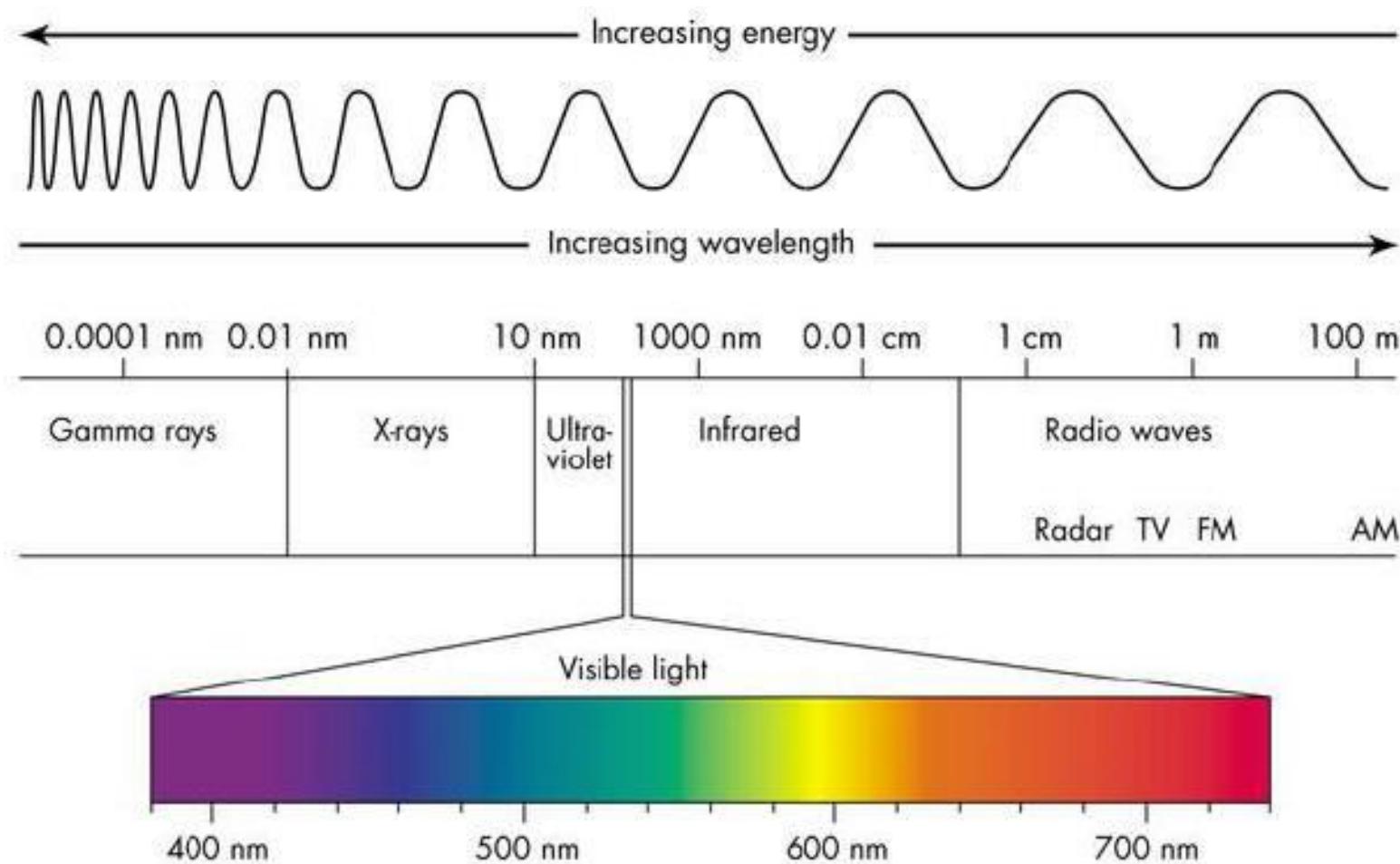


Digitalna reprezentacija slike i videa

Rezolucija, kvantifikacija, modeli boja

Svetlost kao elektro-magnethno zračenje

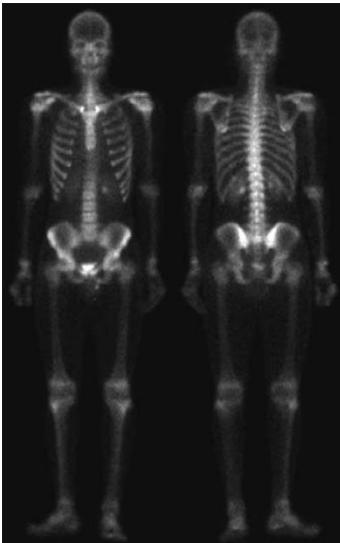


vidljive talasne dužine za prosečnog čoveka 390nm – 750nm

Slike vanama vidljivog spektra

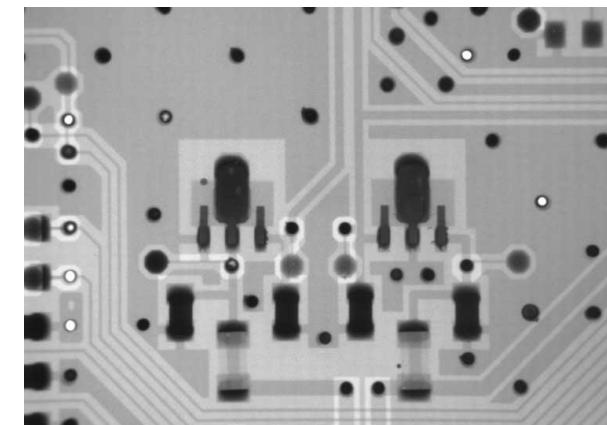
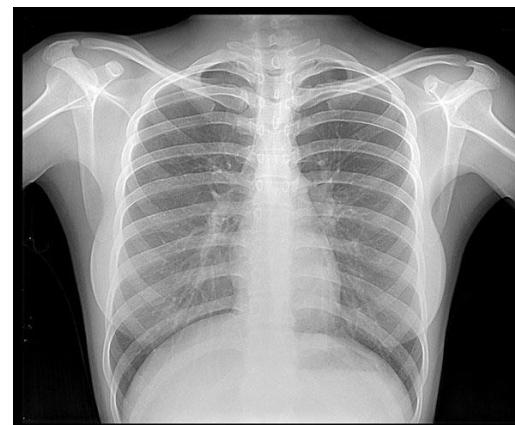
Gama zraci

- *Nuclear medicine* – u pacijenta se ubaci radioaktivni izotop koji emituje gama zrake (patologija kostiju, tumori, infekcije)
- Astronomске opservacije



Rendgenski snimci

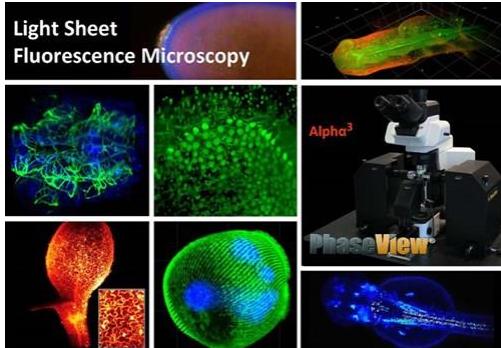
- Medicinska dijagnostika
- Astronomija
- Industrija: automatska inspekcija štampanih ploča (nedostajuće komponente, preolmljene putanje)



Slike vanama vidljivog spektra

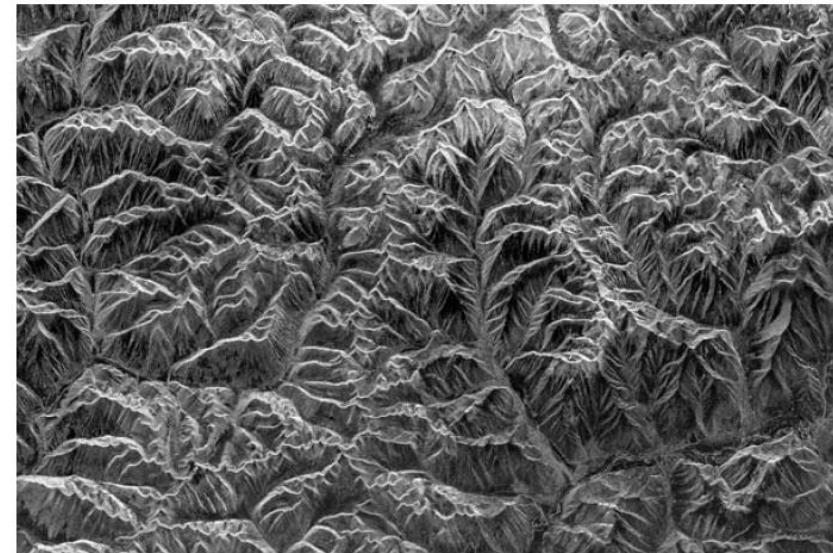
Ultravioletno zračenje

- Industrijske inspekcije
- Fluorescentna mikroskopija
- Astronomija



Mikrotalasi

- Radar – ne zavisi od vremena i osvetljenja ambijenta
- Slika: planine (jugoistočni Tibet)



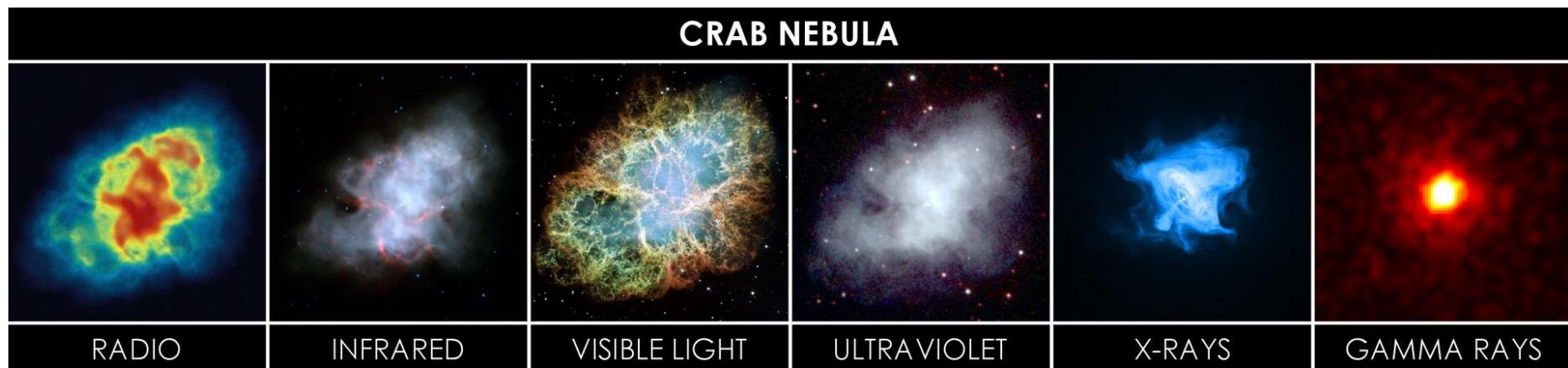
Slike van nama vidljivog spektra

Radio talasi

- Medicina (MRI)
- Astronomija



Slike vanama vidljivog spektra



- Ponekad slikamo istu scenu pomoću različitih modaliteta kako bismo dobili različite informacije o njoj

Ljudski vid

- Iako je polje digitalne obrade slika izgrađeno na matematičkim i probabilističkim formulacijama, ljudska intuicija i analiza često igraju ključnu ulogu u odabiru jedne tehnike naspram drugih
- Često je ovaj izbor diktiran subjektivnim, vizuelnim procenama
- Zato je dobar prvi korak razumevanje ljudske vizuelne percepције
- Koncentrisaћemo se na najjednostavnije aspekte ljudskog vida. Cilj nam je da shvatimo:
 - Mehaniku i parametre koji utiču na to kako se slike formiraju kod ljudi i kako ih ljudi percipiraju
 - Fizička ograničenja ljudskog vizuelnog sistema u smislu faktora koji utiču na rad sa digitalnim slikama
 - Na primer, kako se ljudsko oko i elektronski uređaji razlikuju u pogledu rezolucije i mogućnosti adaptacije promeni u osvetljenju

