela jedne boje (banding) u gornjem dijelu slike.

Da bi se koristila 8-bitna reprezentacija slika u boji potrebno je za datu sliku formirati odgovarajuću paletu koja se zatim čuva u zaglavlju fajla u koji je slika smještena. Primjeri slika i njihovih paleta dati su na Slici 13.

Podrška za indeksirane slike je značajna sa stanovišta štampe i kompatibilnosti unazad sa starijim hardverom i nekim formatima fajlova. Pored toga, smanjenje broja boja u slici se često koristi u analizi slika u boji.

## 5 Česti formati fajlova u rasterskoj grafici

Danas postoji i u manjoj ili većoj mjeri se upotrebljava veliki broj formata fajlova za rasterske slike. Najčešće korišteni su:

- GIF – Graphics Interchange Format
- JPEG – Joint Photographics Experts Group
- PNG – Portable Network Graphics
- TIFF – Tagged Image File Format
- BMP – MS Windows Bitmap



Slika 12: Primjer 8-bitne slike u boji.



*Images and their palettes*

© MacAvon Media 2009

Slika 13: Primjeri slika i njihovih paleta.

## 5.1 Graphics Interchange Format (GIF)

GIF format su uveli UNISYS Corp. i Comuserve. U početku je služio za prenos grafike telefonskim linijama pomoću modema. Koristi Lempel-Ziv Welch (LZW) algoritam (oblik Hafmanovog kodovanja), modifikovan za pakete koji se sastoje od linija slike (linijsko grupisanje piksela). Ovaj algoritam kompresije je bez gubitaka. GIF format je ograničen na 8-bitne slike u boji, odnosno, korištenje 256 boja i iz tog razloga je pogodan za slike sa manjim brojem različitih boja, kao što su npr. računarska grafika i crteži. Postoje dvije verzije ovog formata: GIF87a i GIF89a. GIF89a podržava jednostavnu animaciju, indeks transparentnosti, itd.

## 5.2 Joint Photographic Experts Group (JPEG)

Standard za kompresiju fotografija koji je kreirala Joint Photographic Experts Group. Kompresija slike u JPEG formatu sadrži gubitke. Kod kompresije sa gubicima, viši stepen kompresije se postiže po cijenu narušavanja vidljivog kvaliteta slike. JPEG ovaj problem rješava tako što koristi ograničenja ljudskog vizuelnog sistema da bi se postigao visok stepen kompresije bez vidljivog narušavanja vizuelnog kvaliteta slike. Kod JPEG standarda korisnik može da izabere željeni stepen kompresije, odnosno, nivo kvaliteta slike. JPEG je najpopularniji format za slike na webu.

## 5.3 Portable Network Graphics (PNG)

PNG je kreiran sa namjerom da naslijedi GIF standard, a posebno da se izbjegnu problemi sa korištenjem patentiranog LZW algoritma. Kompresija je bez gubitaka korištenjem DEFLATE algoritma koji nije patentiran. Pored toga, moguća je i kompresija sa gubicima. PNG format podržava sive, indeksirane i bitmapirane slike u boji sa maksimalno 16 bita po kanalu. Pored toga podržani su i alfa kanali te gama korekcija. PNG format je namijenjen za grafiku na webu i po zastupljenosti je prevazišao GIF format.

## 5.4 Tagged Image File Format (TIFF)

TIFF je razvila kompanija Aldus Corp. 1980-tih godina. Danas je TIFF specifikacija po kontrolom kompanije Adobe. Ovaj format podržava različite tipove slika: binarne, grayscale, 8-bitne i 24-bitne RGB slike, itd. Podržan je u softveru za obradu slike, naročito u upravljanju dokumentima i štamparstvu. Pored same slike, u zaglavlju fajla u TIFF formatu mogu

se čuvati i dodatni podaci – tagovi. TIFF format tipično koristi kompresiju bez gubitaka, ali može sadržati i slike komprimovane JPEG algoritmom, uključene pomoć JPEG taga. Međutim, u ovakvoj upotrebi TIFF nema značajnije prednosti nad JPEG standardom.

## 5.5 BMP format

BMP format je poznat i kao Bitmap Image File ili Device Independent Bitmap (DIB) format. To je standardni format fajla za sistemsku grafiku u Microsoft Windows operativnom sistemu. Podržava 24-bitne RGB slike, a podrška za alfa kanale je nedokumentovana. BMP format ne koristi kompresiju što rezultuje velikim fajlovima. Široko je podržan u softveru za obradu slike.

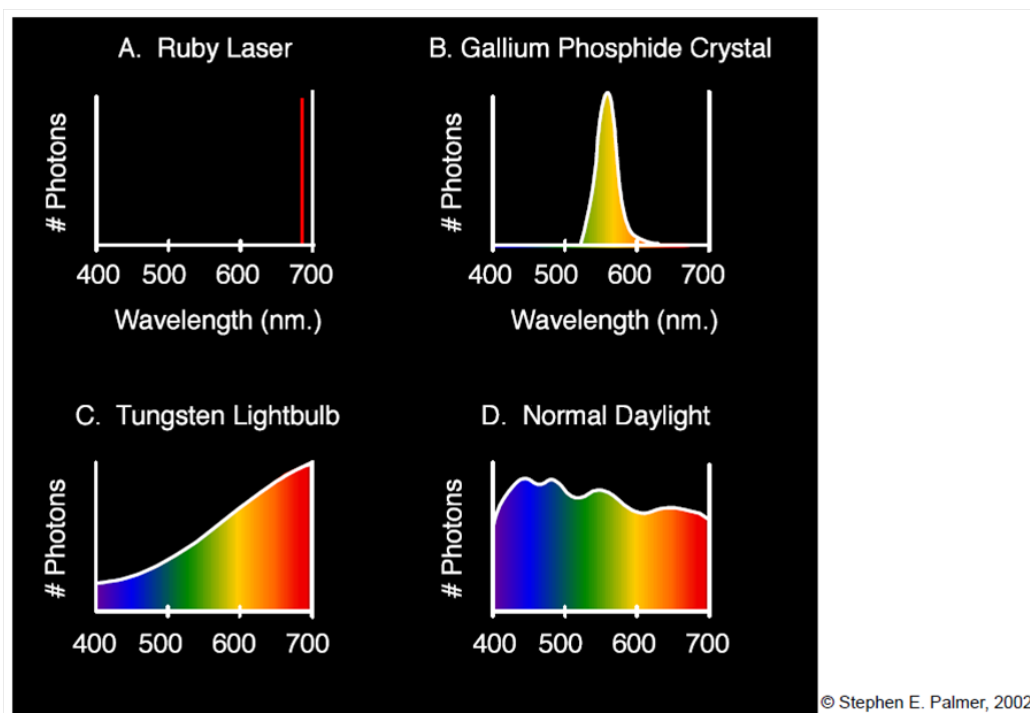
## 6 Reprezentacija boje

Boja je jedan od osnovnih elemenata multimedije. Koristi se u vektorskoj i bitmapiranoj grafici, videu, animaciji, tekstu, itd. Kako bi se boja mogla koristiti u multimedijalnim sistemima neophodno je odgovoriti na dva pitanja:

