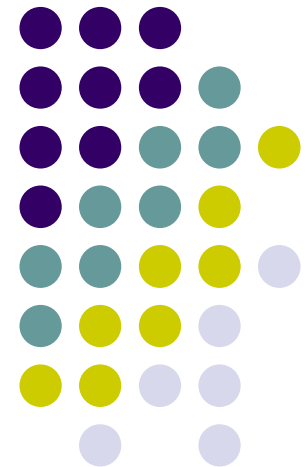


# Temelji digitalne obrade slika

---

Sven Lončarić  
<http://www.fer.hr/predmet/obrinf>





# Pregled tema

- Elementi vizualne percepcije
- Čovjekov vizualni sustav
- Svjetlo i elektromagnetski spektar
- Osnove digitalne geometrije



# Vizualna percepcija

- Čovjek nesvjesno obavlja vrlo komplicirane procese percepcije slike
- Na koji način se ti kognitivni procesi odvijaju?
- Odgovor na ovo pitanje omogućio bi:
  - Razvoj umjetnih sustava za vid (tehnika - računalni vid)
  - Liječenje zdravstvenih problema



# Definicija vizualne percepcije

- Vizualna percepcija je proces zaključivanja o objektima i događajima u okolini na temelju slika scena
- Slike scena su dobivene snimanjem svjetla koje objekti emitiraju ili koje je reflektirano od objekata u sceni

# Orijentacija prema vanjskom svijetu



- Vizualna percepcija je temeljena na:
  - Slici scene (koju vidimo)
  - A priori znanju o objektima u scenama
  - O subjektivnom iskustvu promatrača



# Obrada informacija

- Važan aspekt vizualne percepcije je da je to proces obrade informacija:
  - Ekstrakcija značajki iz slika
  - Obrada i analiza informacija na temelju značajki



# Važnost vizualne percepcije

- U evoluciji vrsta vizualna percepcija je važna jer povećava šanse za opstanak
  - Traženje hrane
  - Traženje zakloništa
  - Traženje partnera za reprodukciju
  - Izbjegavanje opasnih situacija i predatora
- Sva osjetila doprinose tim ciljevima ali kod čovjeka vid je najvažniji

# Svojstva sustava za vizualnu percepciju



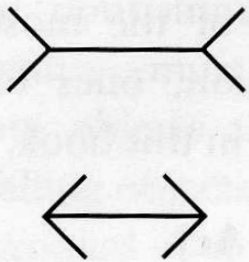
- Sustav za vizualnu percepciju kod čovjeka je vrlo složen
- U pojedinim situacijama ne dobivamo točan rezultat percepcije
- Vizualne iluzije pokazuju da sustav vizualne percepcije nije savršen
- Vizualne iluzije mogu pomoći kod razumijevanja načina rada vizualnog sustava



# Vizualne iluzije

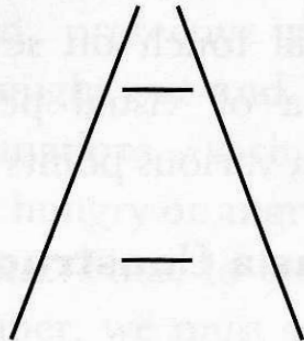


Which horizontal line is longer?



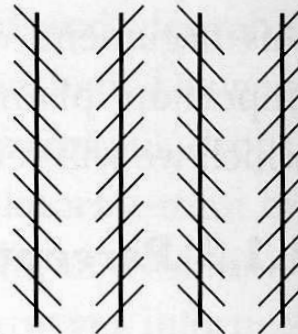
A

Which horizontal line is longer?



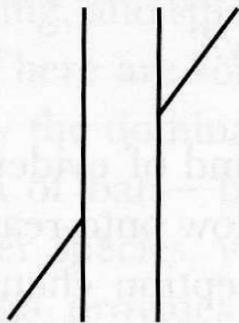
B

Are the long lines parallel or tilted?



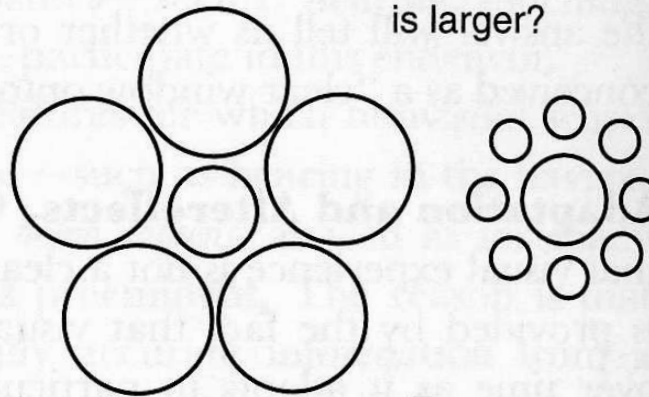
C

Do the diagonal lines line up or not?



D

Which central circle is larger?

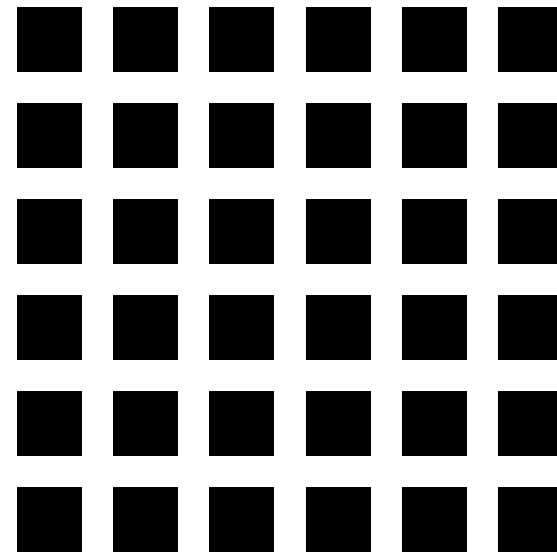
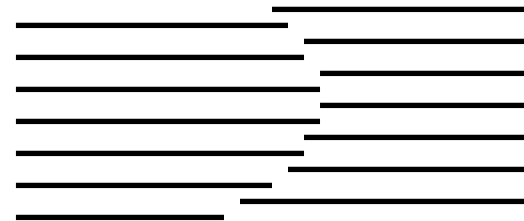


E

- Pokazuju da je rezultat percepcije osim slikom temeljen i na radu našeg vizualnog sustava koji nekad griješi