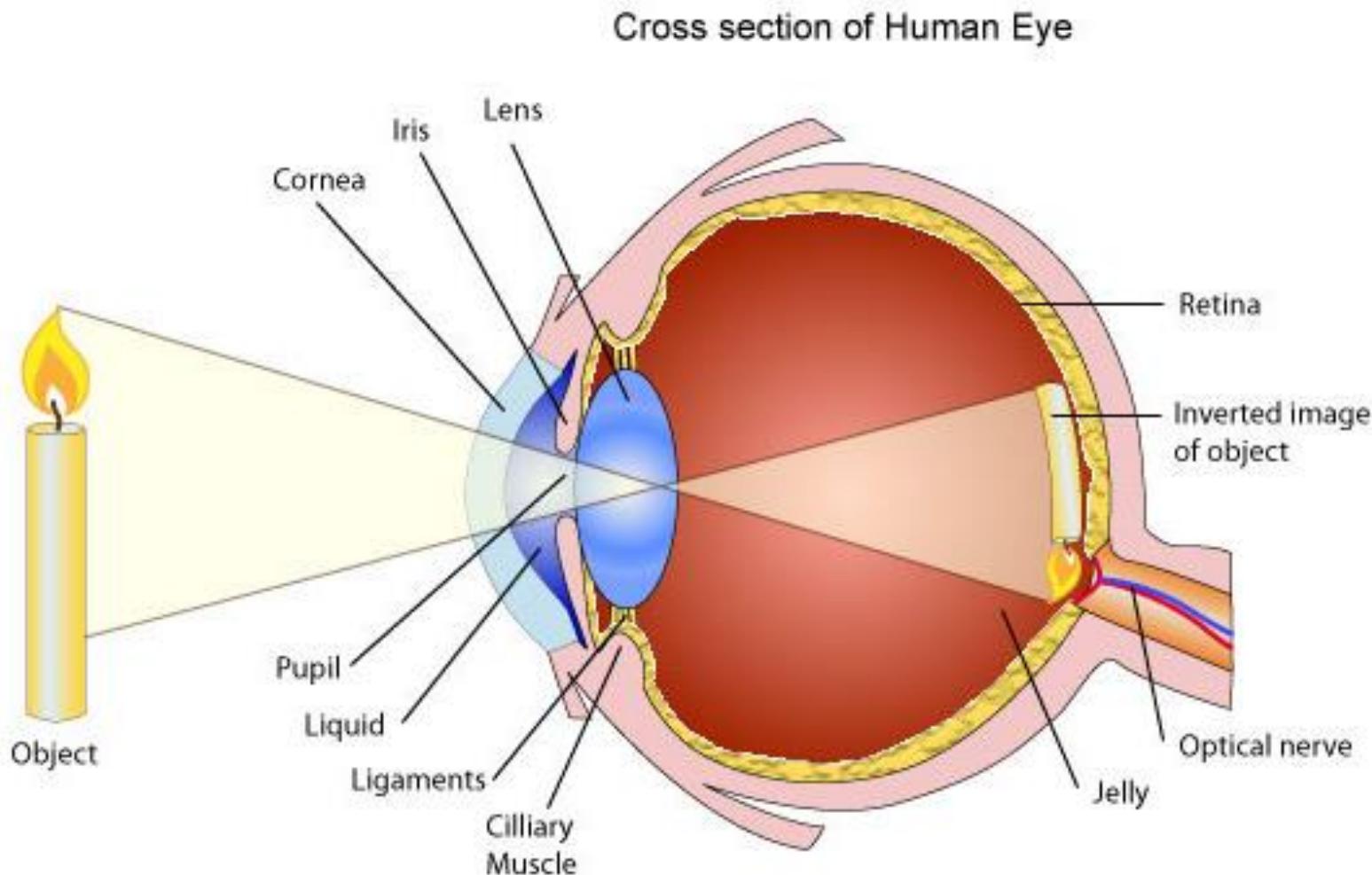
Ljudski vid

- Iza kompleksnog aparata postoji izuzetna moć procesiranja
- Prirodne scene se mogu vrlo brzo analizirati u mozgu iako su često kompleksne
 - Svet u kome se nalazimo je često zašumljen ili dvostrukturan, problemi često nisu uvek idealno predstavljeni i neke ključne informacije nisu poznate u momentu donošenja odluke
 - Osvetljenje, real-time, šum, ugao posmatranja
- Pored sposobnosti da shvatimo svet oko sebe, takođe možemo i relativno brzo da odreagujemo na stimulanse
 - Npr. sportisti su dodatno istrenirali vizualnu percepciju da bi posebno brzo reagovali
 - Ključna osobina koja dozvoljava ljudima da brzo reaguju na stimulanse su situacije koje su često ponovljene
- Većina ljudi procesira ~500 megapiksela u obično ~30 fps bez velikog napora

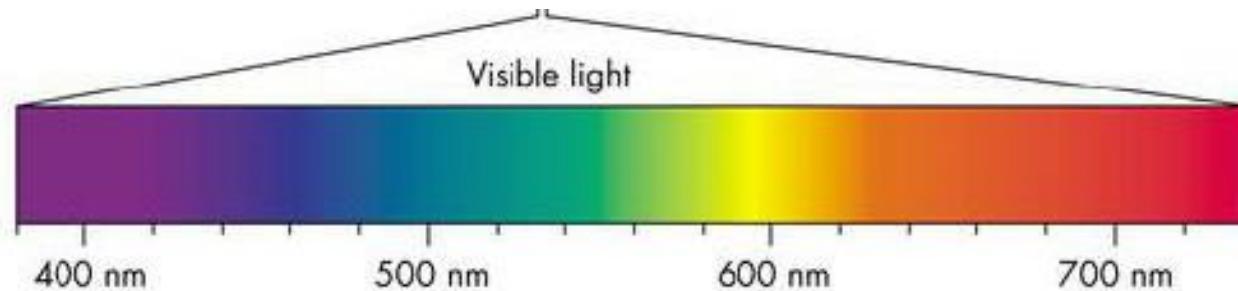
Ljudski vid

- Za razumevanje slike , pored fizičkog čula vida, čovek koristi i iskustvo i znanje
 - Koristimo prepostavke/predrasude o svetu oko nas
 - Na primer, vožnja po kiši bi bila nemoguća bez prepostavke da su apstraktne slike i svetla na šoferšajbni drugi automobili
- Još jedan od ključnih faktora sposobnosti ljudi da se snalaze u realnom svetu je činjenica da smo navikli vežbom na mehanizme, veličine i količine koje nas okružuju i koje su česte
 - Ljudi su upoznati sa malim brojevima i pojmovima kao što su automobil, zgrada, drvo, put
 - Pred iskustva o razmerama čestih stvari, aparat skriva od svesti da koristi perspektivu, binokularan vid, i razne druge vizualne trikove da bi odredio razdaljinu i veličinu objekata koje posmatramo
 - Kada se ljudi ne nalaze u uobičajenom okruženju, ovo predstavlja problem. Na primer, astronaut bez mernog instrumenta ne može biti siguran da li je asteroid koji vidi 100m u prečniku na daljini od 100m ili 1m u prečniku na daljini od 1m jer nema uobičajenih detalja koji bi odali udaljenost objekta, odnosno konteksta

Ljudski vid



Ljudski vid

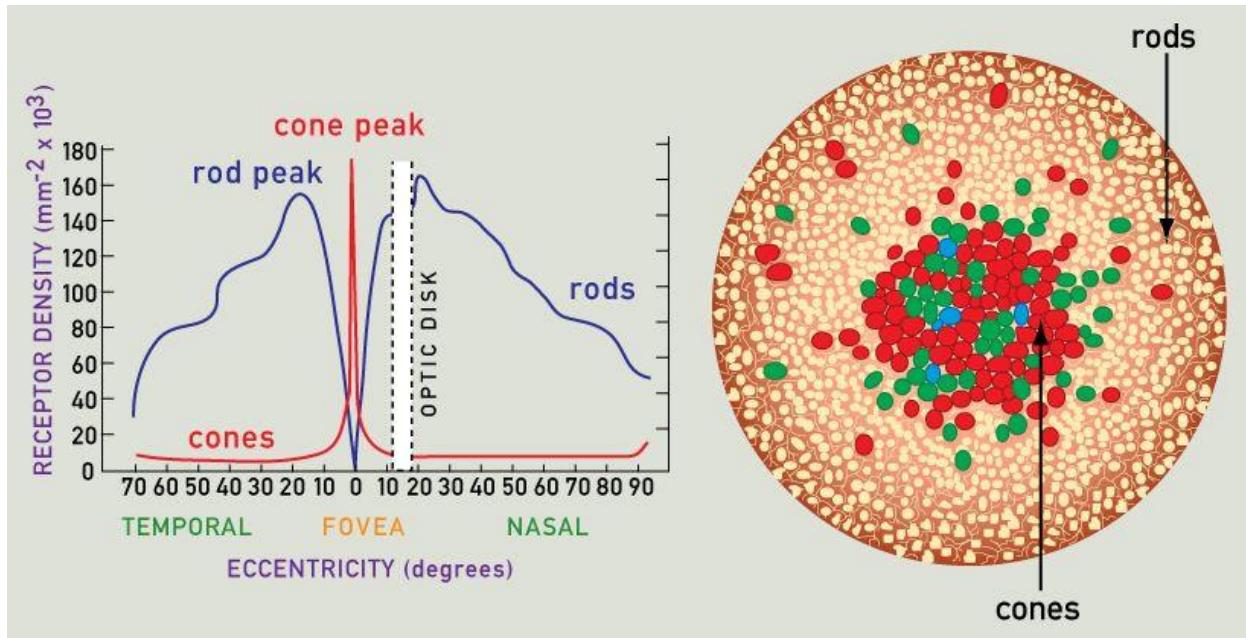


- Vidljive talasne dužine za prosečnog čoveka su 390 – 750 nm
- Kratke talasne dužine percipiramo kao ljubičastu, a duge kao crvenu boju
- Antena koja može da „uhvati“ određenu frekvenciju mora biti proporcionalna talasnoj dužini
- Ovo diktira veličinu i rezoluciju senzora na retini – zbog toga je moguće da retina bude mala i sadrži veliki broj fotoosetljivih ćelija

Ljudski vid

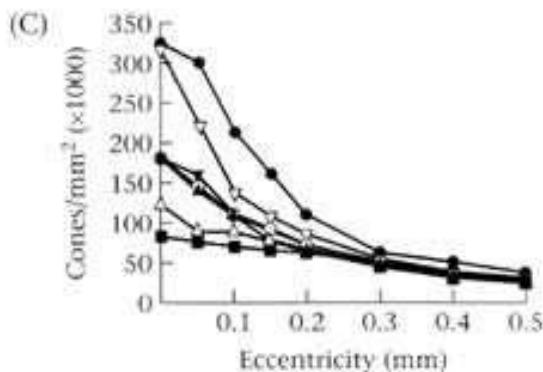
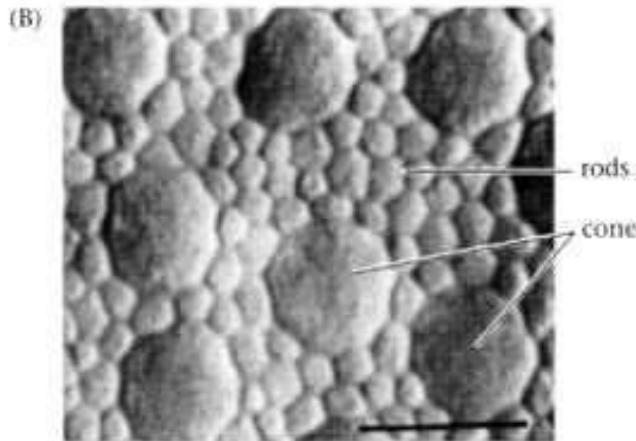
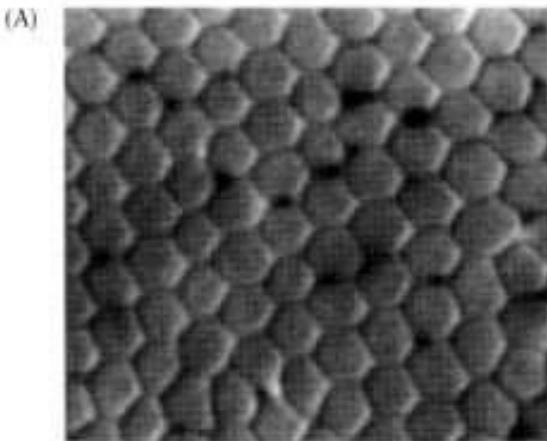
- Ljudi poseduju izuzetan aparat u čulu vida
 - Jedan od najdetaljnijih čula – ljudsko oko poseduje između 300 i 900 mega-piksela rezolucije
 - Moguće je snimiti veliki broj podatka brzo
 - Doživljaj vida je jedan od najdetaljnijih čula i samim tim, aparat koji sačinjavaju oči i vizualni deo mozga su veoma značajni, veliki, i troše puno energije
- Ljudske oči drugačije procesiraju intenzitet svetlosti od boje
 - Čelije koje procesiraju intenzitet (*rods*) svetlosti su manje osetljive na frekvenciju
 - Čelije osetljive na frekvenciju (*cones*) najbolje rade pri velikom intenzitetu svetla

Ljudski vid



- Levo: gustina ćelija na retini
- *Cones* su najgušći pri centru (gde vidimo najbolje). Ove ćelije dobro procesiraju detalje (boju), ali dobro rade samo pri velikom intenzitetu svetla
- *Rods* su malo uniformnije raspoređeni na retini (manja koncentracija je tamo gde su *cones* najgušći). Ne služe za prepoznavanje detalja, već za sticanje generalne ideje o sceni. Osetljive su na intenzitet svetlosti i mogu dobro da rade pri slabom intenzitetu svetla
 - Na primer, objekti koji deluju intenzivnih boja po sunčevoj svetlosti, po mesečini izgledaju kao bezbojni oblici jer su samo *rods* ćelije stimulisane

Ljudski vid



3.4 THE SPATIAL MOSAIC OF THE HUMAN CONES. Cross sections of the human retina at the level of the inner segments showing (A) cones in the fovea, and (B) cones in the periphery. Note the size difference (scale bar = 10 μm), and that, as the separation between cones grows, the rod receptors fill in the spaces. (C) Cone density plotted as a function of distance from the center of the fovea for seven human retinas; cone density decreases with distance from the fovea. Source: Curcio et al., 1990.