1. Kako modelovati boju?
2. Kako je opisati numeričkim vrijednostima da bude pogodna za obradu na računaru?

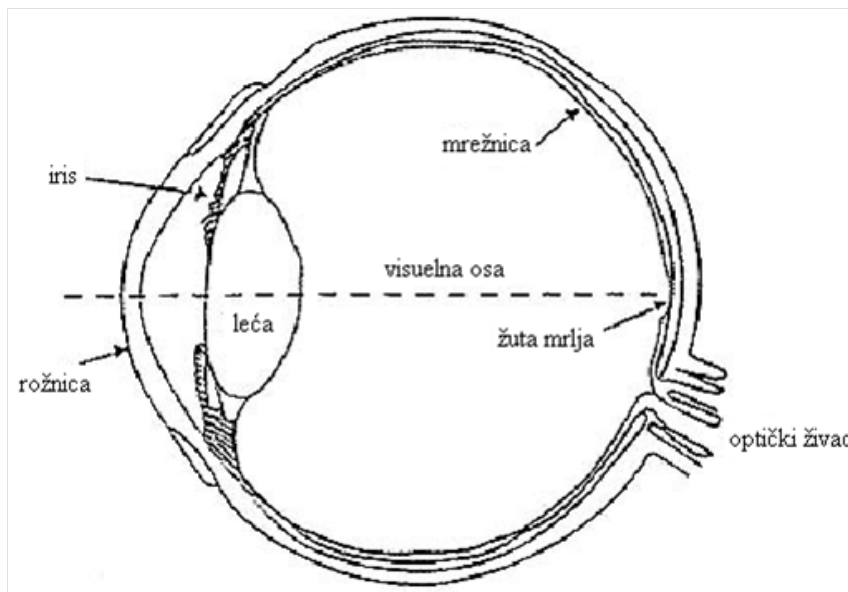
Boja je fenomen koji je usko povezan sa svjetlošću i modelovanje boje zahtijeva razumijevanje osnovnih koncepata vezanih za svjetlost kao fizičku pojavu i njenu percepciju od strane ljudi. Svjetlost je elektromagnetnih talas i njena boja je određena talasnom dužinom. Talasna dužina vidljive svjetlosti je u opsegu od 400-700 nm. Svjetlost lasera se sastoji od samo jedne talasne dužine. Većina drugih izvora svjetlosti proizvodi svjetlost koja je kombinacija komponenata različitih talasnih dužina. Spektralna gustina snage (spektar) svjetlosti se mjeri spektrofotometrom i pokazuje relativni iznos energije svjetlosti (broja fotona) na svakoj talasnoj dužini.

Na Slici 14 prikazane su spektralne gustine snage nekih karakterističnih izvora svjetlosti. Ovi spektri su dobijeni mjerenjem energije u uskim opsezima talasnih dužina (5-10 nm) i povezivanjem dobijenih vrijednosti. Dakle, podaci koje imamo su diskretni i mogu se čuvati i kao vektori. Spektralna gustina snage je sveobuhvatna informacija o izvoru svjetlosti, ali zbog glomaznosti nije pogodna za praktičan rad.



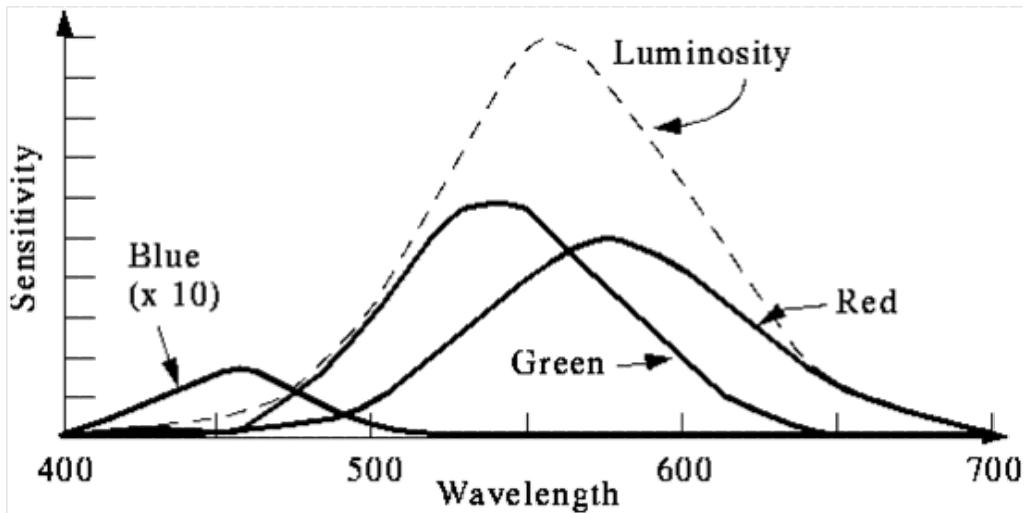
Slika 14: Spektralne gustine snage nekih izvora svjetlosti. Slijeva udesno i odozgo prema dole: rubinski laser, LED dioda, sijalica, dnevna svjetlost.





Slika 15: Poprečni presjek ljudskog oka.

Kompaktnija reprezentacija boje od spektralne gustine snage može se dobiti ako se razmotri princip funkcionisanja ljudskog vida. Ljudsko oko je senzor svjetlosti. Na Slici 15 prikazan je poprečni presjek oka. Rožnjača (cornea) i sočivo fokusiraju svjetlost na mrežnjaču (retinu). Mrežnjača se sastoji od dva tipa ćelija: štapića i čunjića. Pri slaboj svjetlosti, štapići generišu odziv i dobija se slika u nijansama sive. Čunjići, sa druge strane, omogućavaju vid u boji. Postoje tri tipa čunjića, od kojih je svaki osjetljiv na određeni opseg talasnih dužina svjetlosti koji približno odgovaraju crvenoj, zelenoj i plavoj svjetlosti. Na Slici 16, prikazane su krive osjetljivosti tri tipa čunjića i ukupna osjetljivost (luminous efficiency) u funkciji talasne dužine. Zasnovano na psihofizičkim mjerenjima, CIE (Commision Internationale de l'Eclairage) je prihvatila ove krive kao kao krive osjetljivosti "tipičnog" posmatrača za tri navedene boje (pigmenta). Može se uočiti da je osjetljivost "plavih" čunjića je mnogo manja od osjetljivosti crvenih i zelenih. Ovo je vjerovatno posljedica činjenice da su receptori plave boje evolutivno kasnije nastali. U vezi sa tim, zanimljivo je da je plava globalno najpopularnija boja na svijetu. Takođe, plavih čunjića ima mnogo manje nego crvenih i zelenih, odnos je otprilike G:R:B = 40:20:1.