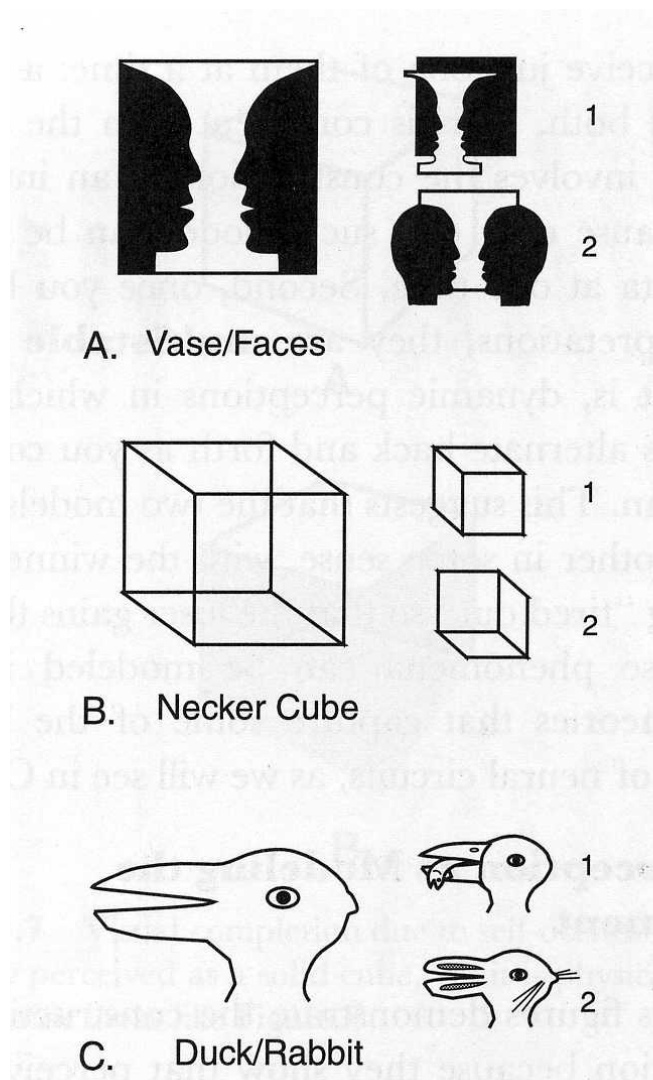
# Vizualne iluzije

- Subjektivne konture
- Hermann-ov raster





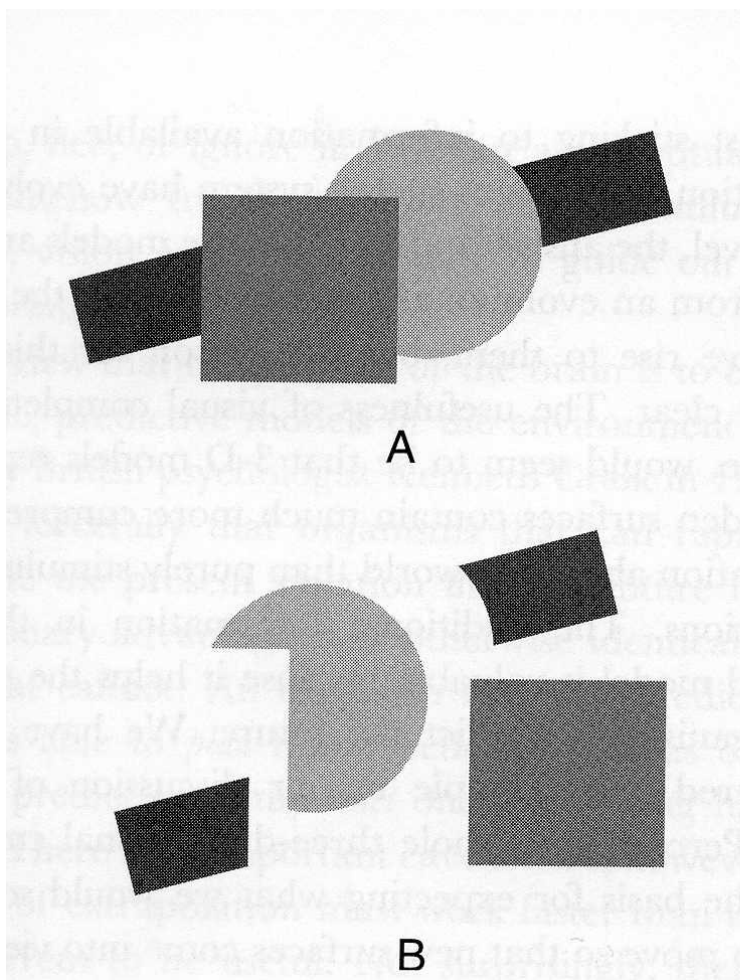
# Neodređeni objekti



- Jedna slika može biti temelj za više različitih percepcija
- Percepcije su međusobno isključive (samo jedna se može percepirati u jednom trenu)



# Percepcija kao modeliranje

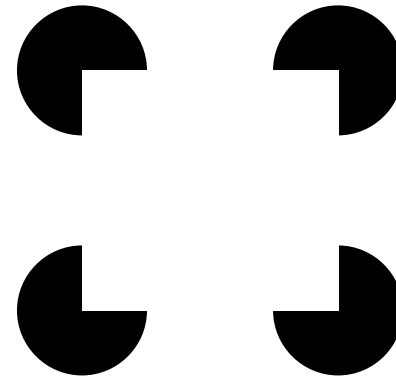


- Naučeni modeli okoline pomažu nam u analizi scene
- Dokaz – efekt vizualnog “dopunjavanja” objekata
- Vidimo kvadrat krug i pravokutnik iako vidimo samo elemente iz B

# Percepcija kao modeliranje

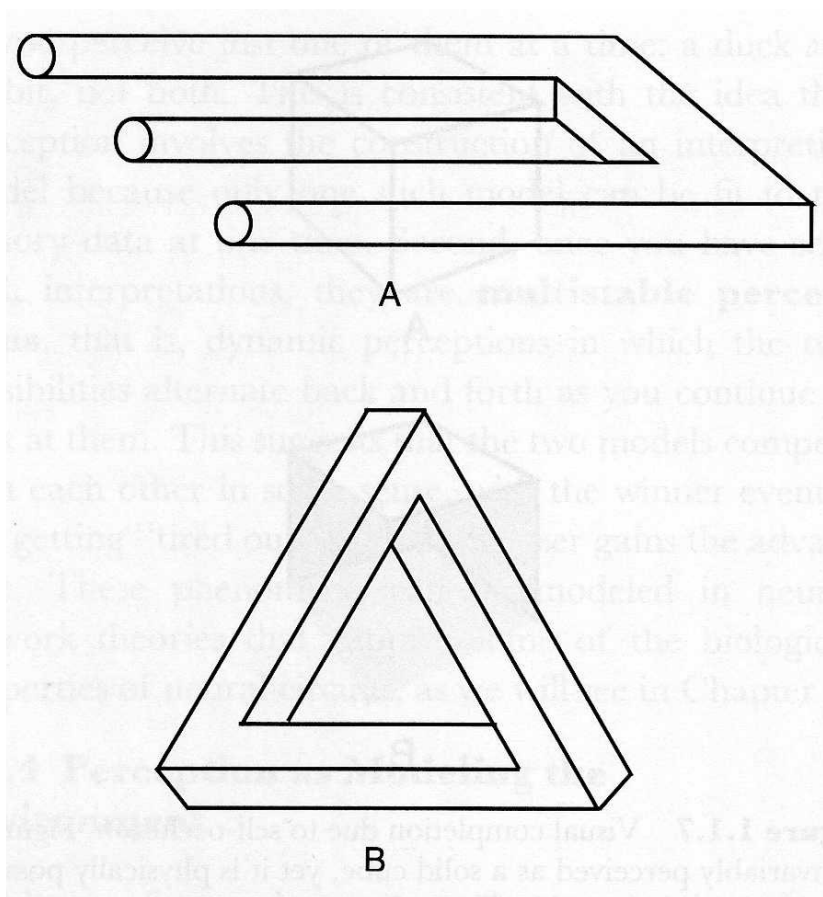


- Čovjekov vizualni sustav nadopunjava nepostojeću informaciju na temelju a priori znanja o objektima