Slika prikazuje raspored ćelija na retini:

- Levo: sredina
- Desno: periferija
- Svaka *cone* ćelija se završava nervnim završetkom
- Dok više *rods* ćelija deli isti nervni završetak (jednostavna, opšta predstava prikaza)

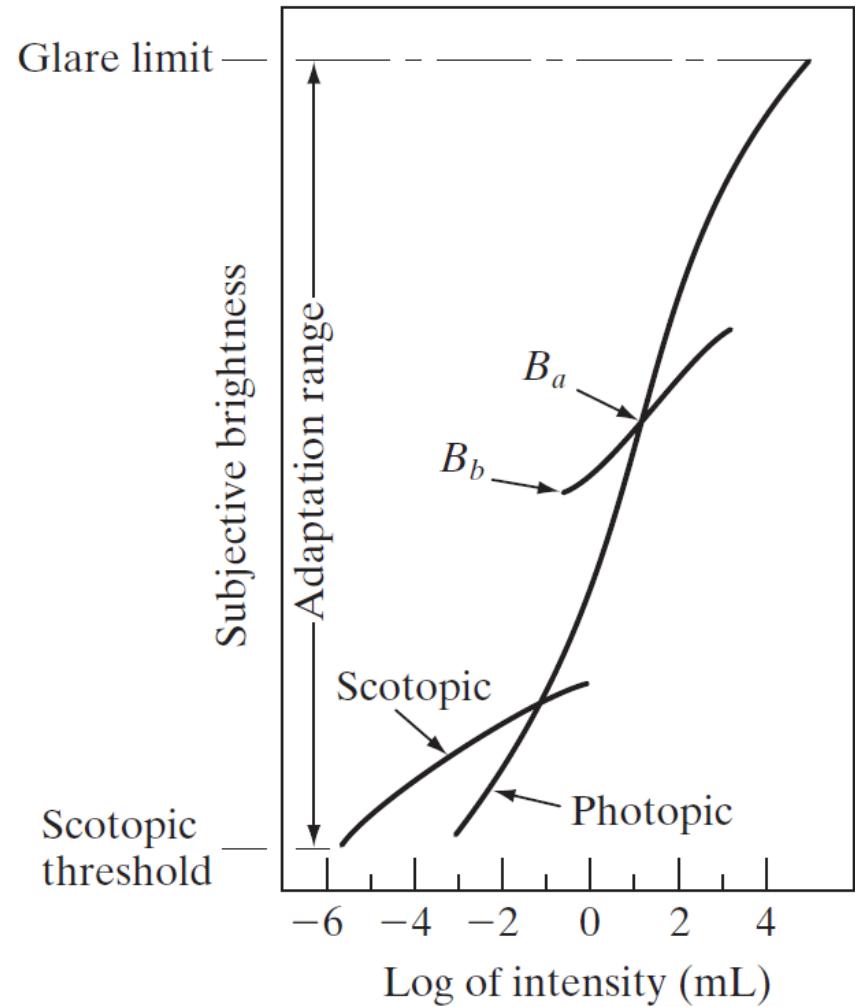
- Možemo primetiti da je rezolucija oka veća u sredini vidnog polja nego na perifерији
- Ovo se razlikuje u odnosu na mehaničke uređaje (poput CCD senzora) gde je rezolucija uniformna

Ljudski vid – rezolucija

- *Fovea* je centralni deo retine gde je vid najprecizniji i gde najbolje razlikujemo boje
 - Mi nesvesno koristimo mišiće oka da se scena od interesa fokusira na centralni deo retine
 - Kružnog je oblika, oko 1.5 mm u prečniku. Zbog jednostavnosti, aproksimiraćemo da se radi o kvadratu $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$
 - Gustina *cones* ćelija u ovoj regiji je oko $150\,000 \text{ po mm}^2$
 - Prema ovim aproksimacijama, broj *cones* ćelija u regiji oka najveće oštchine je 337 000
 - Poređenja radi, CCD uređaji srednje rezolucije imaju isti broj receptora na $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$
- Dok moć ljudskog oka da integriše inteligenciju i iskustvo sa vizuelnim informacijama čini ovo poređenje donekle površnim, treba imati u vidu da je bazična moć oka da razaznaje detalje uporediva sa trenutno postojećim elektornskim senzorima

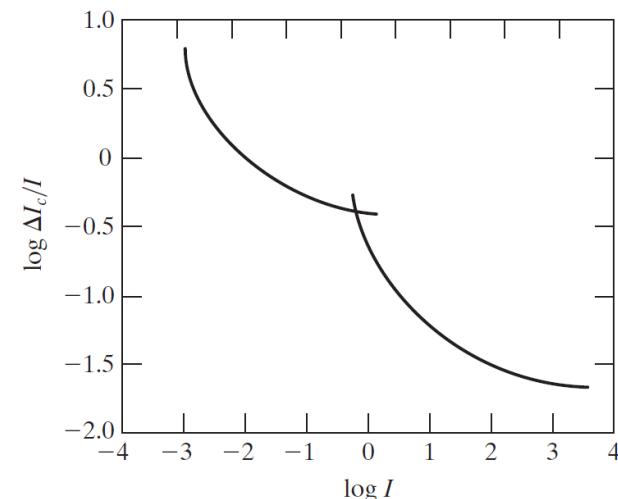
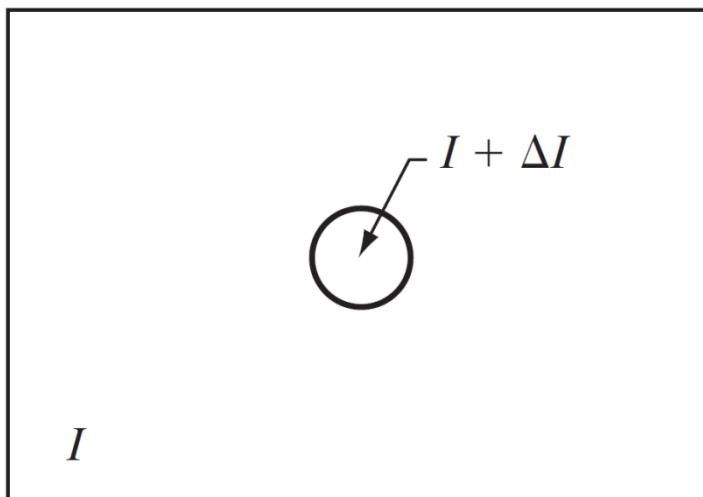
Ljudski vid

- Pošto su digitalne slike prikazane kao diskretan skup intenziteta, važno je razmotriti mogućnost oka da razlikuje različite nivoje intenziteta
- Pomoću *cones* i *rods*, dobijamo veoma veliki spektar intenziteta koje možemo videti golim okom
- Problem je što ne možemo videti taj širok spektar intenziteta istovremeno. Moramo da se adaptiramo
 - Na primer, ako smo adaptirani na tačku B_a , nećemo dobro videti nizak i visok intenzitet
- Ali, jednom kada smo se prilagodili, bez obzira na generalno osvetljenje, u stanju smo da razlikujemo detalje (i pri visokom i pri niskom generalnom intenzitetu)



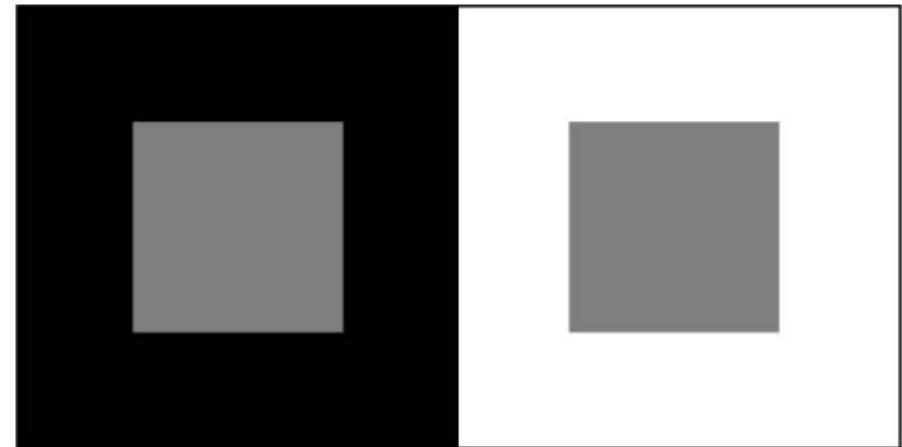
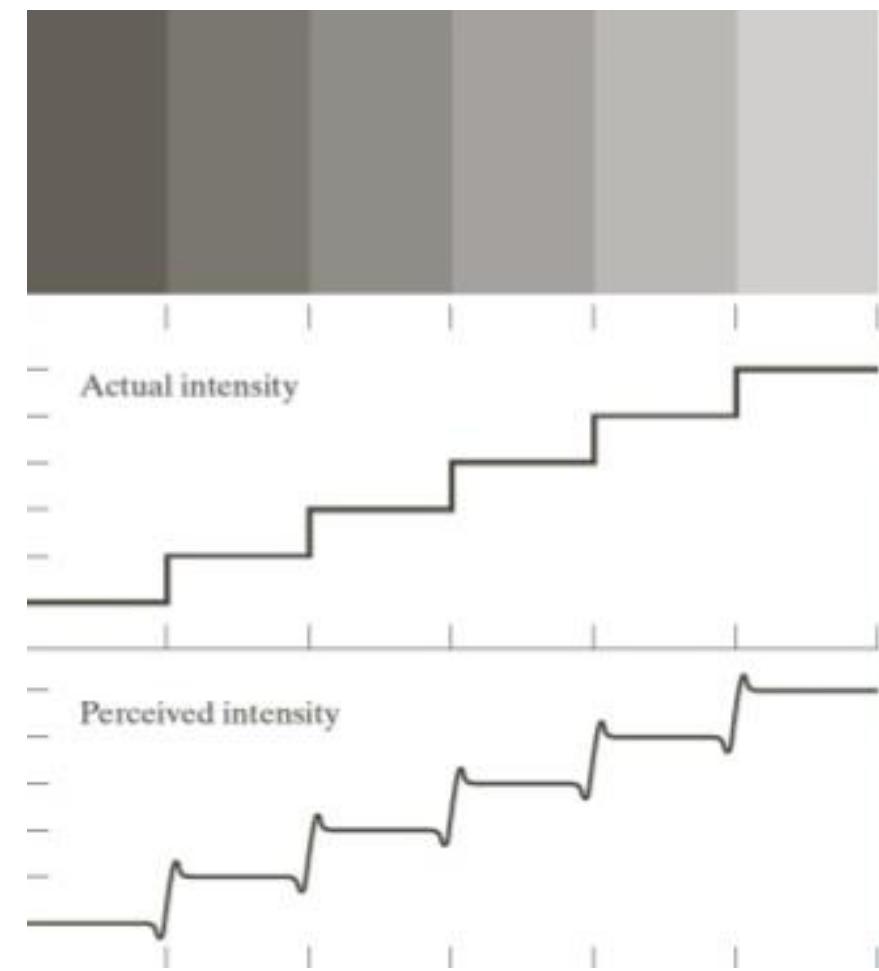
Ljudski vid

- Od interesa nam je da proučimo i moć ljudskog oka da percipira *promene* u intenzitetu svetla
- Eksperiment
 - Imamo pozadinsko svetlo intentiteta I i iscrtavamo krug u sredini
 - Menjamo intenzitet kruga sve dok ga posmatrač ne primeti
- Količina promene koja nam je neophodna da vidimo zavisi od pozadinskog svetla i ovo se zove *Weber-ov zakon*
 - Kada smo u uslovima niskog intenziteta svetlosti, potrebno nam je da promena bude relativno visoka
 - Sa druge strane, ako je pozadinsko svetlo jako, dovoljna nam je mala promena