Slika 16: Krive osjetljivosti tri tipa čunjića i ukupna osjetljivost u funkciji talasne dužine.

## 6.1 Percepcija intenziteta svjetlosti

Postavlja se pitanje kako kvantitativno opisati razliku svjetline dva izvora. Ova mjera bi trebalo da uzme u obzir i subjektivnost ljudske percepcije intenziteta svjetlosti. Polazna tačka za ovu analizu je Weber-Fechenrov zakon prema kojem promjene koje se opažaju kao jednake imaju isti relativni iznos. Ova osobina je primjećena u mnogim podsistemima ljudske percepcije pa tako i u vizuelnom sistemu. Sada je lako pokazati da je onda percepcija proporcionalna logaritmu intenziteta fizičke veličine.

*Intenzitet* svjetlosti predstavlja ponderisanu snagu svjetlosti izračene u određenom pravcu po jediničnom prostornom uglu (SI jedinica: kandela (cd)). Za ponderisanje se koristi funkcija spektralne osjetljivosti standardnog posmatrača. Intenzitet svjetlosti po jedinici površine ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) naziva se *luminansa*. Commission Internationale de L'Éclairage (CIE) koristi oznaku Y za luminansu. Obično se Y normalizuje na opseg 1 do 100 u odnosu na referentnu bijelu boju. Čovjek opaža relativnu razliku luminanse od oko 1%. Sjajnost (brightness) je atribut vizuelne percepcije kojim se opisuje sposobnost izvora da emituje ili reflektuje svjetlost. Sjajnost je perceptualna ocjena luminanse. Veza između opažene sjajnosti i luminanse je nelinearna. Svjetlina (lightness) je perceptualni odziv na luminansu. Prema CIE definiciji svjetlina je proporcionalna trećem korijenu luminanse.

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16. \quad (5)$$

Treći korijen je izabran zato što ima sličan oblik kao logaritamska funkcija

Da bi se poboljšala perceptualna uniformnost luminanse njena vrijednost se nelinearno transformiše. Ova operacija je poznata pod nazivom gama-korekcija

$$Y' = Y^{\frac{1}{\gamma}}. \quad (6)$$

Gama je tipično oko 2,5. Dobijena veličina se naziva luma i označava se sa  $Y'$ . Gama korekcija se primjenjuje i na pojedine komponente RGB kolor-modela u kom slučaju se koristi oznaka  $R'G'B'$ .

Gama korekcija potiče iz vremena ekrana sa katodnom cijevi. Njihova karakteristika je bila nelinearna i emitovana svjetlost je bila proporcionalna stepenu napona koji se dovodi na elektronski top. Dakle, ako je vrijednost signala  $Y$ , intenzitet emitovane svjetlosti je proporcionalna  $Y^\gamma$ . Vrijednost gama je oko 2,2. Da bi se kompenzirala ova nelinearnost, na vrijednosti signala se primjenjuje gama-korekcija (6). Sada će emitovana svjetlost biti proporcionalna vrijednosti signala. Ako gama korekcija ne bi bila primjenjena, slika bi bila pretamna.

Zanimljivo je primjetiti da vrijednost gama od 2,2 ne kompenzuje u potpunosti nelinearnost ekrana kod kojeg je gama oko 2,8. Ovo je urađeno zato da bi dobila nešto tamnija slika, prijatnija za gledanje u uslovima slabog osvetljenja.

Primjena gama korekcije je nekontrolisana i nekonzistentna. Za datu sliku nije jasno da li je gama korekcija primjenjena na vrijednosti piksela ili ne. Kamera može unijeti gama korekciju, softver može unijeti gama korekciju, softver može očekivati drugačiju vrijednost gama od stvarne, frame buffer može unijeti gama korekciju, računarska grafika se kreira bez gama korekcije...

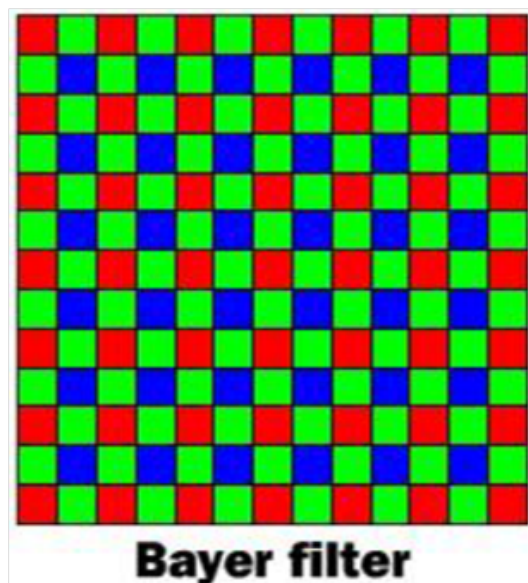
## 6.2 Trihromatska teorija

Pobuđeni svjetlošću neuroni (čunjići) generišu impulse. Odziv pojedinog kolor kanala (R, G, B) u oku je proporcionalan broju neurona koji generišu impulse i može se izračunati kao suma spektralne gustine snage svjetlosti koja pobuđuje čunjiće određenog tipa ponderisana osjetljivošću tog tipa čunjića

$$R = \int I(\lambda) S_R(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

$$G = \int I(\lambda) S_G(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

$$B = \int I(\lambda) S_B(\lambda) d\lambda \quad (9)$$



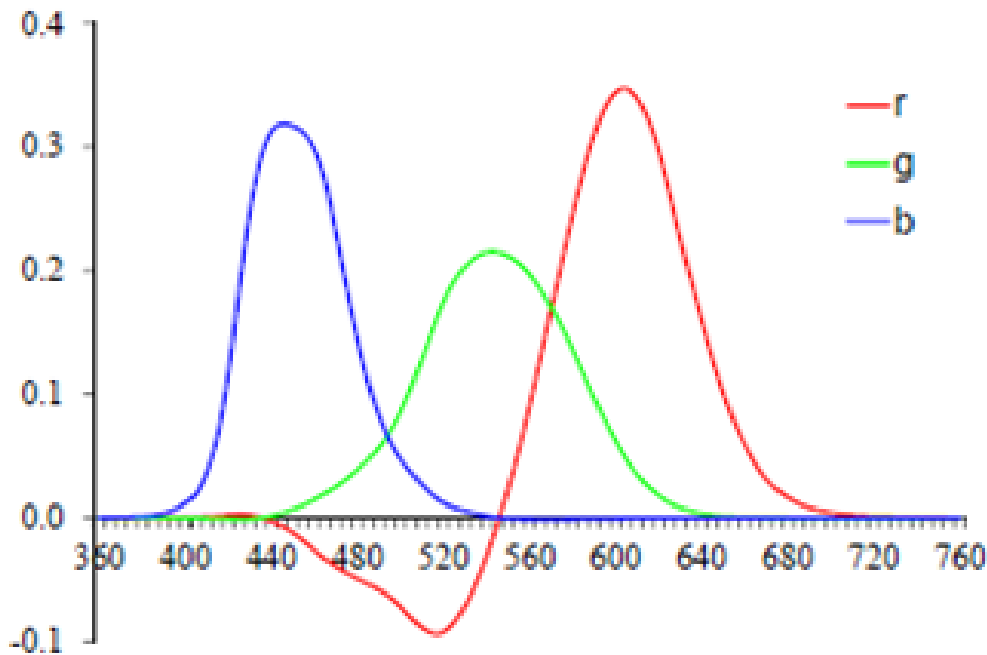
Slika 17: Bayerov filtarski niz.