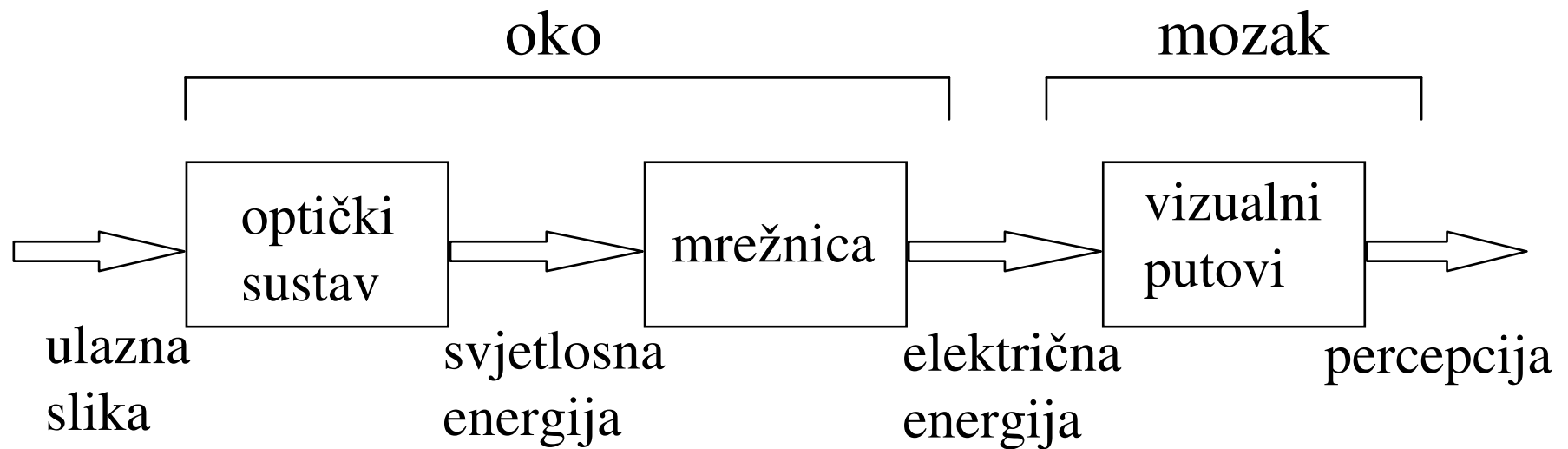


# Nemogući objekti

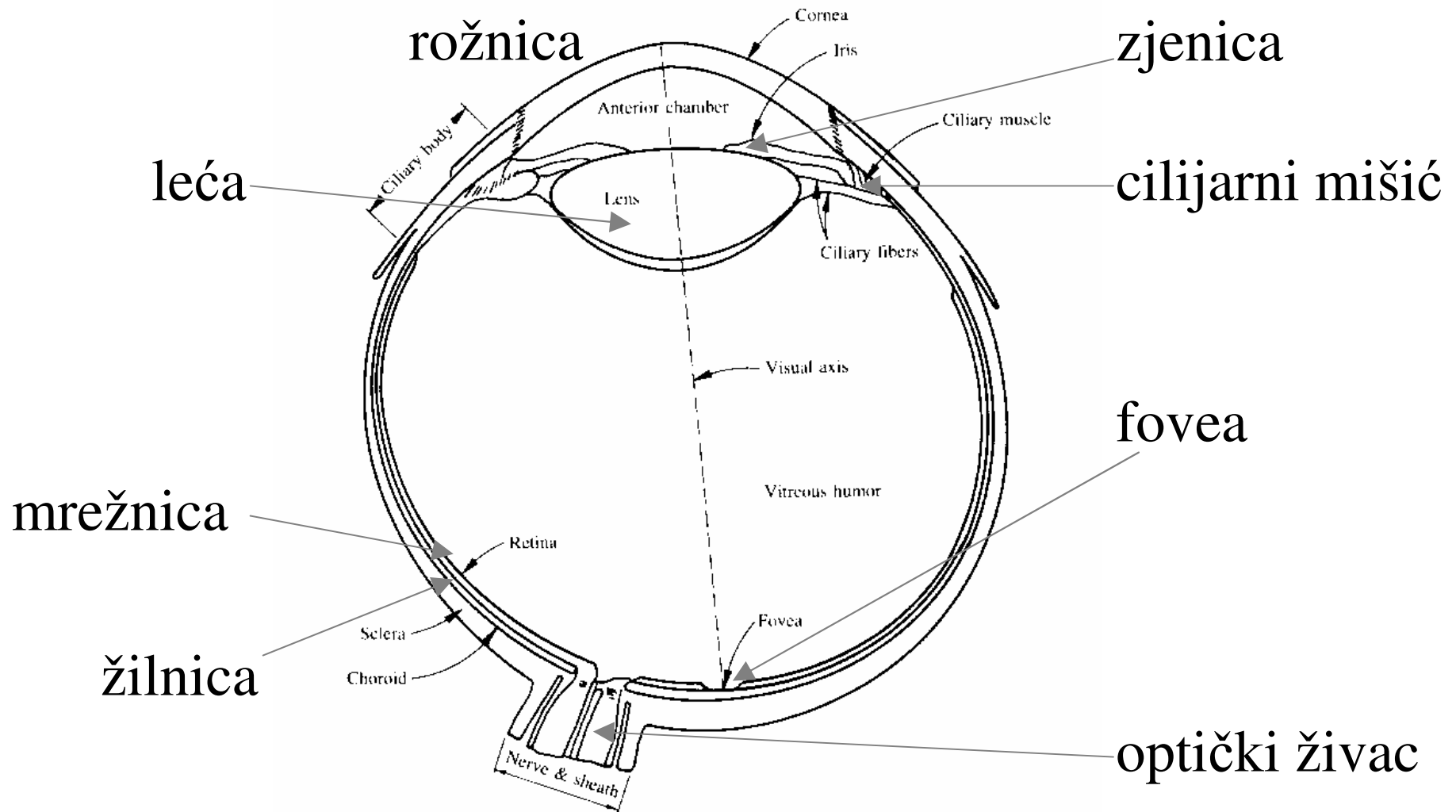


- Modeli nam pomažu da iz ovih slika inicijalno prepoznamo regularne 3D objekte, no objekti nisu fizikalno mogući

# Model ljudskog vizualnog sustava



# Struktura ljudskog oka I







# Struktura ljudskog oka II

- promjer 20 mm
- rožnica štiti prednji (vanjski) dio oka
- žilnica je unutarnja membrana sa mrežom krvnih žila koje hrane oko; crno pigmentirana (melanin) da smanji količinu raspršenih zraka unutar oka
- zjenica regulira količinu svjetla (dubinsku oštrinu)
- cilijarni mišić mijenja geometriju leće (dioptriju)
- mrežnica je na stražnjem dijelu oka i sadrži fotoosjetljive receptore (štapiće i čunjiće)



## Mrežnica: čunjići

- čunjića ima oko 6-7 miliona
- nalaze se na središnjoj poziciji mrežnice (žuta pjega, fovea), promjer 1.5 mm
- čunjići su osjetljivi na boju
- svaki je povezan na svoj vlastiti živac
- omogućuju oštru i detaljnu sliku na jakom svjetlu
- engl. photopic ili bright-light vision