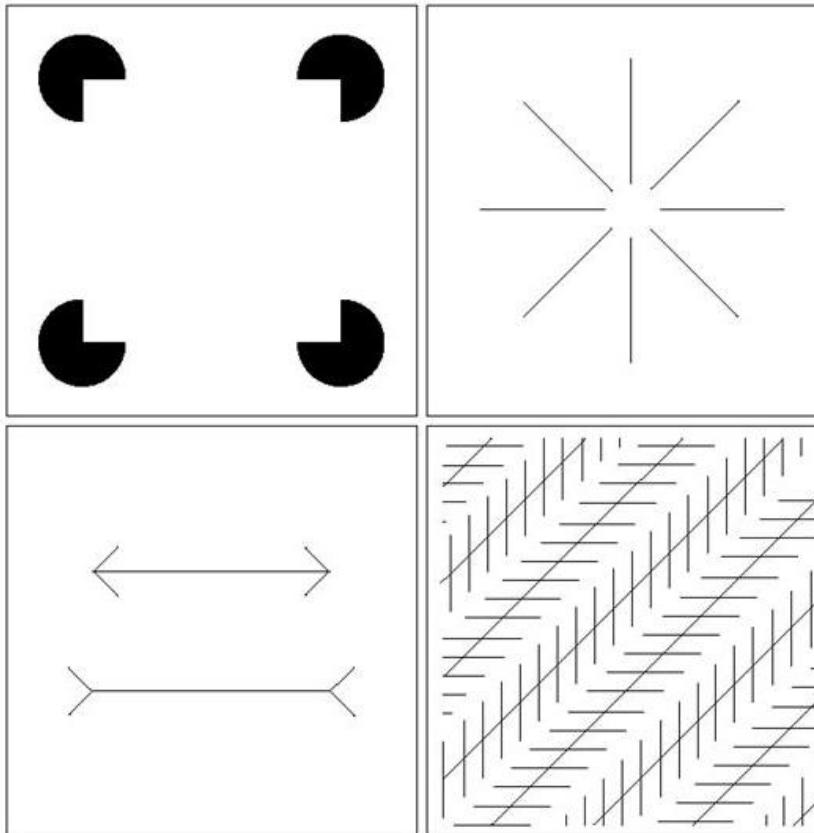
Ljudski vid

- *Mach band effect*

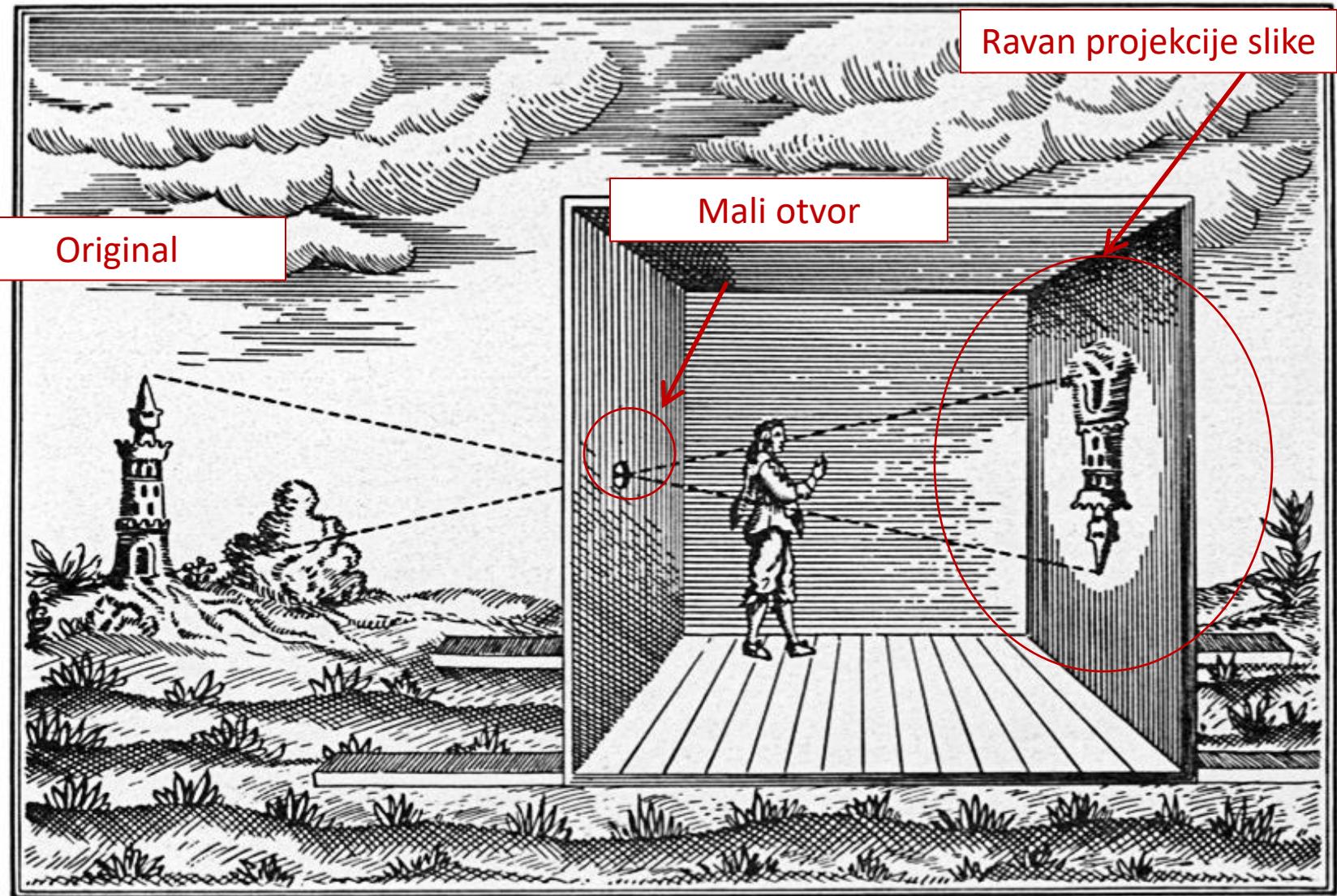


Ljudski vid

- Optičke iluzije



Senzori za generisanje slike *camera obscura*

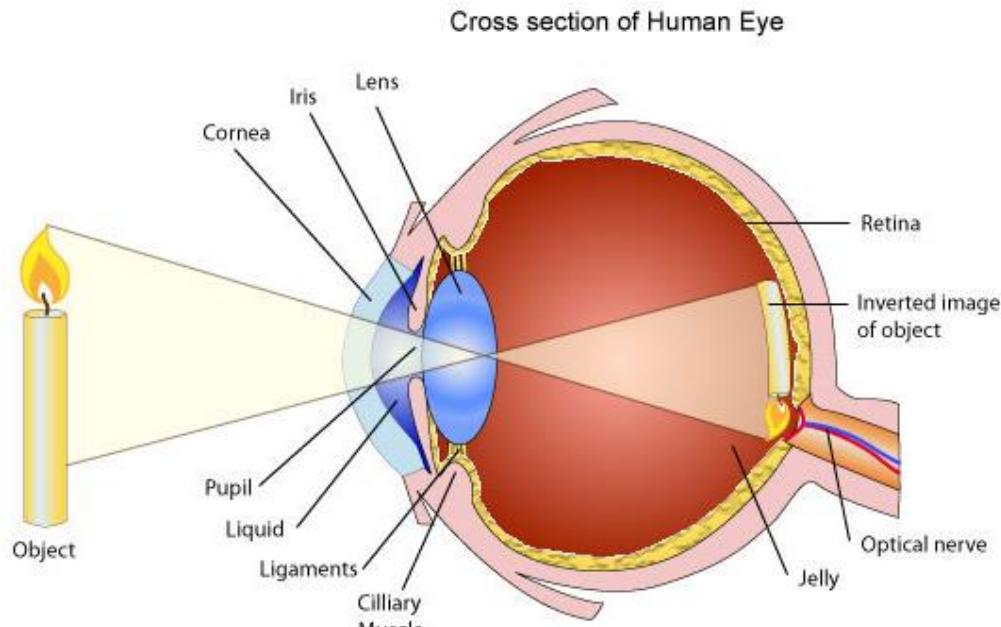
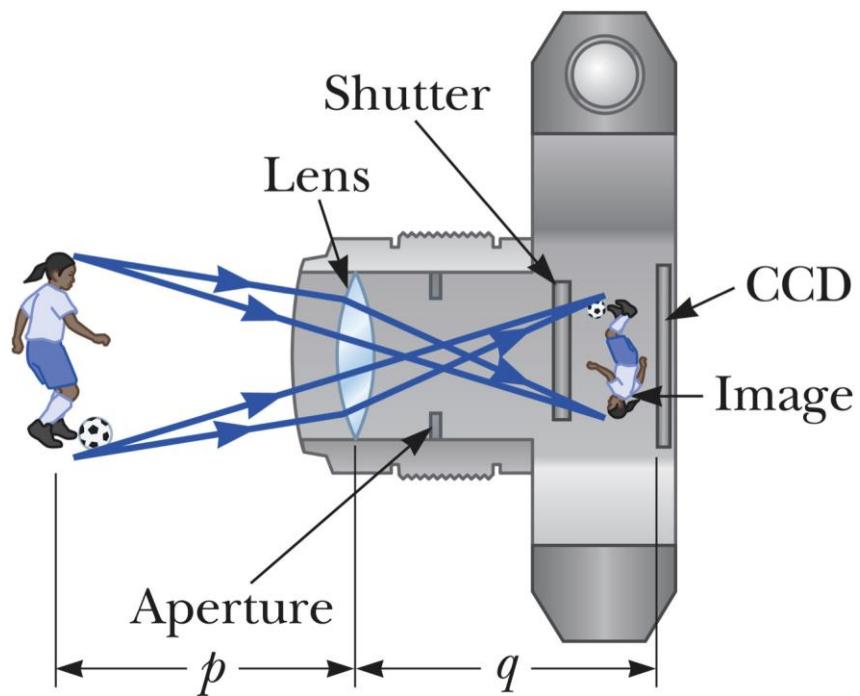


Praktična camera

- Karton na prozorima, potpuni mrak sa samo jednim malim otvorom za svetlost



Fotoaparat i oko

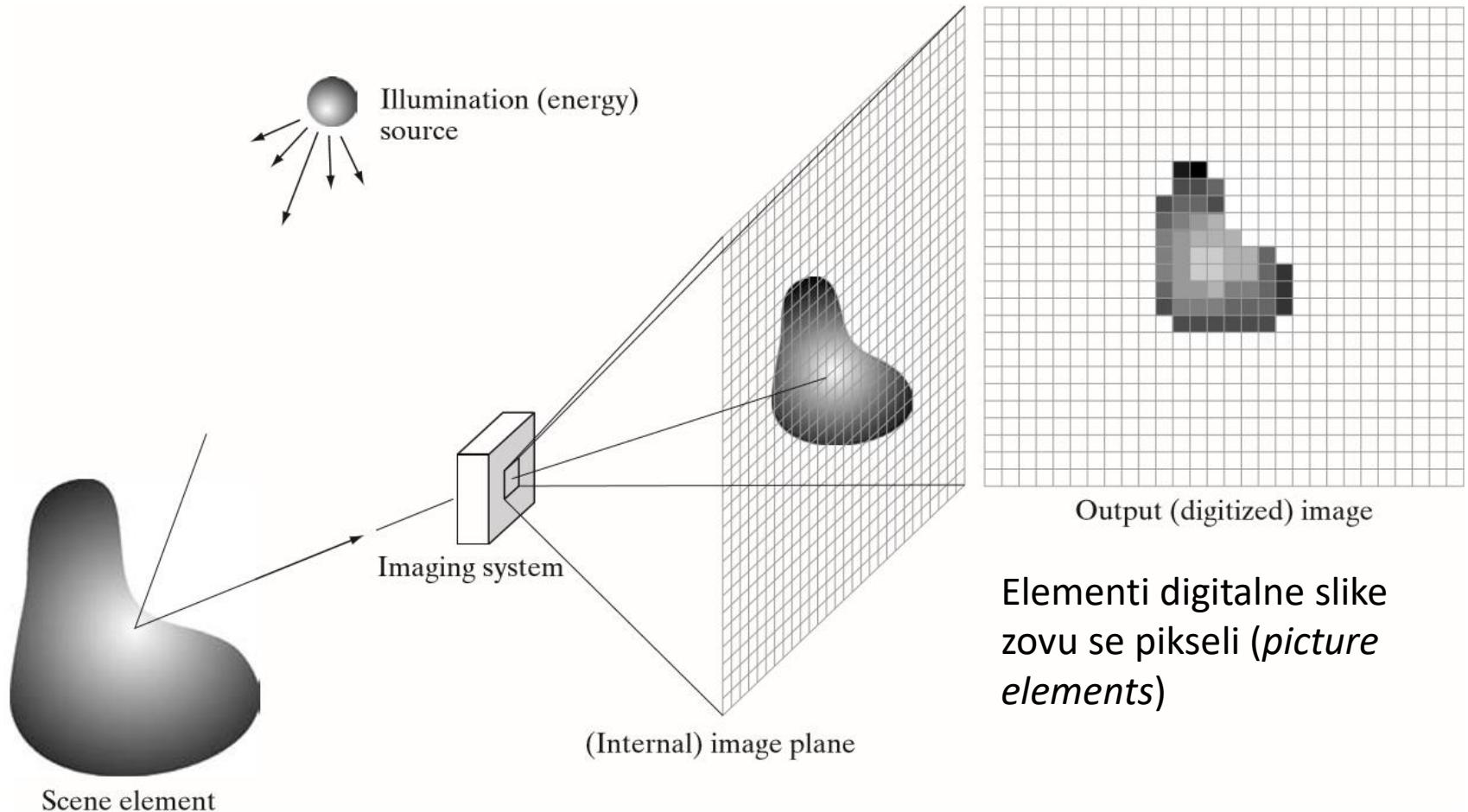


- U slučaju fotografije se koriste jedinjenja srebra koja su osetljiva na svetlo dok istu funkciju obavlja CCD senzor u digitalnom fotoaparatu, odnosno retina u oku
- Senzor veće površine može da primi više svetla i proizvede kvalitetniju fotografiju od senzora manje površine, neovisno o broju piksela na njima
- Veći senzori tada imaju mogućnost za bržu ekspoziciju, sa istom ukupnom količinom svetla koje stigne do senzora

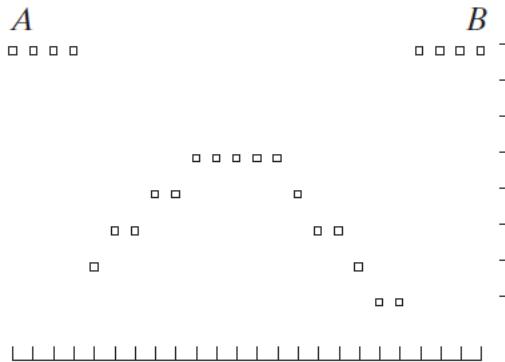
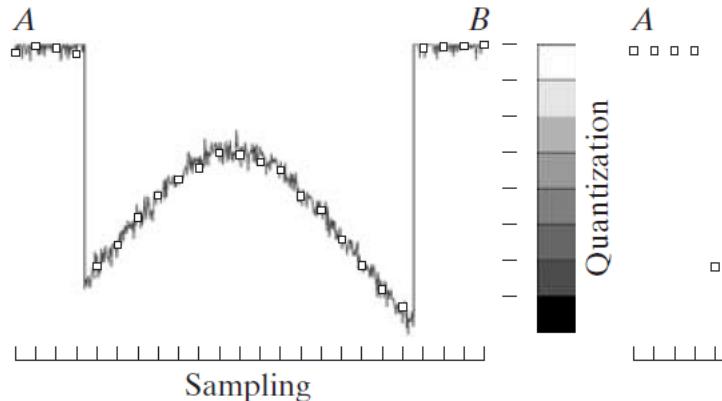
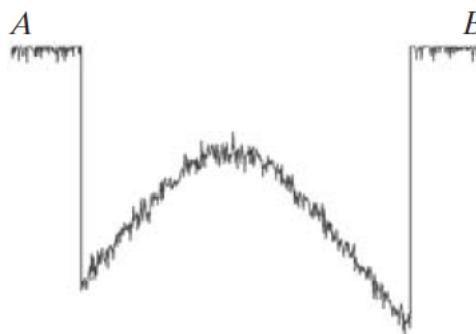
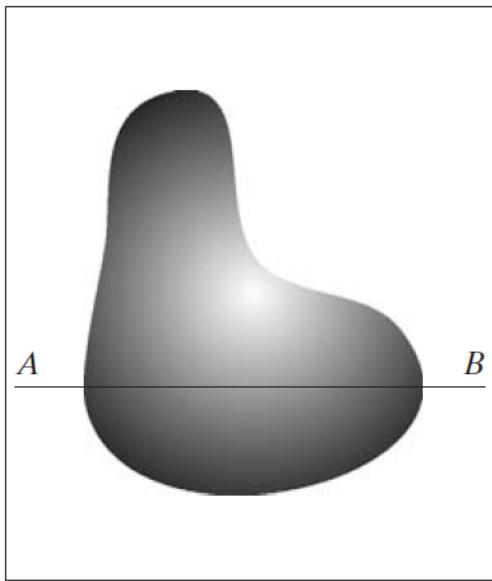
Rasterizovana slika