Signal koji se dalje prenosi se sastoji od tri broja, odnosno, boje formiraju trodimenzionalni prostor.

Date jednačine predstavljaju model percepcije boja kada se posmatra izvor svjetlosti. Međutim, većina naše percepcije boja potiče od svjetlosti koja se reflektuje od objekata. Pošto različite površine različito reflektuju svjetlost različitih talasnih dužina, potrebno je u ove jednačine uvesti još jedan težinski faktor koji opisuje osobine površine – surface reflectance function.

Trihromatska teorija je iskorištena u projektovanju kamera tako što se koriste tri senzora na koje se svjetlost dovodi korištenjem prizmi. Ovi senzori proizvode tri signala na lokaciji svakog piksela (odgovara poziciji na mrežnjači). Dobijeni signali se zatim digitalizuju, koduju i memorišu. Kamere sa tri senzora su skupe i kako bi se smanjila cijena kamere, u potrošačkim kamerama se koristi samo jedan senzor u kombinaciji sa kolor-filtrima. Najčešće korišten filter je Bayerov filtarski niz prikazan na Slici 17.

Pošto se, po trihromatskoj teoriji, informacija o boji sadrži u odzivu tri tipa čunjića, logično je bilo pokušati da se odredi način za reprezentaciju boje pomoću tri primarne boje (pigmenta). U pokušaju da se dođe do ove reprezentacije, CIE (Comission Internationale d'Eclairage) je 1931. izvršila eksperiment u kojem je pokušana reprodukcija monohromatskih (svjetlost samo jedne talasne dužine) boja korištenjem primarnih boja talasnih dužina 700,0

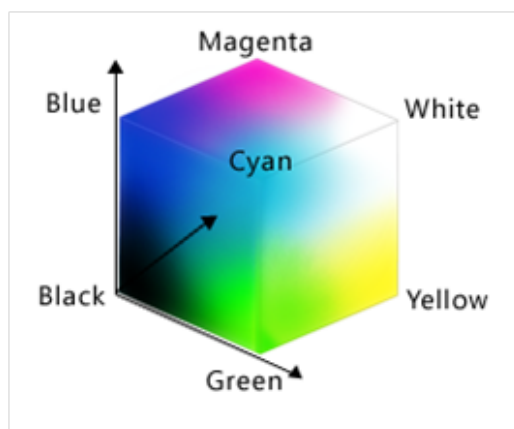


Slika 18: Funkcije uparivanja boja.

nm (crvena), 546,1 nm (zelena) i 435,8 nm (plava). U ovom eksperimentu, testnim subjektima je prikazana površina osvijetljena “testnom bojom” – monohromatskom svjetlošću, a njihov zadatak je bio da, podešavanjem, svjetline tri izvora svjetlosti primarnih boja upare testnu boju i postignutu kombinaciju primarnih boja. Evidentiranjem svjetlina primarnih boja za koje je postignuto uparivanje, dobijene su funkcije uparivanja boja (color matching functions),  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  i  $\bar{b}(\lambda)$ , za “standardnog posmatrača”, prikazane na Slici 18. Funkcije uparivanja boja pokazuju relativne iznose primarnih boja, u funkciji talasne dužine, koje je potrebno kombinovati kako bi se dobila svjetlost iste boje kao monohromatska svjetlost određene talasne dužine.

### 6.3 Kolor-prostori

Funkcije uparivanja boja omogućavaju reprezentaciju proizvoljne boje iznosima tri primarne boje koje su potrebne da se proizvede svjetlost te boje. Ove tri vrijednosti određuju koordinate boje u trodimenzionalnom prostoru koji ćemo nazvati kolor-prostor. Dakle, kolor-prostor je višedimenzionalni prostor čije koordinate odgovaraju komponentama reprezentacije boje. Pošto se svjetlost određene boje proizvodi superpozicijom svjetlosti primarnih boja,



Slika 19: RGB kolor-prostor.

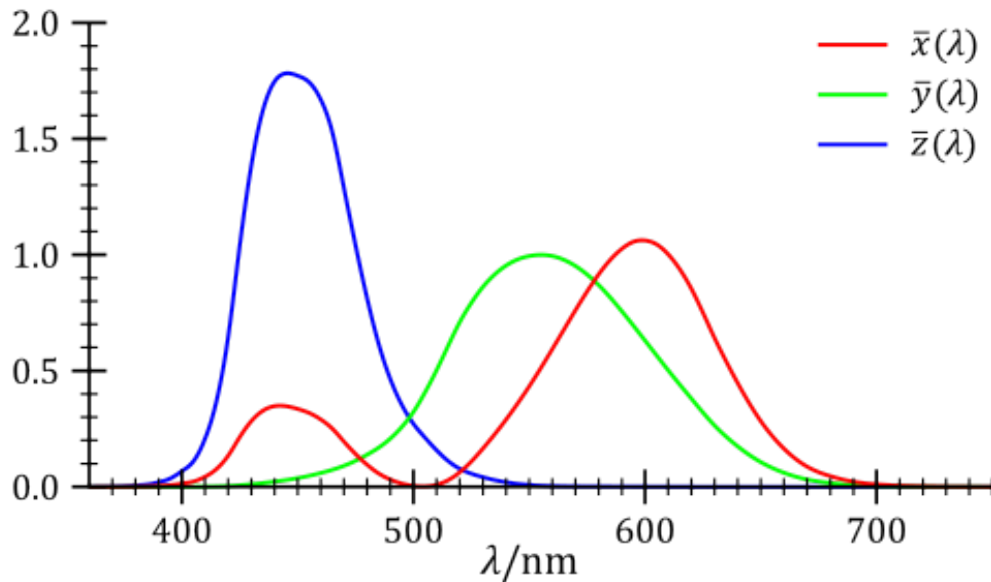
radi se o aditivnom kolor-prostoru. Pošto talasne dužine primarnih boja odgovaraju crvenoj, zelenoj i plavoj boji, ovaj kolor-prostor se naziva RGB kolor-prostor. RGB kolor-prostor se predstavlja kockom, kao na Slici 19. RGB kolor-prostor se upotrebljava u primjenama u kojima se boja formira korištenjem izvora svjetlosti, kao što su displeji i projektori.