## Mrežnica: štapići

- štapića ima puno više: 75-150 miliona
- štapići su raspršeni periferarno (izvan fovee)
- nekoliko štapića je povezano na jedan živac što smanjuje oštrinu vida
- daju generalnu, široku sliku scene
- nisu osjetljivi na boju i služe pri slabom svjetlu
- engl. scotopic ili dim-light vision
- zato se pri slabom svjetlu ne raspoznaju boje

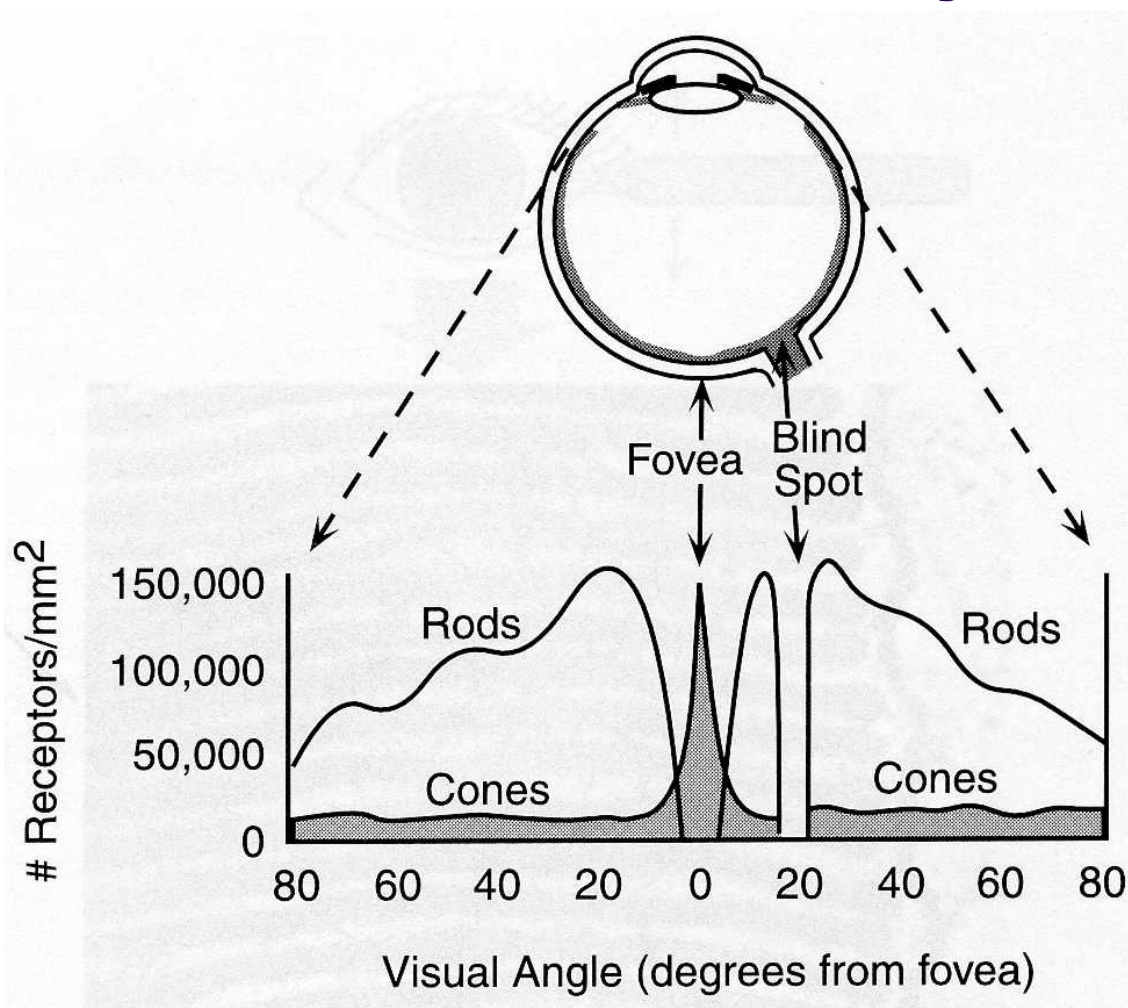


## Mrežnica: periferija

- dio mrežnice izvan žute pjege
- zauzima 97.25 % površine mrežnice
- pokriven najvećim djelom sa štapićima
- čunjići su raspoređeni heksagonalno
- štapići popunjavaju prostor između čunjića
- gustoća (frekvencija otipkavanja) je najveća kod žute pjege, opada na periferiji



# Prostorna distribucija receptora

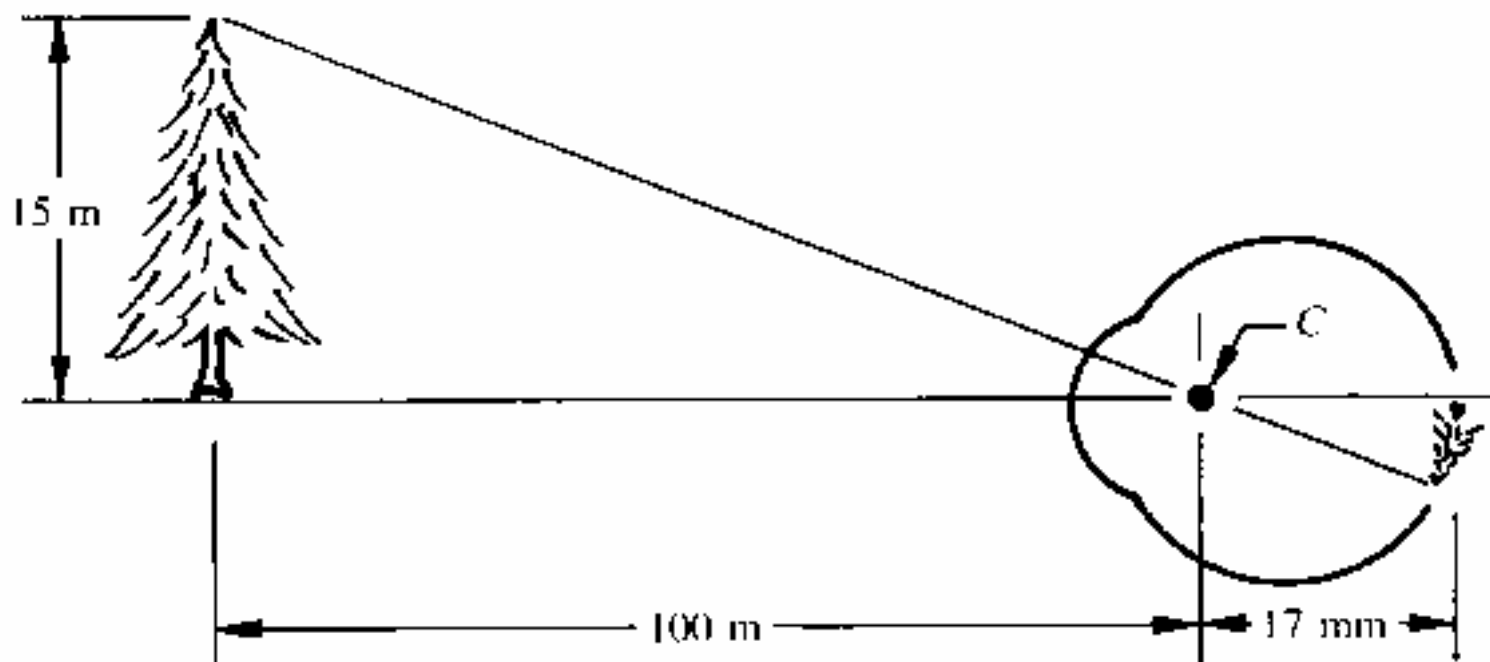


- Distribucija štapića i čunjića u ovisnosti o vidnom kutu (u odnosu na foveu)