- U sva tri slučaja (camera obscura, foto aparat ili oko), ovakav proces proizvodi rasterizovanu, diskretizovanu, sliku
 - Kada svetlo prođe kroz fokus, ono pravi refleksiju na nekom foto-senzitivnom materijalu da bi se očitala slika
 - U slučaju retine, rezolucija slike je ograničena brojem i gustinom ćelija na kojima se pravi refleksija
 - U slučaju fotografije, rezolucija zavisi od veličine zrna fotosenzitivnog materijala

Digitalna reprezentacija slike



Uzorkovanje



Dva nivoa diskretizacije:

- Prostorni
- Broj nijansi sive

Na primer,

- 256×256 piksela
- Svaki je reprezentovan sa 8 bitova (može da reprezentuje jedan od 256 mogućih nivoa sive)

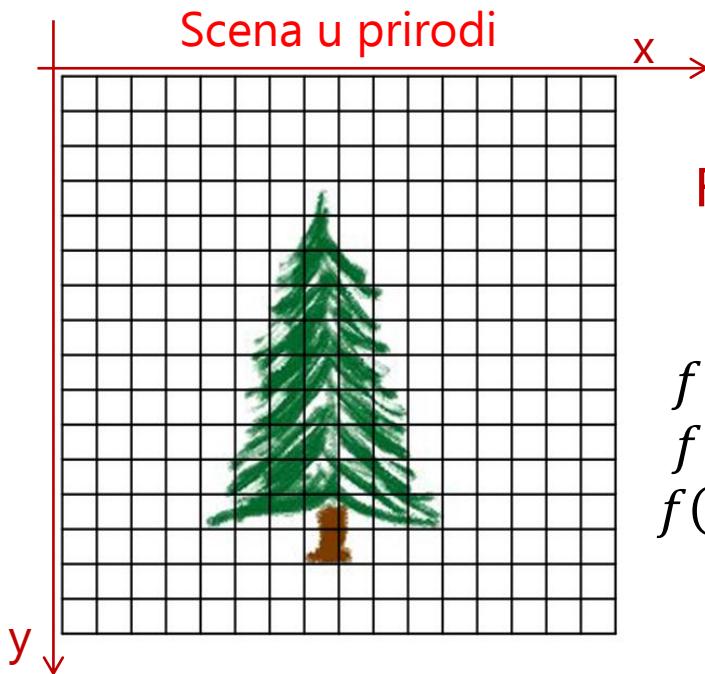
- Oba nivoa diskretizacije su važna za kvalitet slike

Kvantizacija

- Tip vrednosti koji čuva intenzitet svetlosti za svaki piksel je obično uint8 koji daje raspon od 256 vrednosti (8 bita)
 - U nekim situacijama je potrebna veći raspon odnosno detalj vrednosti pa se koristi 16 ili 32 bita
- U specifičnim situacijama kada postoje drastične razlike intenziteta u istoj slici, koristi se floating point za opis boje (interval [0, 1])

Matematički model digitalne slike

- Slika je vizualna reprezentacija funkcije dve prostorne promenljive $f(x, y)$
 - U prirodi je slika kontinualna funkcija
 - Digitalna slika je diskretizovana: funkcija f je definisana samo za neke x i y

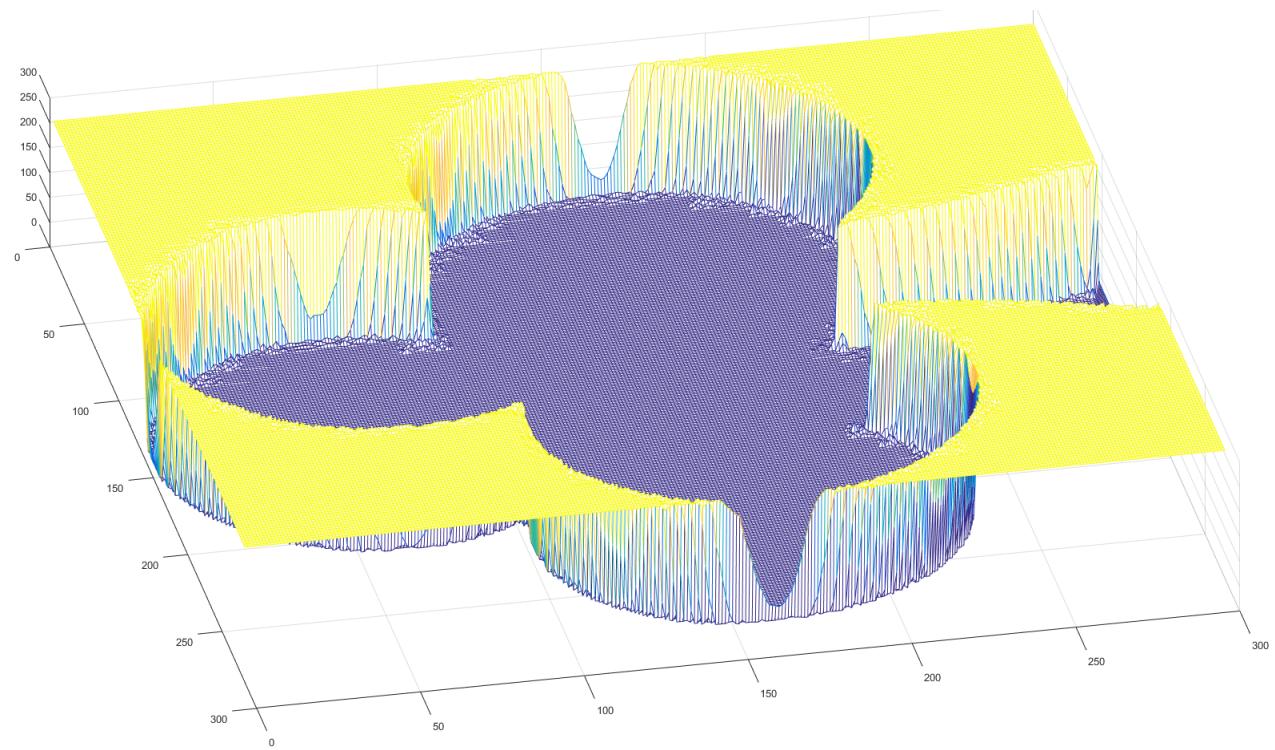
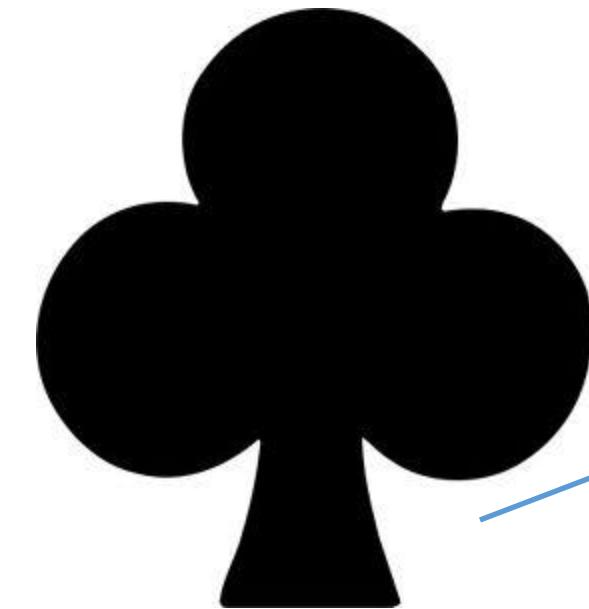


Funkcija $f(x, y)$

$$\begin{aligned}f(0,0) &= 0 \\ f(7,3) &= 1 \\ f(7,13) &= 2\end{aligned}$$

Matrica u memoriji

Matematički model digitalne slike



(Ako koristimo 8-bitnu reprezentaciju)
obično je crna boja 0, a bela 255

Kvalitet digitalne slike – rezolucija

- Kvalitet slike zavisi od prostorne diskretizacije
- Digitalna slika se karakteriše i svojom rezolucijom – proizvod broja piksela u vrsti i koloni. Veća rezolucija znači i bolji kvalitet slike
- Na slici je broj nijansi konstantan, ali menjamo rezoluciju



200x200



100x100



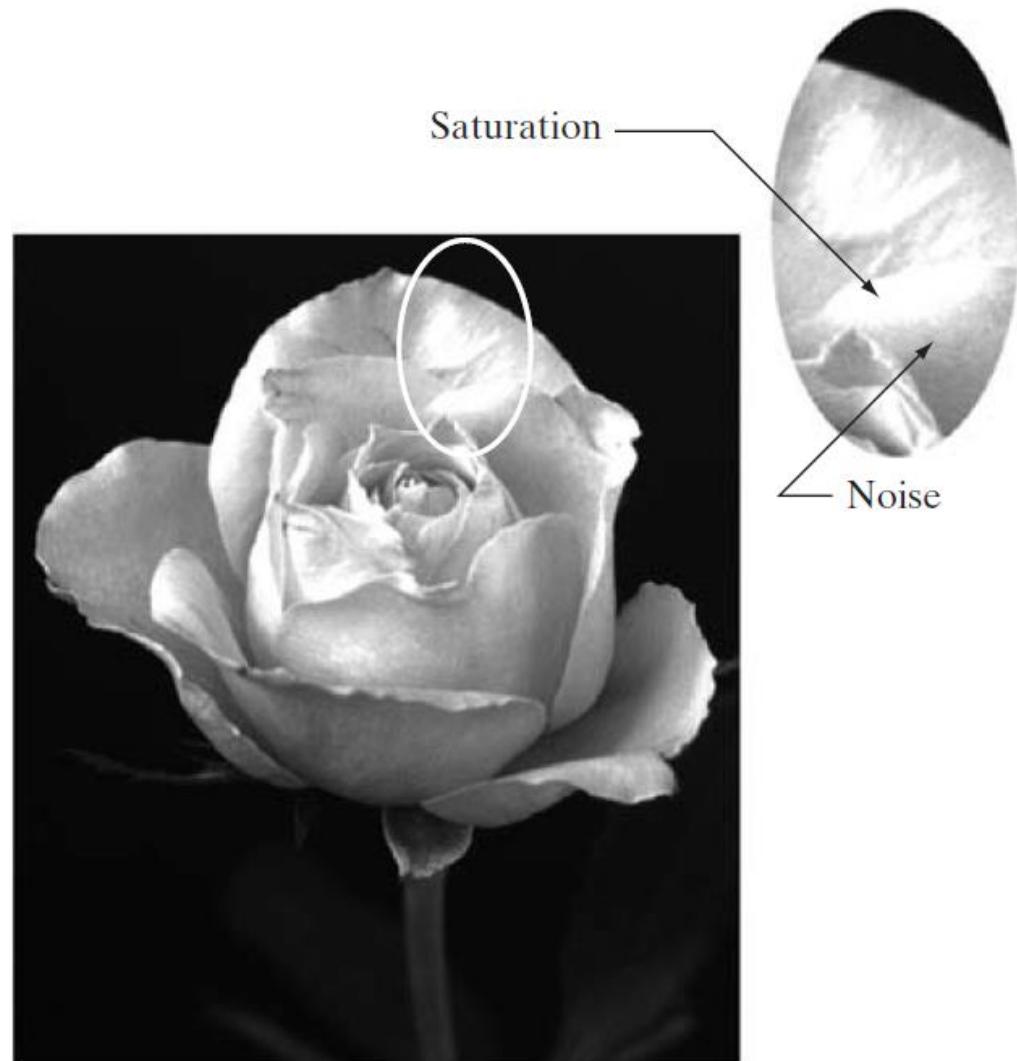
50x50



25x25

Kvalitet digitalne slike – kvantizacija

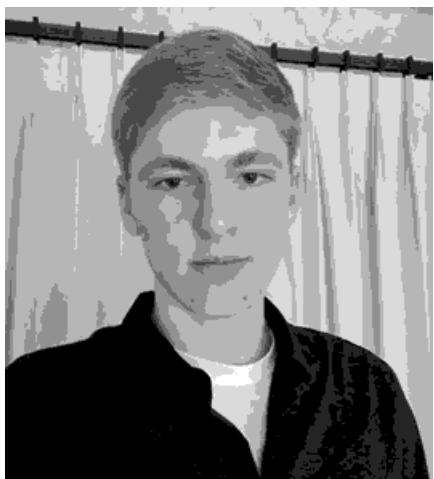
FIGURE 2.19 An image exhibiting saturation and noise. Saturation is the highest value beyond which all intensity levels are clipped (note how the entire saturated area has a high, *constant* intensity level). Noise in this case appears as a grainy texture pattern. Noise, especially in the darker regions of an image (e.g., the stem of the rose) masks the lowest detectable true intensity level.