Kao što je pomenuto, slike u boji se u RGB kolor-prostoru čuvaju korištenjem tri matrice, od kojih svaka sadrži jednu kolor-komponentu, kao na Slici 10.

Nedostatak funkcija uparivanja boja prikazanih na Slici 18 je potreba korištenja negativne svjetlosti da bi se uparile neke boje. Negativna svjetlost se tumači kao iznos crvene primarne boje koji je potrebno dodati testnoj boji kako bi se mogla predstaviti kombinacijom tri primarne boje.

U nastojanju da se izbjegne korištenje negativne svjetlosti, formiran je novi kolor-prostor CIE XYZ. Primarne boje su u CIE XYZ kolor-prostoru izabrane na takav način da se sve boje mogu predstaviti korištenjem nenegativnih iznosa primarnih boja, odnosno, da funkcije uparivanja,  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  i  $\bar{z}(\lambda)$  imaju nenegativne vrijednosti na cijelom opsegu talasnih dužina vidljive svjetlosti. Funkcije uparivanja u CIE XYZ kolor-prostoru su dobijene linearnom transformacijom funkcija uparivanja u RGB kolor-prostoru. Matrica transformacije je izabrana na takav način da funkcija  $\bar{y}(\lambda)$  odgovara ukupnoj osjetljivosti ljudskog vida (luminous efficiency),  $V(\lambda)$ .

Funkcije uparivanja boja u CIE XYZ kolor-prostoru prikazane su na Slici 20. Vidimo da su funkcije uparivanja boja sada nenegativne na cijelom opsegu talasnih dužina vidljive svjetlosti. Tri komponente (koordinate)



Slika 20: Funkcije uparivanja boja u CIE XYZ kolor-prostoru.

boje u CIE XYZ kolor-prostoru su sada

$$X = \int I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

$$Y = \int I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

$$Z = \int I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

Veličina  $Y$  naziva se luminansa i povezana je sa svjetlinom izvora svjetlosti.

Pošto su funkcije uparivanja boja u CIE XYZ kolor-prostoru dobijene linearnom transformacijom funkcija uparivanja boja u RGB kolor-prostoru, moguće je i komponente boje u RGB kolor-prostoru istom linearnom transformacijom preslikati u komponente boje u CIE XYZ kolor-prostoru. Ta transformacija je data sa

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{0,17697} \begin{bmatrix} 0,49 & 0,31 & 0,20 \\ 0,17697 & 0,81240 & 0,01063 \\ 0,00 & 0,01 & 0,99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Iako primarne boje u CIE XYZ kolor-prostoru nemaju fizički smisao, to je najčešće korišten kolor-prostor u kolorimetriji. Na osnovu primarnih boja

u CIE XYZ kolor-prostoru specificiraju se primarne boje u drugim kolor-prostorima. Takođe, konverzije reprezentacija boje iz jednog u drugi kolor-prostor se često izvode u dva koraka: konverziji iz polaznog u CIE XYZ kolor-prostor, a zatim konverziji iz CIE XYZ u ciljni kolor-prostor.

Ako se intenzitet svjetlosti mijenja, pri čemu je njen spektar fiksna, vrijednosti komponenata u CIE XYZ kolor-prostoru će se biti mijenjati proporcionalno promjeni intenziteta svjetlosti. U nekim situacijama, poželjno je, međutim, da reprezentacija boje ne zavisi od intenziteta svjetlosti. Kako bi se ovo postiglo, komponente boje u CIE XYZ kolor-prostoru se normalizuju zbirom svih komponenata

$$\begin{aligned}x &= \frac{X}{X + Y + Z}, \\y &= \frac{Y}{X + Y + Z}, \\z &= \frac{Z}{X + Y + Z}.\end{aligned}\tag{14}$$

Pošto je

$$x + y + z = 1,\tag{15}$$

ove tri veličine su redundantne. Obično se koriste veličine  $x$  i  $y$  koje se nazivaju *hromatske* komponente boje ili *hrominanse*. Sve boje se mogu predstaviti u ravni određenoj komponentama  $x$  i  $y$ , pri čemu se obično uzima  $z = 0$ . Kada se hrominansa  $x$  i  $y$  doda luminansa  $Y$  dobija se  $xyY$  kolor-prostor.

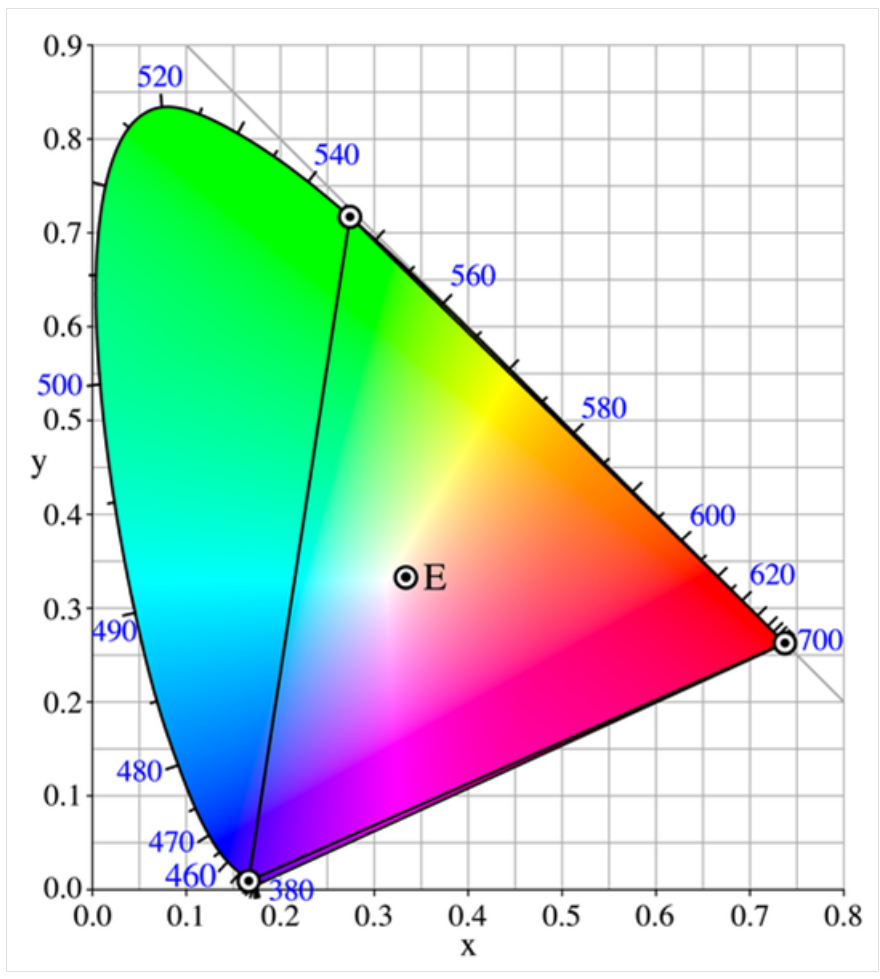
Boje se mogu predstaviti kao tačke u ravni određenoj komponentama  $x$  i  $y$ . Dobijeni dijagram se naziva CIE dijagram hrominansi. Primarne boje u CIE XYZ kolor-prostoru su predstavljene tačkama sa koordinatama  $(1, 0)$ ,  $(0, 1)$  i  $(0, 0)$ . Pošto vrijedi  $x \leq 1$ ,  $y \leq 1$  i  $x + y \leq 1$ , sve boje se moraju nalaziti unutar trougla određenog primarnim bojama.