# Formiranje slike na mrežnici

- udaljenost od leće do mrežnice je 17 mm

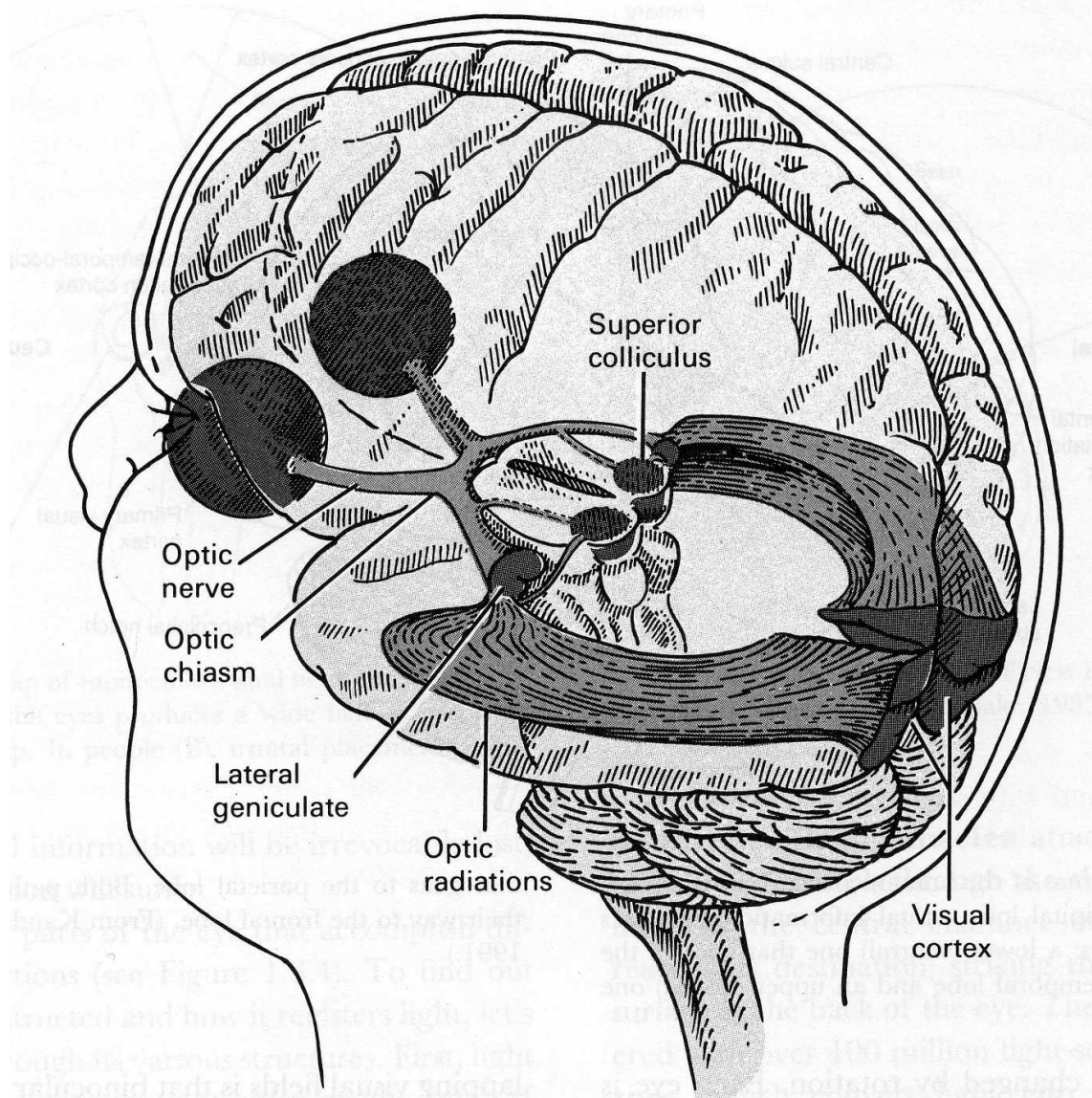






# Ljudski vizualni sustav

- Obrada slike počinje u očima i nastavlja se u mozgu gdje se prenosi pomoću optičkog živca



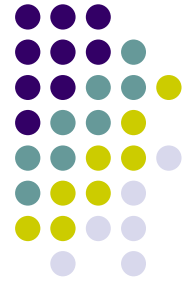
# Karakteristike ljudskog vizualnog sustava



- U nastavku navodimo nekoliko karakteristika ljudskog vizualnog sustava
  - Dinamički opseg svjetla
  - Adaptacija na svjetlinu
  - Osjetljivost na kontrast



# Svjetlina: Prilagođavanje i razlikovanje

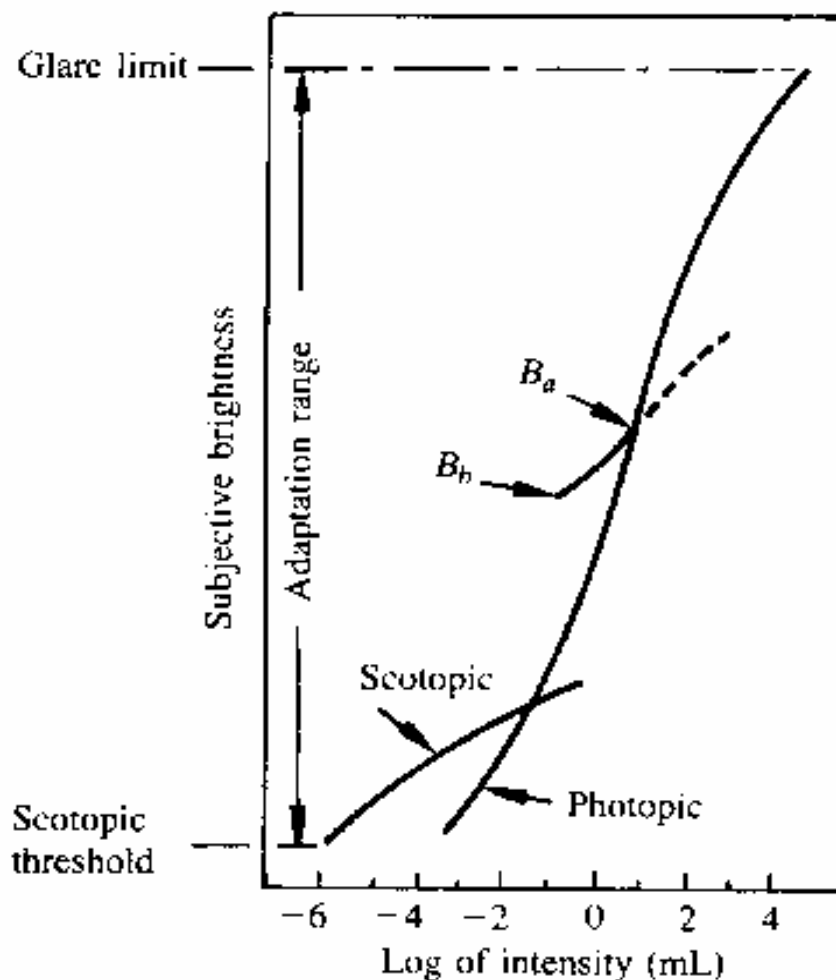


- Raspon svjetline na koji se ljudsko oko može prilagoditi je ogroman:  $10^{10}$
- Vizualni sistem ne radi istovremeno u cijelom rasponu svjetline
- Prilagođavanje na svjetlinu (engl. brightness adaptation)
- Raspon svjetlina koje se mogu razlikovati istovremeno je malen