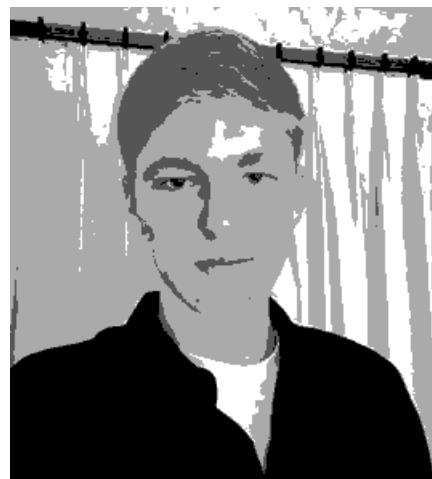
Kvalitet digitalne slike – kvantizacija



8 bit – 256 levels



4 bit – 16 levels



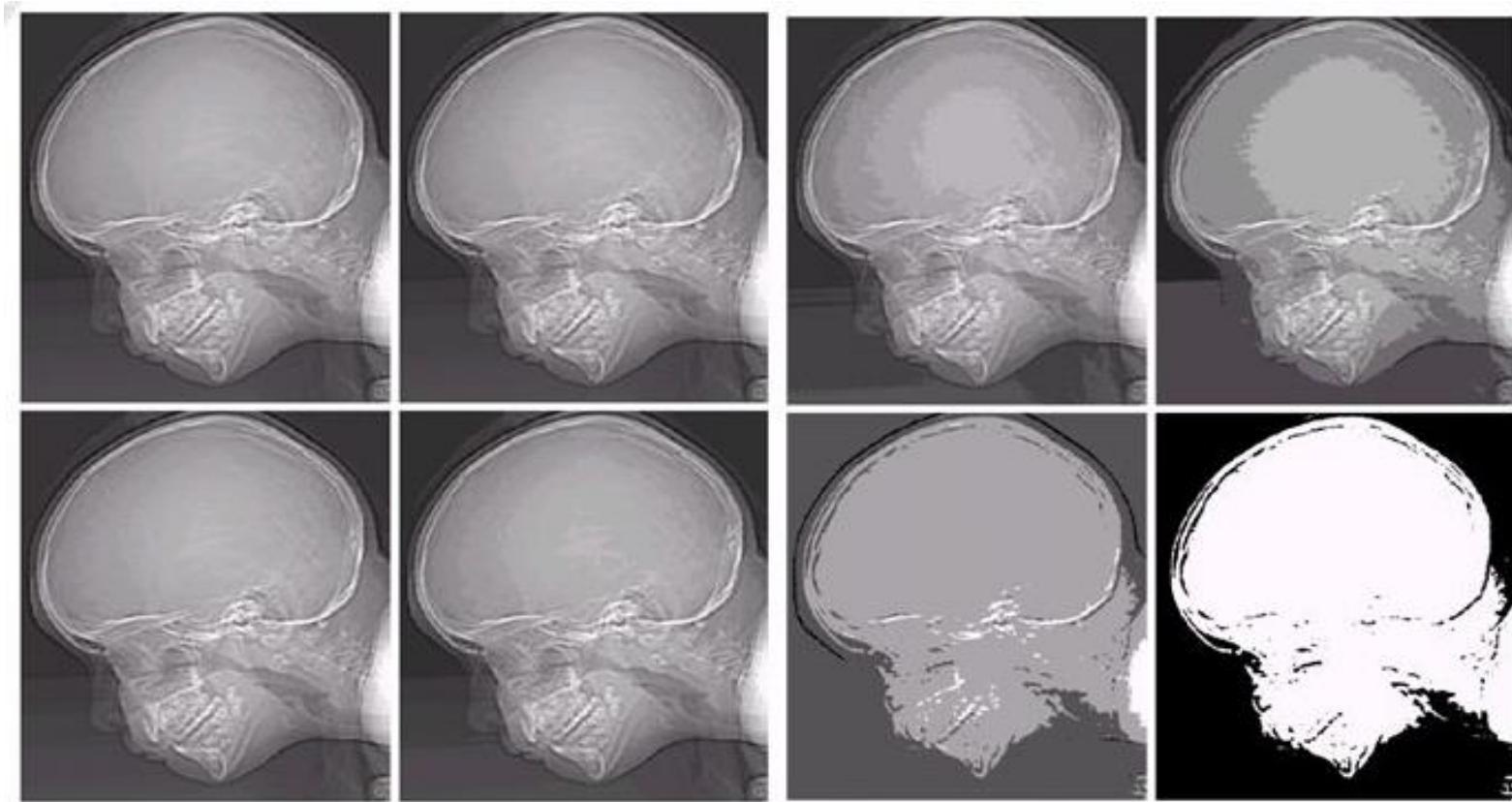
2 bit – 4 levels



1 bit – 2 levels

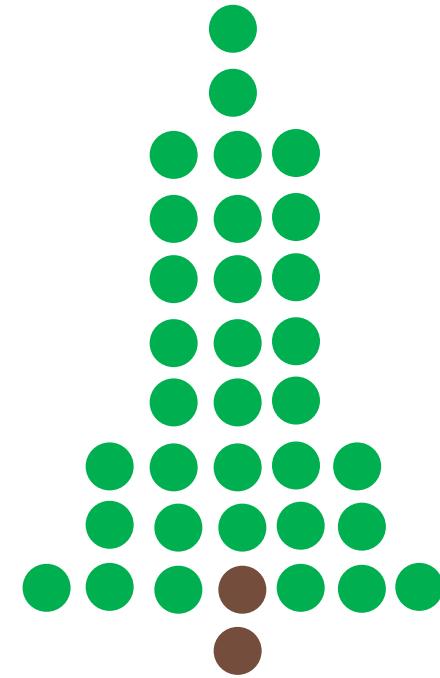
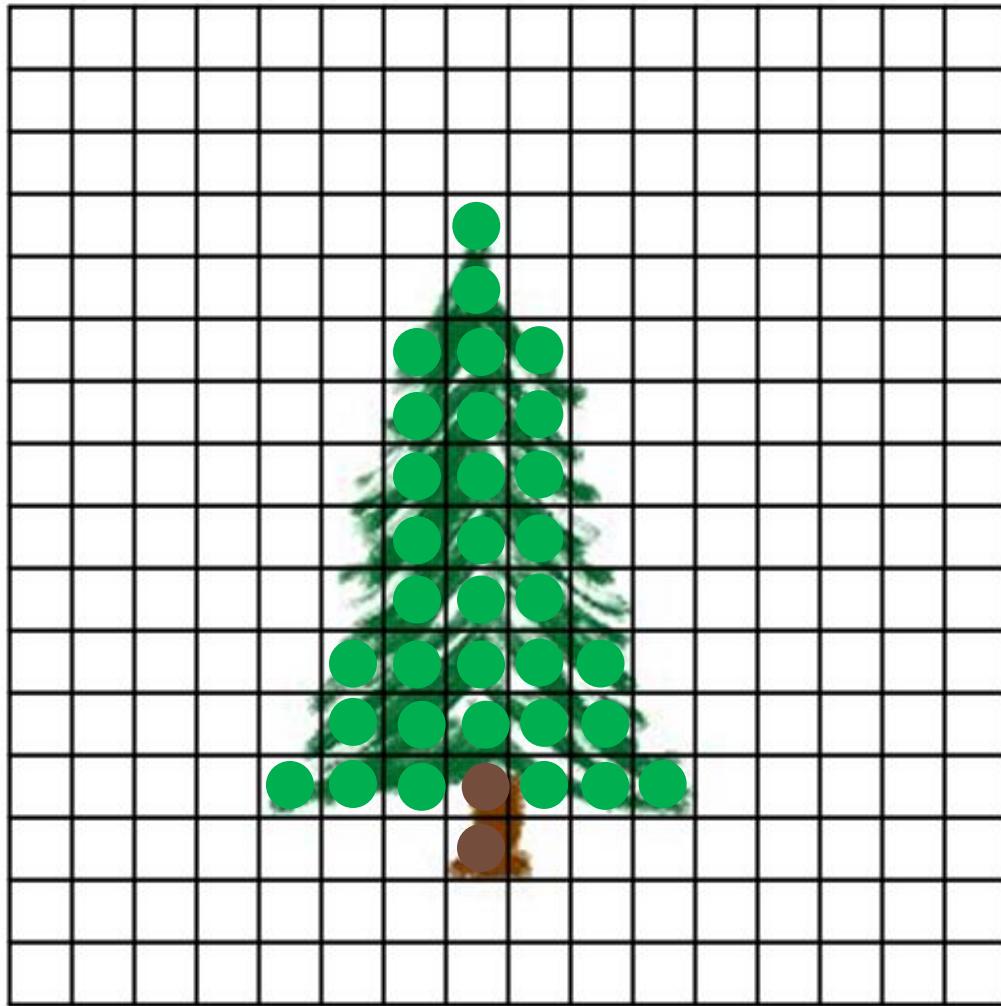
- Rezolucija je konstantna, ali se smanjuje broj nijansi sive
- Javljuju se lažne konture

Kvalitet digitalne slike – kvantizacija



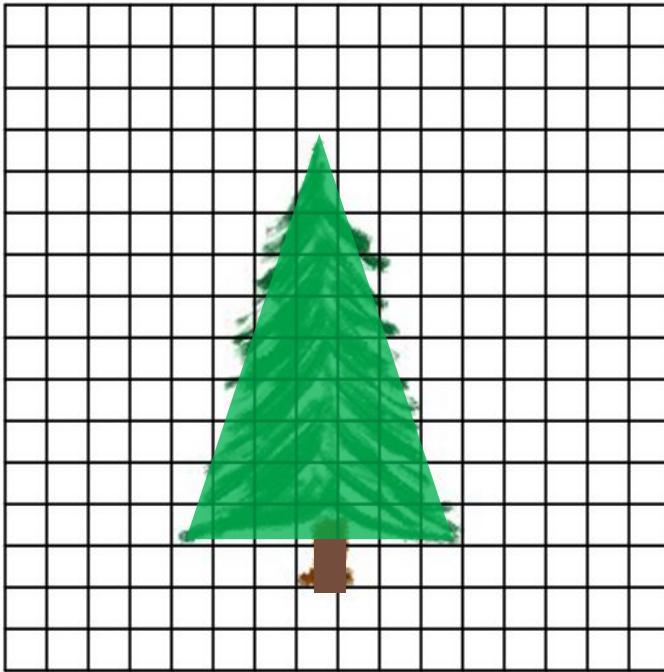
- Rezolucija je konstantna, ali se smanjuje broj nijansi sive
- Javljuju se lažne konture

Digitalna reprezentacija slike

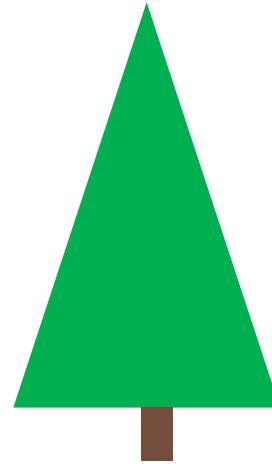


- Raster

Digitalna reprezentacija slike



Vektorski



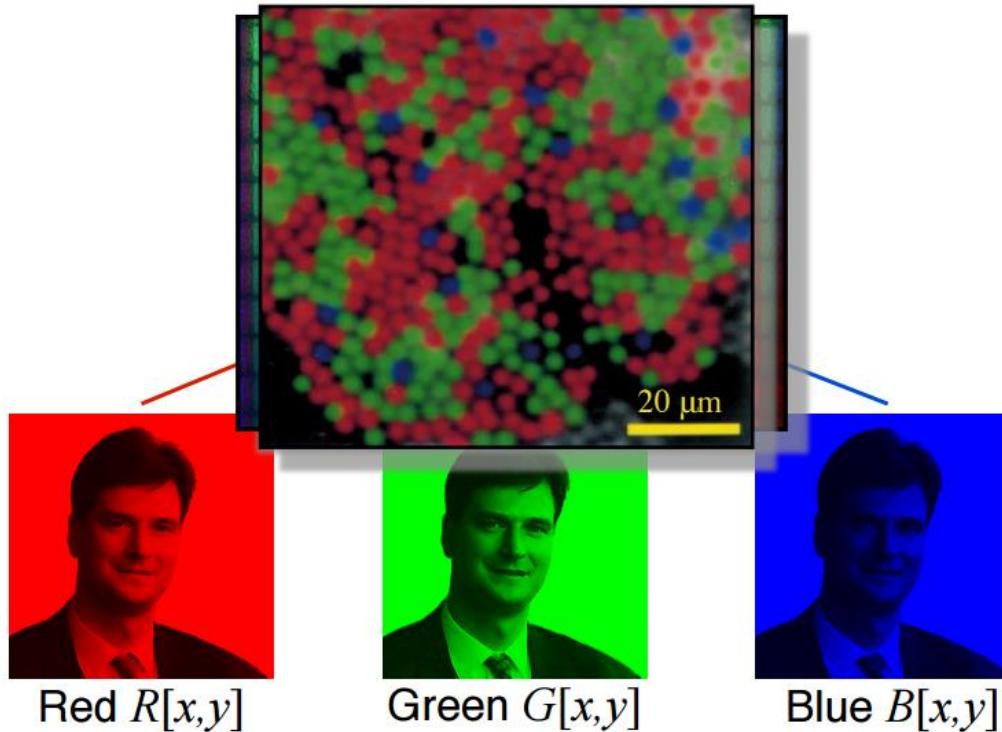
- Alternativa rasterizaciji je vektorizacija refleksije
- Ovde, umesto da podelimo sliku u elemente iste veličine i regularnog rasporeda pokušavamo da dekomponujemo sliku u osnovne geometrijske oblike
- Najveći problemi kod vektorskih slika su biranje osnovnih oblika i način dekompozicije, dok su prednost neograničena rezolucija

Digitalna reprezentacija slike

- Digitalne slike možemo podeliti u odnosu na podatke koji se nalaze u prostornim koordinatama (x, y) (tj. unutar piksela):
 - *Multispektralne slike (multispectral images)*
 - *Slike u nijansama sive (grayscale images)*
 - *Binarne slike (binary images)*

Multispectral Images

- Svaka komponenta boje se zapisuje u svoj kanal
- Za svaki piksel imamo vektor vrednosti intenziteta
- Obično koristimo vektor od tri elementa