Sve boje monohromatske svjetlosti su tačke na krivoj oblika potkovice koja se može nacrtati u dijagramu hrominansi, kao što je prikazano na Slici 21 na kojoj su naznačene i odgovarajuće talasne dužine. Duž koja spaja krajeve ove krive naziva se *linija ljubičaste*. Hrominanse na toj liniji se ne mogu postići monohromatskom svjetlošću.

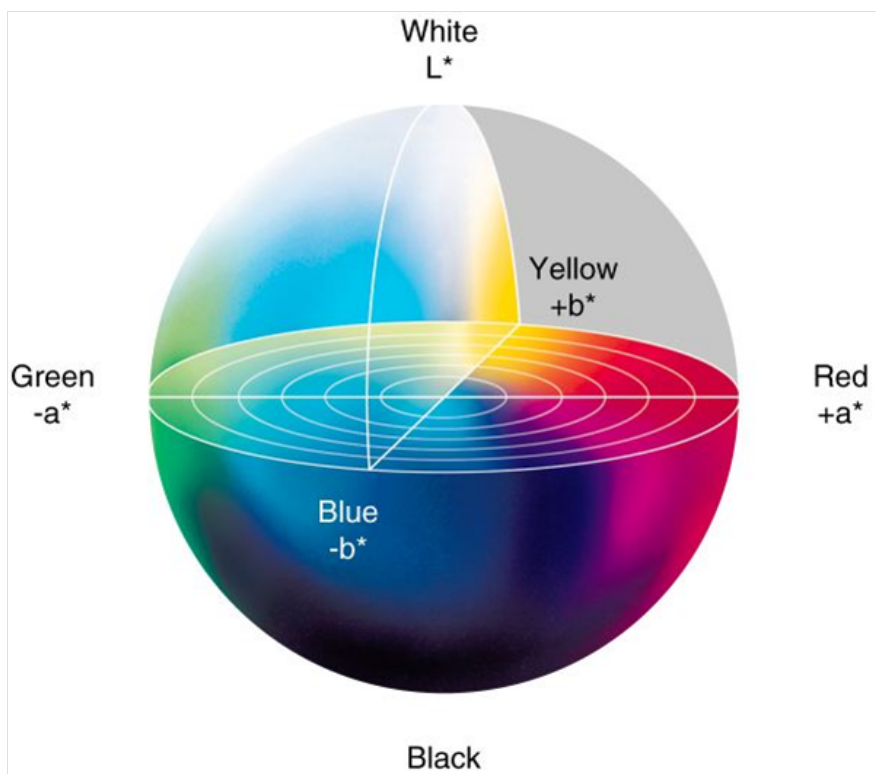
Sve boje svjetlosti u vidljivom spektru se nalaze unutar oblasti određene potkovičastom krivom i linijom ljubičaste. Te boje čine *gamut ljudskog vida* – sve boje koje prosječan posmatrač može da vidi.

Duž koja spaja dvije tačke na rubu daje sve boje svjetlosti koje se mogu dobiti miješanjem dvije date boje svjetlosti. Boje koje se dobijaju miješanjem tri primarne boje (na krivoj) se nalaze unutar trougla određenog tim bojama. Iz ovoga slijedi da se aditivnim modelom ne može reprodukovati kompletan gamut ljudskog vida.





Slika 21: CIE dijagram hrominansi.



Spektar svjetlosti za koju je  $X = Y = Z$  je konstantan i njoj odgovaraju hrominanse  $x = y = \frac{1}{3}$ . Ova tačka je na Slici 21 označena sa E (od equal energy) i naziva se *tačka bijele*. Međutim, uprkos nazivu, CIE ne definiše hrominansu koja odgovara bijeloj svjetlosti. Umjesto toga, definišu se *iluminante* sa određenim hrominansama, odnosno, spektrima. Ovi različite iluminante se mogu posmatrati kao različite vrste bijele boje i, pored primarnih boja, su važan podatak kako bi se boja mogla tačno reprodukovati. Neke od često korištenih iluminanti koje je definisala CIE su iluminanta A (karakteristična za inkandescentno osvjetljenje), te iluminante C, D65 i D100 koje su pokušaji da se karakteriše dnevno svjetlo.

Interesantno pitanje je kako mjeriti razliku boja. Pošto se boje mogu predstaviti tačkama u dijagramu hrominansi nameće se ideja da se razlika boja kvantitativno izrazi udaljenošću tačaka u dijagramu. Međutim, distanca u xy dijagramu ne odgovara stepenu razlike među bojama.

Kako bi se formirala perceptualno zasnovana mjera razlike boja, potrebno je uzeti u obzir Weber-Fechenrov zakon. Formira se novi kolor-prostor,  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) u kojem je boja predstavljena luminantnom komponentom  $L^*$  koja se naziva svjetlina (lightness) i dvije hromatske komponente,  $a^*$  i  $b^*$ .  $L^*a^*b^*$  kolor-prostor se može predstaviti kao na Slici 6.3. Sa slike

se vidi da vertikalna osa odgovara svjetlini, a horizontalne ose hromatskim komponentama. Definiše i veličina koja se naziva hroma (chroma)

$$c^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}. \quad (16)$$

Hroma je skala koja odgovara zasićenosti boje. Boja je zasićenija (izraženija) ako je bliže obodu lopte na Slici 6.3, a manje izražena ako je u blizini centralne ahromatske ose. Pomoću hromatskih komponenata može se izračunati i ton (hue)

$$h^* = \operatorname{arctg} \frac{b^*}{a^*}. \quad (17)$$

Hue je ugao koji odgovara ljudskoj definiciji “boje”, dakle pojmovima kao crvena, žuta, i slično.

Razlika boja se sada može izračunati kao

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}. \quad (18)$$

Vrijednosti kolor-komponentata u  $L^*a^*b^*$  kolor-prostoru se mogu izračunati na osnovu vrijednosti u CIE XYZ kolor-prostoru za datu iluminantu  $(X_n, Y_n, Z_n)$ .