# Adaptacija na svjetlinu

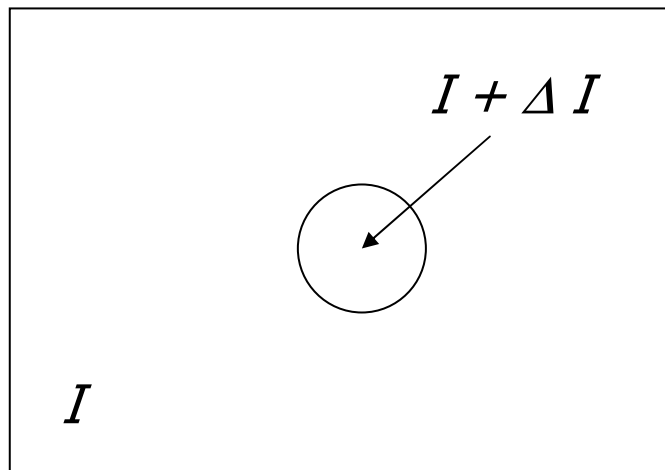
- engl. brightness adaption
- Kratki graf pokazuje raspon subjektivne svjetline na nekom nivou
- Niži dio krivulje predstavlja crno





# Osjetljivost na kontrast

- $\Delta I$  se povećava od nule sve dok se ne primijeti razlika u svjetlini između kruga i pozadine





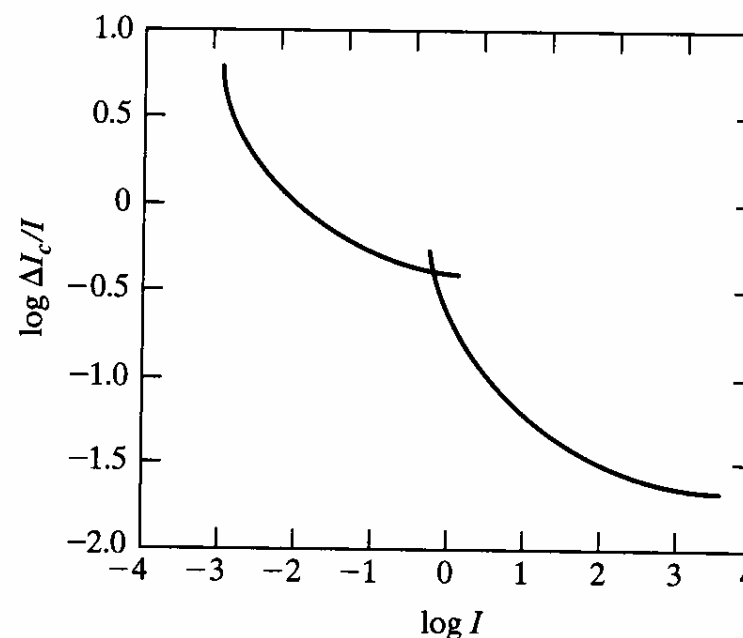
# Weber-ov koeficijent

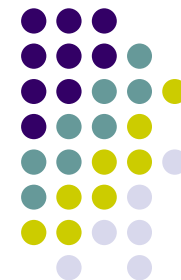
- Kvocijent  $\Delta I_c / I$  , gdje  $\Delta I_c$  minimalni razlučivi  $\Delta I$  se zove Weberov koeficijent
- Mali Weberov koeficijent daje dobru razlučivost svjetline
- Veliki Weberov koeficijent znači da je razlučivost svjetline loša



# Weberov koeficijent

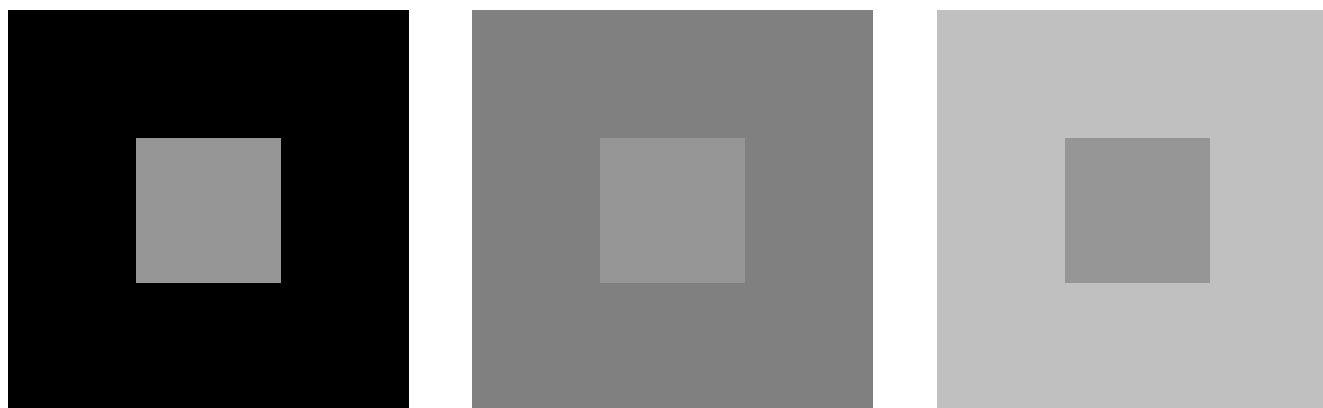
- Dvije krivulje pokazuju osjetljivost ljudskog vizualnog sustava za slabo svjetlo (štapići) i jako svjetlo (čunjići)
- Može se vidjeti da je razlučivost loša na slabom svjetlu