Monochrome image



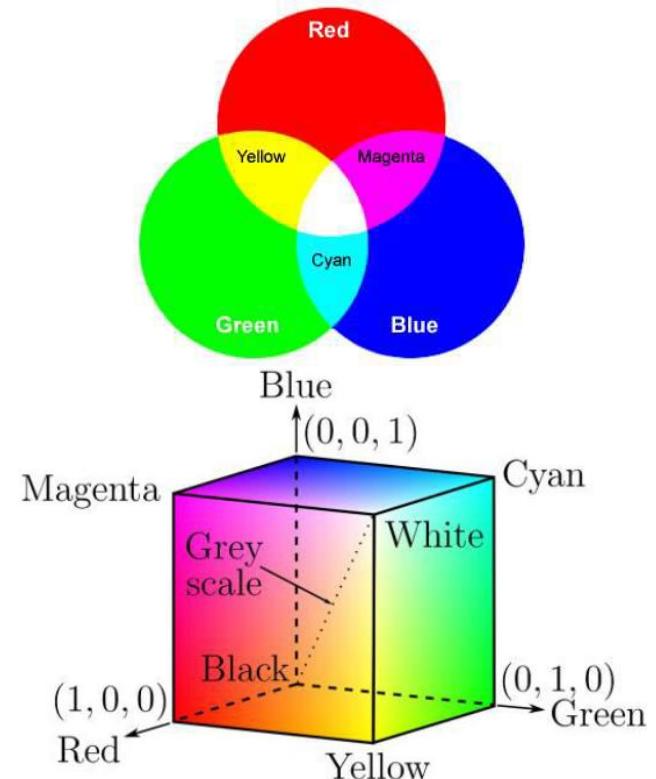
$$R[x,y] = G[x,y] = B[x,y]$$

Modeli boja

- Model boja je matematička apstrakcija kojom se opisuje način na koji se boje mogu predstaviti kao n -torke brojeva
 - Koordinatni sistem u kome svaka tačka predstavlja jednu boju
- Postoje:
 - Aditivni (svetlosni) modeli
 - Suptraktivni (pigmentni modeli)

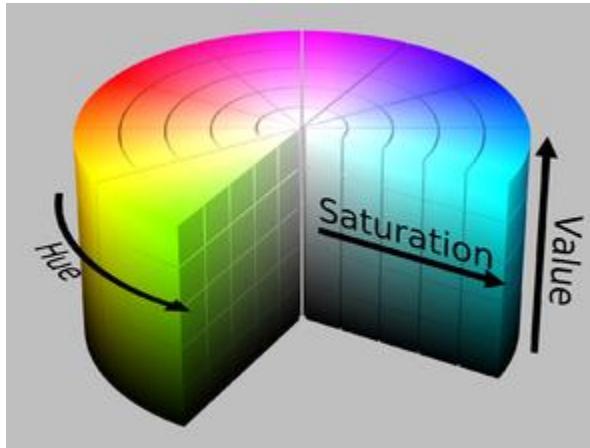
Aditivni (svetlosni) modeli – RGB

- Boju doživljavamo kao energiju svetlosnog izvora
 - Ako se aktiviraju dva izvora svetlosti, na primer, crvena i zelena, signali se sabiraju i mozak to interpretira kao žutu svetlost
 - Maksimalni nadražaj svih ćelija stvara efekat bele svetlosti
-
- Predstavnik aditivnog modela je RGB (*Red, Green, Blue*)
 - Ove tri vrednosti određuju koordinate u 3D prostoru
 - Ponekad se dodaje i jedan kanal za providnost *alpha*



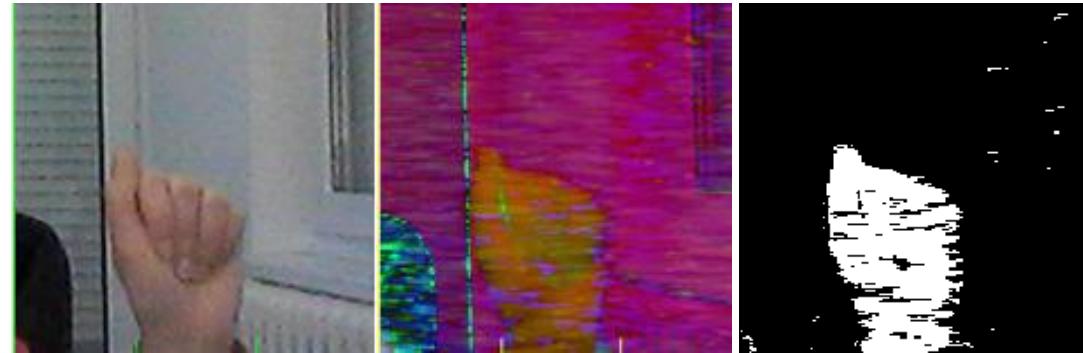
Hue Saturation Value (HSV) model

- Bazira se na ljudskom mentalnom modelu



- Umesto tri vrednosti za osnovne boje, čuvamo:
 - *Hue*: ugao mereno od vertikale (izbor boje, 0° crvena, 120° zelena, 240° plava)
 - *Saturation*: količina sive u boji 0% -100%
 - *Value (brightness)*: nijanse sive (0% - 100%)

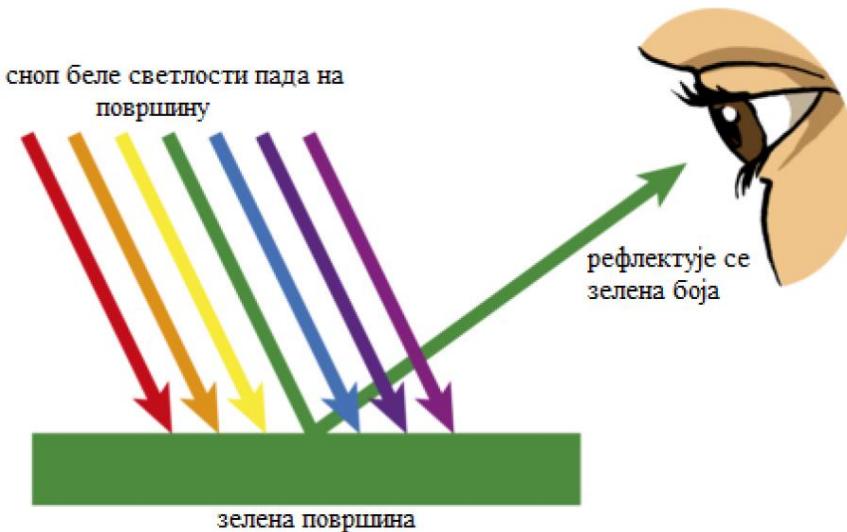
Ova reprezentacija je posebno zgodna kada želimo da segmentišemo sliku na osnovu boja, gde je intenzitet svetlosti manje bitan



Izdvajanje šake od pozadine (koriste se pragovi za prepoznavanje boje kože)

Suptraktivni (pigmentni) modeli

- Bazira se na činjenici da je boja objekta energija svetlosti koja se reflektovala o datim objekatima
 - Npr., ako se boja objekta doživljava kao zelena, to znači da je površina objekta apsorbovala fotone svih talasnih dužina, osim onih koji odgovaraju zelenoj boji
- Slike na platnu se formiraju tako što se na platno nanosi pigment – sa svakom bojom se *oduzima* neka komponenta iz reflektovanog dela spektra i tako se formira doživljaj boje
- Predstavnik: CMY/CMYK



Grayscale Images

- Monohromatske slike sa jednom vrednošću intenziteta za svaki piksel
- Npr. sa 256 nijansi sive reprezentujemo nivo osvetljenja



RGB to Grayscale

1. Srednja vrednost *RGB* komponenti:

$$Y = \frac{(R + G + B)}{3}$$



RGB to Grayscale

2. Metod perceptivne osvetljenosti:

$$Y = 0.229 \cdot R + 0.578 \cdot G + 0.114 \cdot B$$

- Ljudska percepција боја nije direktno proporcionalna intenzitetu svetlosti određene talasne dužine
- To je zato što se broj ćelija osetljivih na određene talasne dužine razlikuje (60% zelena boja, 30% crvena, 10% plava)



Binarne slike (*binary images*)

- Slike koje za vrednosti piksela imaju samo vrednosti 0 ili 1
- U binarnoj slici često izdvajamo ono što nam je bitno (*foreground*), od ono što nam je nebitno (*background*)
- Formalnije, ovaj postupak izdvajanja bitnog od nebitnog na slici nazivamo segmentacija



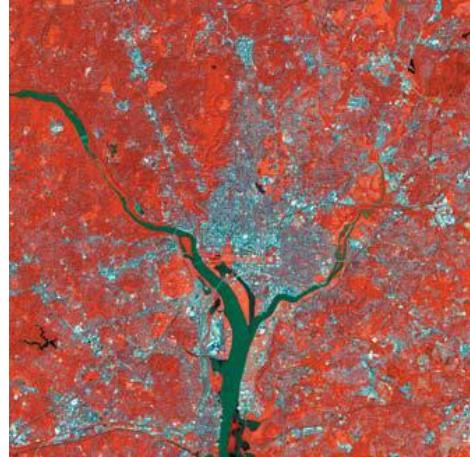
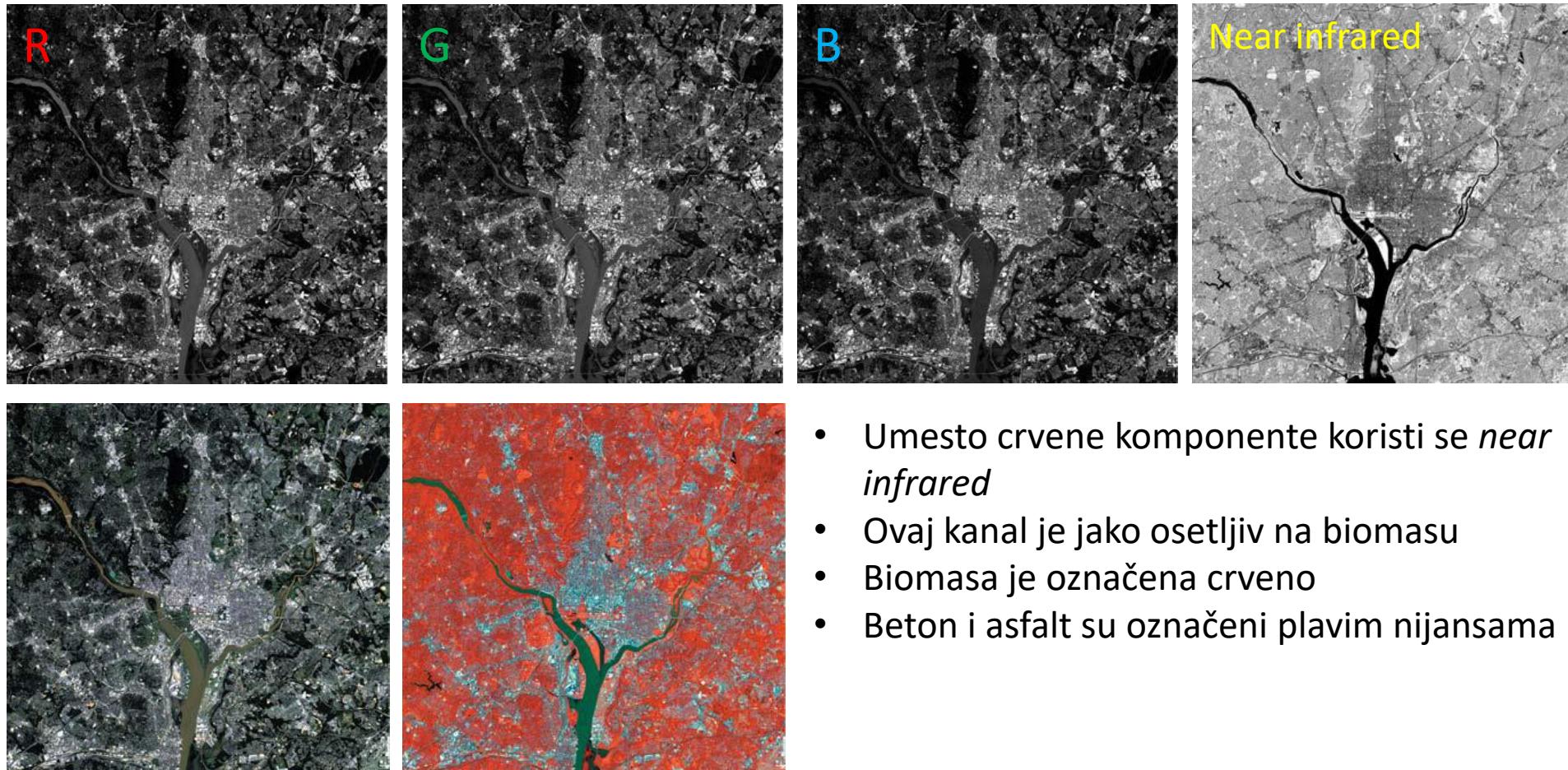
Video

- Za multispektralne slike, jedna slika se reprezentuje putem tri matrice: *red, green, blue*
- U videou imamo više frejmova (slike)
 - Na primer, za jednu sekundu videa možemo imati 30 frejmova (30×3 matrice)
 - Svaka matrica može biti, na primer rezolucije 512×512 , gde je svaki piksel reprezentovan sa 8 bitova

Pseudo-Coloring

- *Grayscale* sliku pretvaramo u multispektralnu
 - Cilj *pseudo-coloring (false coloring)* je dodeljivanje boje pikselima sačuvanim u nijansama sive
- Primarni cilj je ljudska vizuelizacija i interpretacija
 - Obojiti normalne objekte u „neobičnu“ boju radi isticanja
 - Obojiti normalnu scenu da odgovara ljudskoj osetljivosti na boje
 - Eksploracija na osetljivost u kontrastu
 - Proizvodnja reprezentacije scene u prirodnim bojama
 - Slike koje nisu formirane u vidljivom delu spektra (npr. infracrveno i ultravioletno zračenje)
 - Kolorizacija crno-belih slika i videa
 - Ideja je da se reprodukuju stvarne boje u situacijama kada smo mogli da snimamo samo crno-bele slike

Satellite images of Washington



- Umesto crvene komponente koristi se *near infrared*
- Ovaj kanal je jako osetljiv na biomasu
- Biomasa je označena crveno
- Beton i asfalt su označeni plavim nijansama

Full color (RGB)

Thematic bands (NASA's LANDSAT satellite)