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, \quad (19)$$

$$a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right], \quad (20)$$

$$b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right], \quad (21)$$

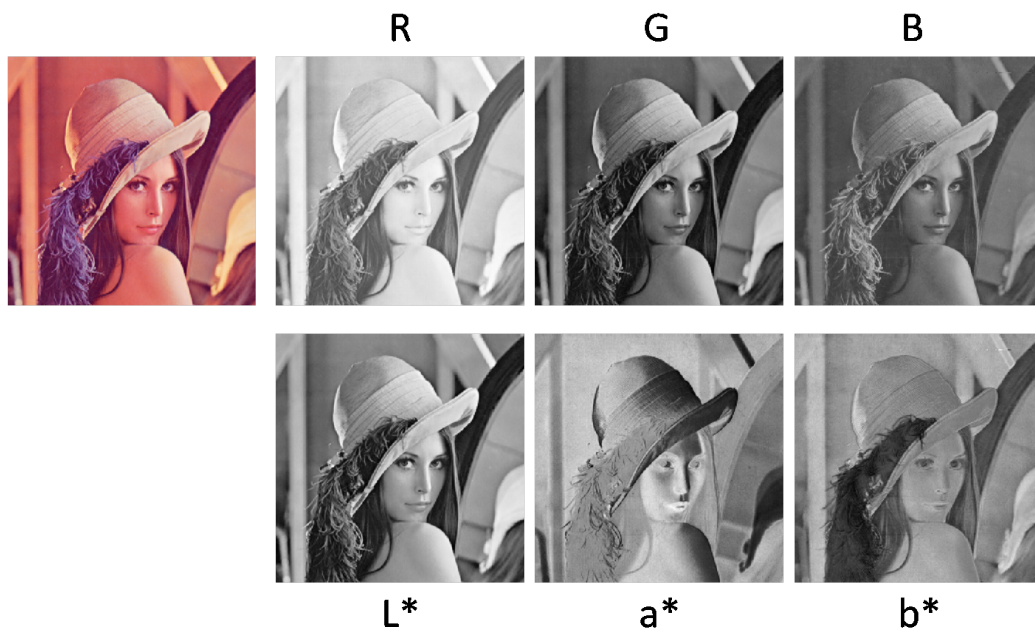
gdje je

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}}, & x > \delta^3, \\ \frac{x}{3\delta^2} - \frac{2\delta}{3}, & \text{inače} \end{cases}, \quad (22)$$

a  $\delta = \frac{6}{29}$ . U  $L^*a^*b^*$  kolor-prostoru se za postizanje sličnosti sa ljudskom percepcijom svjetline, umjesto logaritma, koristi stepen 1/3.

Na Slici je prikazana slika u boji i njene komponente u RGB i  $L^*a^*b^*$  kolor-prostorima. Vidimo da  $a^*$  osa odgovara skali od crvene/magenta do zelene (negativne vrijednosti zelena, pozitivne magenta) boje, a  $b^*$  osa skali od žute do plave (negativne vrijednosti plava, pozitivne žuta) boje.

RGB i CIE XYZ su aditivni kolor-modeli. Aditivni modeli su pogodni za opisivanje miješanja svjetlosti različiti boja, kao što je, na primjer, slučaj kod monitora. Međutim, ako se boja dobija nanošenjem tinte na podlogu (papir) onda je prikladnije korištenje suptraktivnog kolor-modela. U ovom



Slika 22: Slika Lena i njene komponente u RGB i L\*a\*b\* kolor-prostorima.

slučaju nanosena tinta iz spektra svjetlosti oduzima određene boje. Primjer suptraktivnog kolor-prostora je CMYK. Osnovne boje su cyan (C), magenta (M) i yellow (Y), kao što je prikazano na Slici 23. Proces formiranja boje prikazan je na Slici 24. Sa Slika 23 i 24 se vidi da se nanošenjem, npr. cyan tinte iz svjetlosti oduzima crvena boja i posmatrač vidi cyan koja je kombinacija plave i zelene.

U idealnom slučaju, dakle, bilo bi

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (23)$$

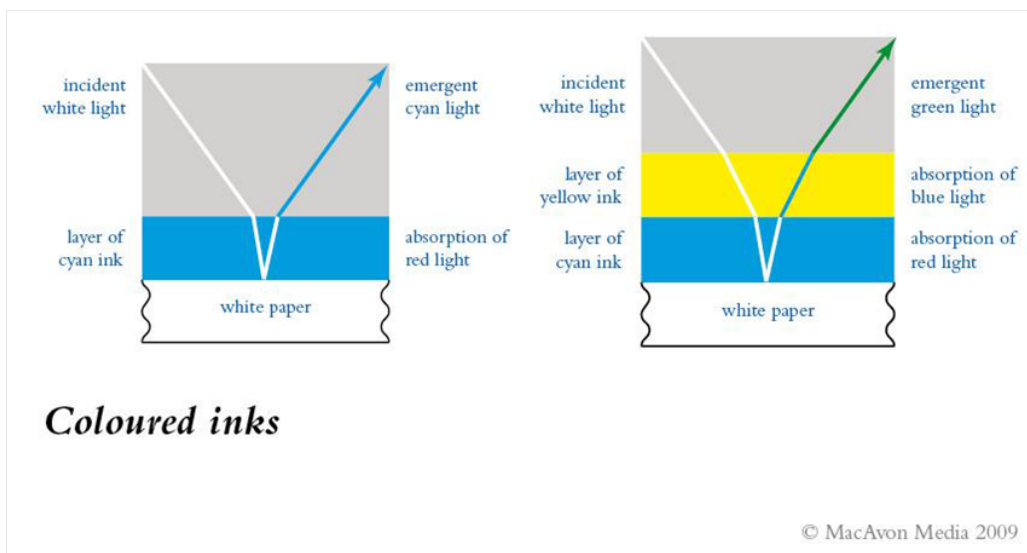
Međutim, u stvarnosti situacija nije tako jednostavna. Naime, krive transmisije, Slika 25, koje pokazuju kolika je propustljivost različitih tinti se preklapaju pa se boje kombinuju na nelinearan način što otežava predviđanje rezultujućih boja u štampi.

Na Slici 26 prikazan je gamut štampača. Vidimo da je nemoguće odštampati sve boje iz RGB kolor-modela, a neke iz CMYK modela se ne mogu predstaviti u RGB.