# Efekt istovremenog kontrasta

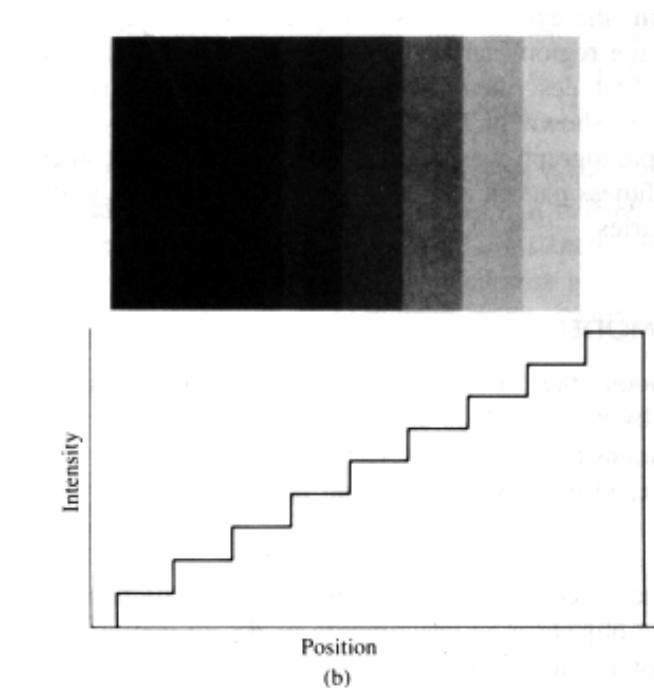
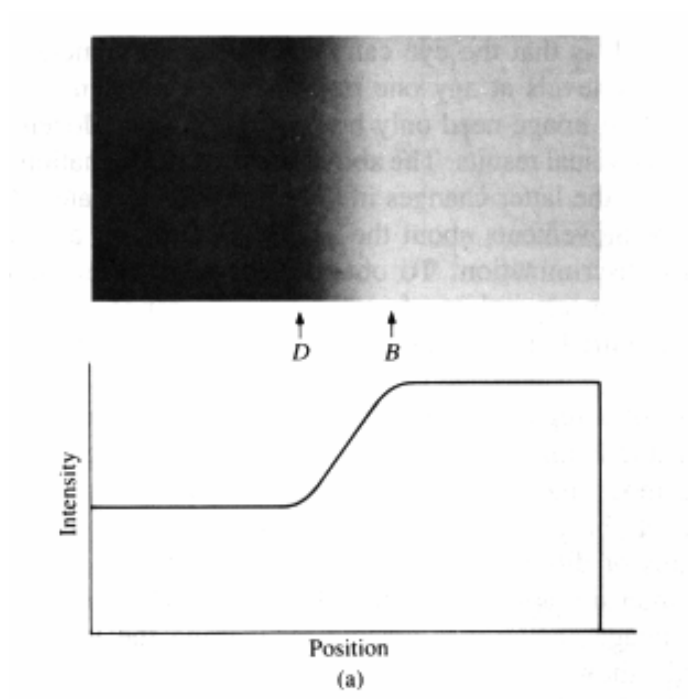
- Prema Weber-ovom zakonu ljudski vid je osjetljiv na kontrast tj. relativni odnos a ne na apsolutni iznos luminancije
- Efekt istovremenog kontrasta se objašnjava na taj način





# Mach-ov efekt

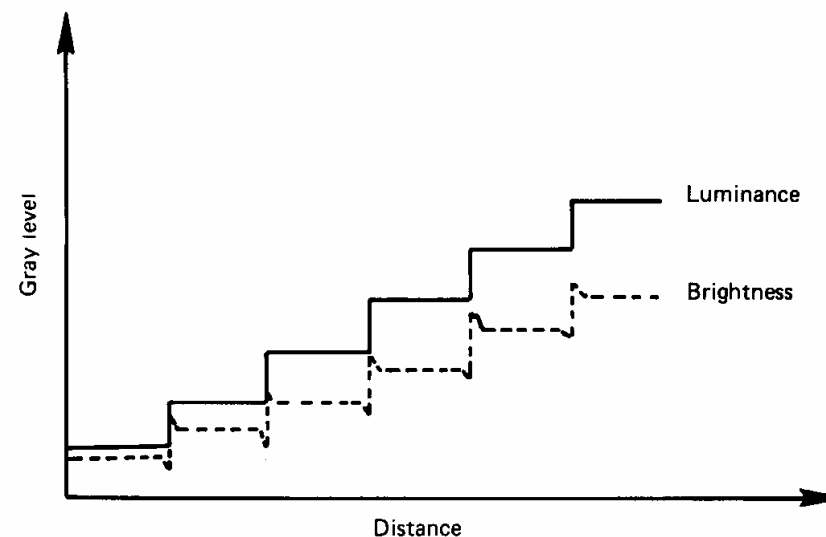
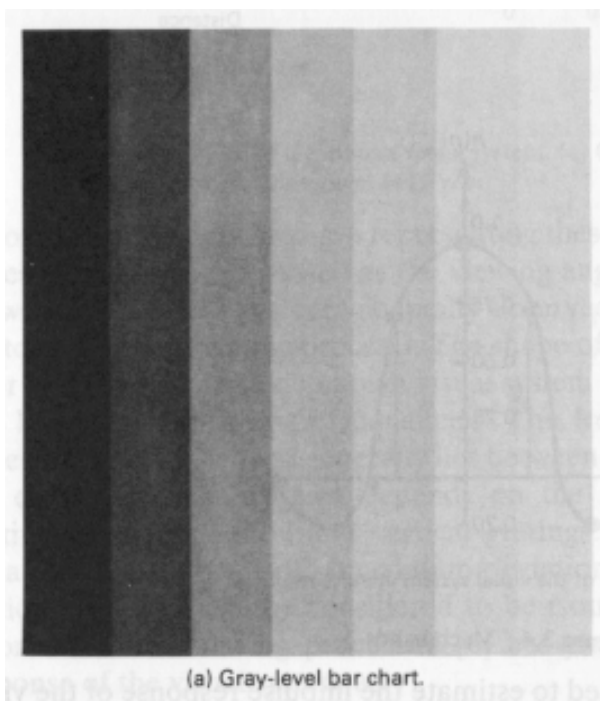
- Rubovi dijelova slike različitih luminancija se više ističu





# Mach-ov efekt

- Efekt pokazuje da svjetlina nije monotona (čak ni bezmemorijska) funkcija luminancije.

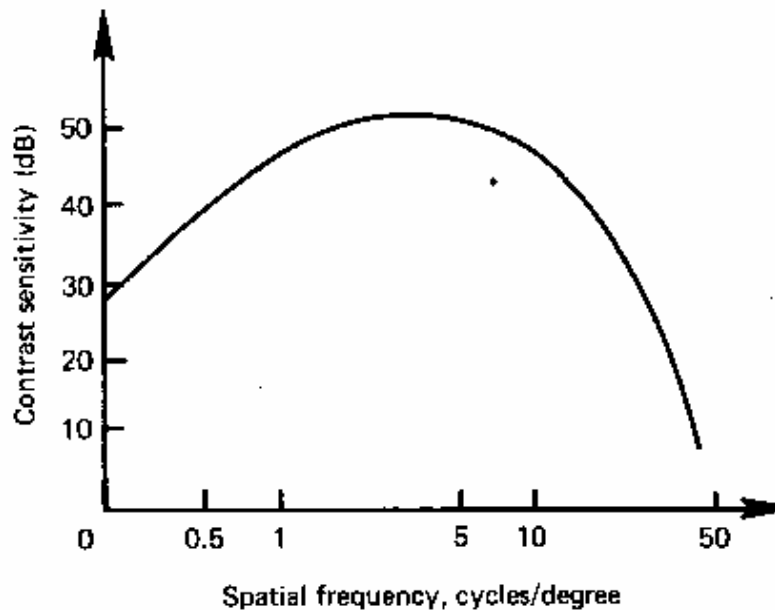
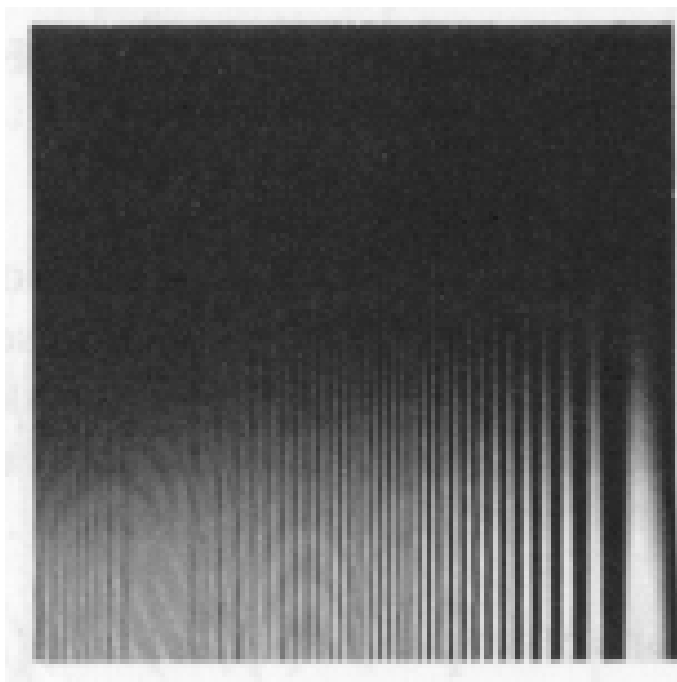