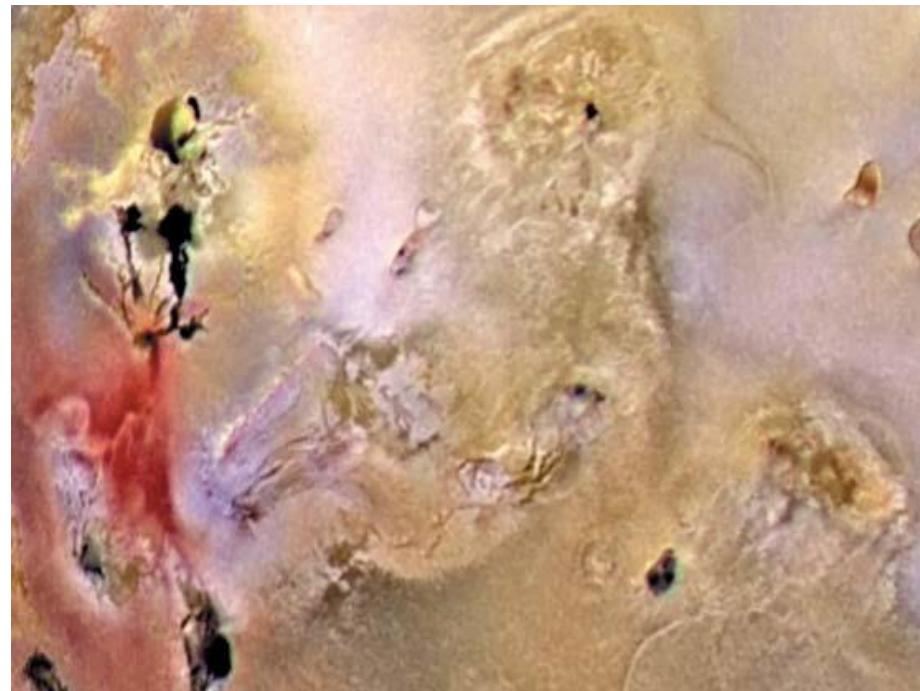
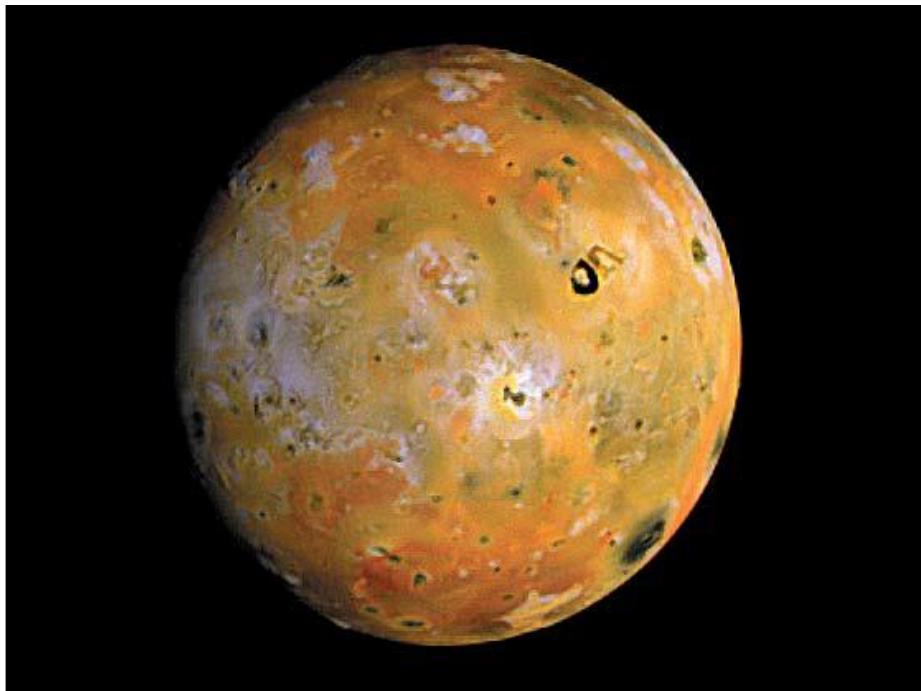
TABLE 1.1
Thematic bands
in NASA's
LANDSAT
satellite.

Band No.	Name	Wavelength (μm)	Characteristics and Uses
1	Visible blue	0.45–0.52	Maximum water penetration
2	Visible green	0.52–0.60	Good for measuring plant vigor
3	Visible red	0.63–0.69	Vegetation discrimination
4	Near infrared	0.76–0.90	Biomass and shoreline mapping
5	Middle infrared	1.55–1.75	Moisture content of soil and vegetation
6	Thermal infrared	10.4–12.5	Soil moisture; thermal mapping
7	Middle infrared	2.08–2.35	Mineral mapping

- Cilj satelita je da snimi i na zemlju pošalje slike zemlje zarad posmatranja uslova životne sredine na zemlji

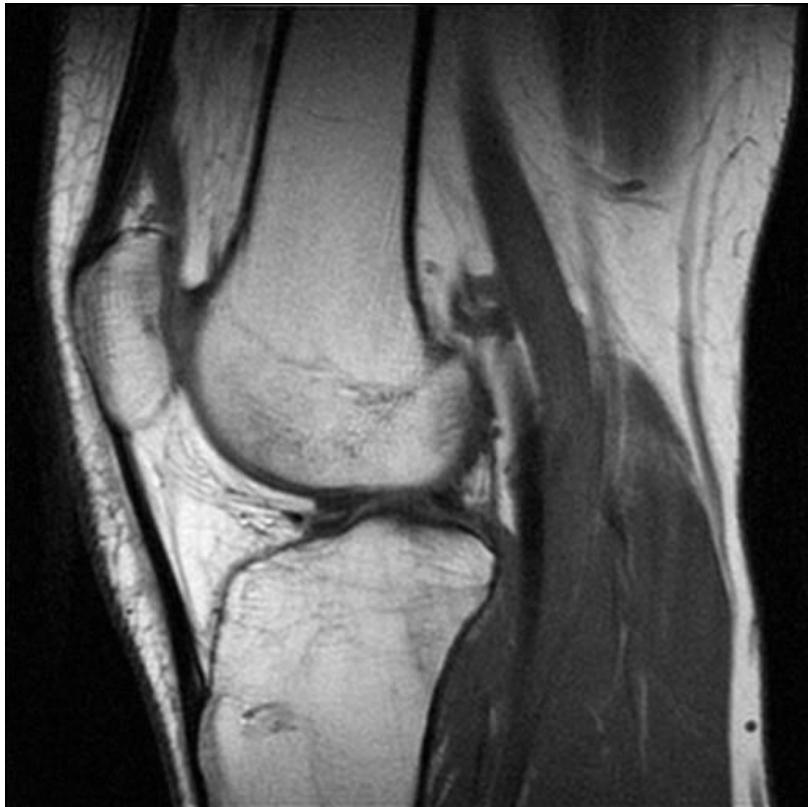
Geissbuehler, M. and Lasser, T., 2013. How to display data by color schemes compatible with red-green color perception deficiencies. *Optics express*, 21(8), pp.9862-9874.

Jupiterova mesec Io

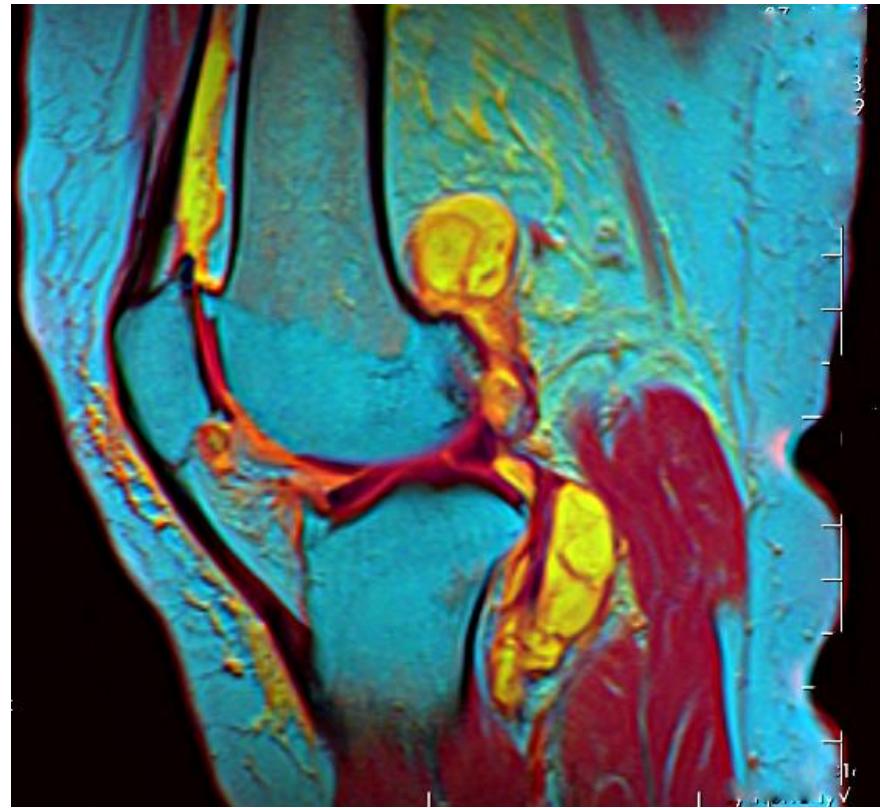


- Levo: boje dobijene kombinovanjem slika dobijenih pomoću različitih senzora od kojih su neki iz spektara nevidljivih ljudskom oku
- Ako razumemo fizičke i hemijske procese koji imaju uticaj na različite senzore, možemo praviti informativne *pseudocolor* mape
- Recimo, možemo prikazati razlike u hemijskom sastavu površine
- Npr. na slici desno, crveno označava materijal izbačen iz aktivnog vulkana, dok su žutom nijansom predstavljeni starije sumporne naslage

Medicina



grayscale MRI kolena – različite nijanse sive predstavljaju različita tkiva. Potrebno je trenirano oko za njihovo razlikovanje



Pseudo-objedna slika dobijena od tri *grayscale* slike omogućava lakše razlikovanje tkiva

Kolorizacija



Druet, Nov. 1913

Henri Matisse, *Bathers by a River*

March–May 1909, fall 1909–spring 1910, May–November 1913, early spring–November 1916, January–October (?) 1917.

- Slika se smatra jednom od najlepših iz Matisove karijere
- Radio je na njoj gotovo 9 godina
- U novembru 1913 Matis je organizovao njeno fotografisanje kako bi sačuvao njeno trenutno stanje. Nakon fotografije, radio je na slici još 4 godine pa je fotografija dosta drugačija od trenutnog stanja slike

Kolorizacija

- Voleli bismo da reprodukujemo informaciju o boji slike, kao da nam je tada bila na raspolaganju kamera u boji
- Potrebni su nam pikseli čija je boja poznata (*scribbles*)
 - Propagiraćemo njihovu boju na ostatak piksela na slici
 - Da bismo ih pronašli, gledamo korelaciju slike u sadašnjem stanju i fotografije

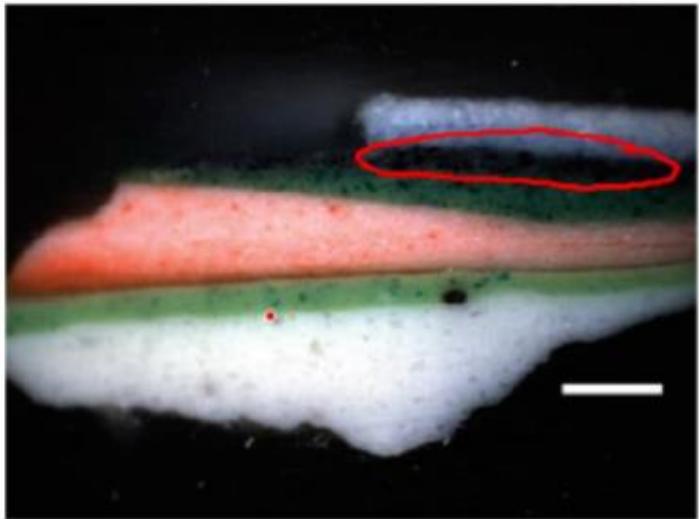


Najveća korelacija – preuzećemo
boje sa trenutne slike



Rezultujući *scribbles*

Kolorizacija



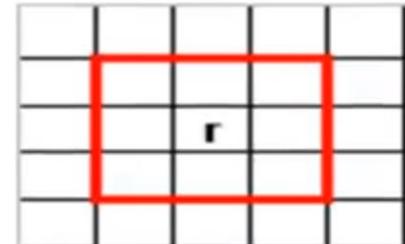
- Probušene su i mikroskopske rupe na slici
- Kako je Matis skidao i dodavao boje tokom devet godina, nije najjasnije koji sloj odgovara kojoj godini
- Međutim, pretpostavlja se da je sivi sloj zaokružen na slici iz 1913 godine kada je fotografija nastala

Algoritam kolorizacije

- Promene u boji odgovaraju promeni u intenzitetu
 - Ako dva piksela imaju sličan intenzitet, onda imaju i sličnu boju
- Napravićemo otežinjenu šemu: dodeliti boju pikselu na osnovu boje susednih piksela koji su sličnog intenziteta
- YUV model boja (U - intenzitet)

$$J(U) = \sum_r \left(U(r) - \sum_{s \in \mathcal{N}(r)} w_{rs} U(s) \right)^2$$

$$w_{rs} \propto e^{-(Y(r)-Y(s))^2/2\sigma_r^2}$$



Rezultat



Druet, Nov. 1913



Colorized Druet

- Rezultati su konzistentni sa time kako je u istoriji opisano da je slika izgledala u tom periodu
- Prikazuje kako je Matis krenuo od obojene, prirodnije scene ali ju je promenio kako bi istražio nove pravce i reflektovao težu atmosferu koja je vladala usled Prvog svetskog rata
- Obojena verzija je pomogla istoričarima da vizualizuju proces Matisovog stvaranja i da identifikuju ostale radove umetnika koji reflektuju isti proces