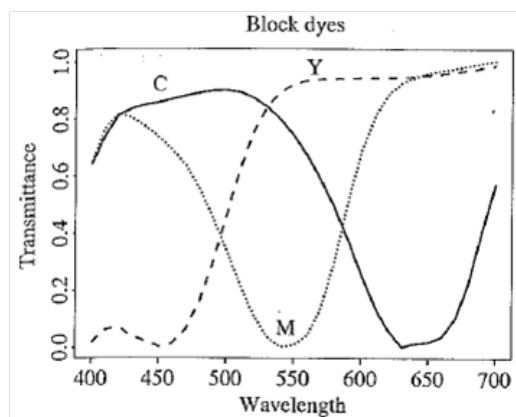
Miješanjem cyan, magenta i yellow ne dobija se kvalitetna crna. Osim toga ako bi se na ovaj način štampao npr. crni tekst, greške u registraciji pri



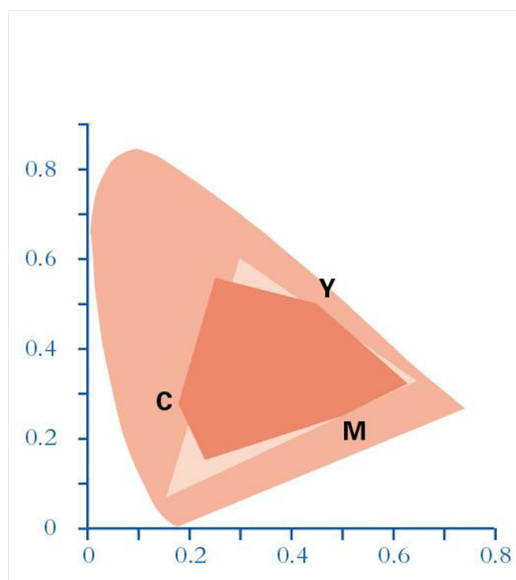
Slika 23: Osnovne boje u CMYK kolor-prostoru.



Slika 24: Formiranje boje u CMYK kolor-prostoru.



Slika 25: Krive transmisije.



Slika 26: Gamut štampača.

štampi će biti vidljive. Jeftinije i kvalitetnije rješenje je koristiti crnu tintu nego praviti kombinaciju tri osnovne boje iz CMY modela. CMY komponentama se dodaje K komponenta koja se izračunava kao

$$K = \min \{C, M, Y\}, \quad (24)$$

a vrijednosti CMY komponenata se ažuriraju

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} C - K \\ M - K \\ Y - K \end{bmatrix}. \quad (25)$$

U softveru za obradu slike i računarsku grafiku često se koristi neki od modela HSI, HSL ili HSV. Ovi modeli su nastali iz želje da se formira perceptualno uniformniji kolor-prostor i da se izbor boja u korisničkom softveru učini intuitivnijim, približavajući se načinu na koji čovjek razmišlja o bojama. H (hue) komponenta se u ovim prostorima slično definiše i predstavlja ton. S (saturation) komponenta predstavlja zasićenje boje i njene definicije se razlikuju u ovim modelima, uprkos istoj oznaci. Konačno L (lightness), V (value) i I (intensity) su različiti pokušaji da se opiše luminansa koju korisnik opaža. HSL i HSV modeli su ilustrovani na Slici 27. Primjer komponenata slike u HSV kolor-prostoru dat je na Slici 28.

Najznačajniji kolor-modeli koji se koriste u videu su YIQ, korišten u analognom NTSC sistemu, YUV, korišten za PAL analogni video i YCbCr, koji se koristi u CCIR 601 standardu za digitalni video. Iz razloga kompatibilnosti unazad, odnosno, kako bi crno-bijeli televizori mogli da koriste signal televizije u boji, kao i zbog efikasnijeg kodovanja boje, video signal se dijeli na luminantnu (informacija o svjetlini) i hrominantne (informacija o boji) komponente. Vrijednosti komponenata u YUV kolor-modelu se dobijaju linearnom transformacijom RGB komponenata. Prvo se izračunava luma, Y'

$$Y' = 0,299R' + 0,587G' + 0,114B'. \quad (26)$$

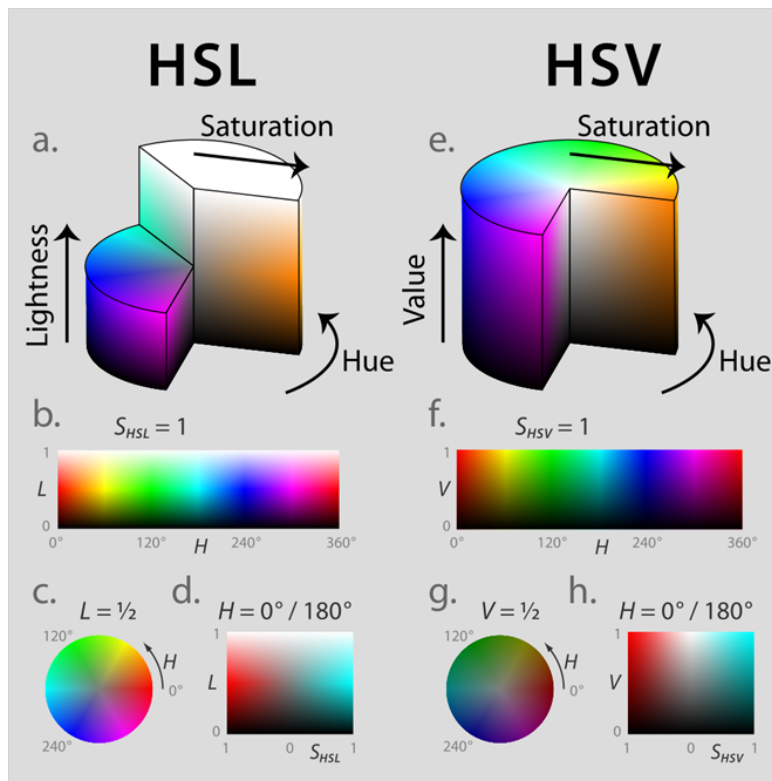
Zatim se hrominanse izračunavaju kao razlike između boja i referentne bijele na istoj luminansi. Mogu se izraziti kao

$$U = B' - Y', \quad (27)$$

$$V = R' - Y', \quad (28)$$

odakle se dobija

$$\begin{bmatrix} Y' \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,299 & -0,587 & 0,886 \\ 0,701 & -0,587 & -0,114 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (29)$$



Slika 27: HSL i HSV kolor-prostori.



Slika 28: Komponente slike Lena u HSV kolor-prostoru.



U digitalnom videu, prema standardu CCIR 601, kao i u JPEG i MPEG kompresiji koristi se linearna transformacija YUV modela poznata pod nazivom YCbCr kolor-model. Vrijednost luma je u ovom kolor-modelu ista kao i u YUV kolor-modelu, a hrominanse se računaju kao

$$U = \frac{B' - Y'}{1,772}, \quad (30)$$

$$V = \frac{R' - Y'}{1,402}, \quad (31)$$

odakle se dobija

$$\begin{bmatrix} Y' \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,168736 & -0,331264 & 0,5 \\ 0,5 & -0,418688 & -0,081312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (32)$$