# MTF ljudskog vizualnog sustava

- Modulacijska transfer funkcija (MTF) prikazuje iznos minimalnog razlučivog kontrasta u ovisnosti o prostornoj frekvenciji

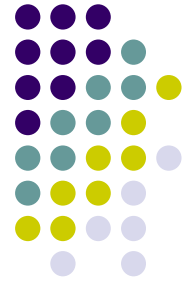


# Svjetlo i elektromagnetski spektar



- Svjetlo je elektromagnetsko zračenje koje je vidljivo ljudskom oku
- Vidljivo svjetlo je u rasponu od  $0.43 \mu\text{m}$  (ljubičasto) do  $0.79 \mu\text{m}$  (crveno)
- Spektar boja se može rastaviti u šest dijelova: ljubičasti, plavi, zeleni, žuti, narančasti, crveni

# Senzori

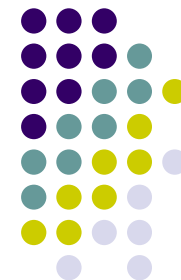


- Da bi snimili svjetlosno zračenje u određenom rasponu valnih duljina potreban nam je senzor koji može detektirati zračenje u tom istom rasponu
- Da bi mogli vidjeti neki objekt valna duljina svjetla mora biti manja nego što je veličina objekta



# Značajke svjetla

- Tri osnovne značajke izvora svjetla su snaga zračenja, luminancija i svjetlina
- Snaga zračenja (engl. radiance) je snaga izvora zračenja i mjeri se u W
- Luminancija se mjeri u lumenima (lm) i predstavlja energiju koju je osjetio (vidio) promatrač
  - Zavisno od spektralne osjetljivosti promatrača, dva izvora iste snage zračenja mogu imati različite luminancije
  - Luminancija ovisi o osjetljivosti promatrača



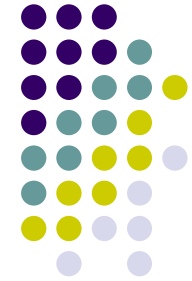
# Definicija luminancije

- Luminancija (ili intenzitet) prostorno distribuiranog objekta sa distribucijom zračenja  $I(x, y, \lambda)$  dana je izrazom:

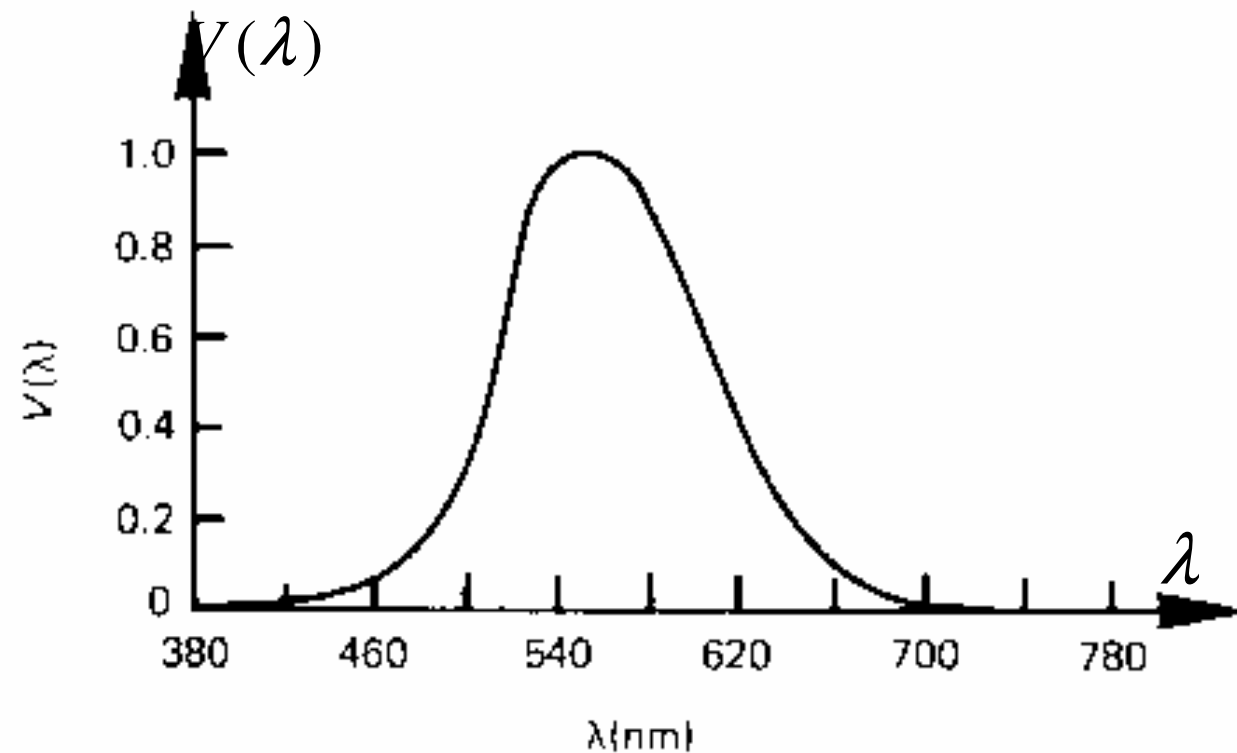
$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, \lambda) V(\lambda) d\lambda$$

gdje je  $V(\lambda)$  relativna luminancijska funkcija efikasnosti vizualnog sustava

# Luminancijska efikasnost ljudskog vizualnog sustava



- Različita za jako svjetlo (čunjići) i za slabo svjetlo (štapići)



# Luminancija je svojstvo objekta



- Luminancija (ili intenzitet) nekog objekta ne ovisi o luminanciji okolnih objekata
- Luminancija je svojstvo samog objekta i ovisi samo o funkciji svjetlosne distribucije zračenja  $I$  i funkciji relativne luminancijske efikasnosti  $V$



# Pojam svjetline

- Svjetlina (engl. brightness) objekta je subjektivni doživljaj luminancije i ona ovisi o luminanciji okoline
- Dva objekta sa različitim pozadinama istih luminancija mogu imati različite svjetline
- Kontrast je razlika dvaju svjetlina





# Senzori i akvizicija slike

- Da bi sliku mogli obrađivati pomoću računala potrebno je obaviti akviziciju slike pomoću senzora
- Senzor mjeri svjetlo koji se odbija od objekata u sceni:
  - Scena može biti osvijetljena elektromagnetskim zračenjem kao što je radar, IR, vidljivo ili rendgensko zračenje
  - Osvjetljenje može biti i ultrazvukom
  - Objekti mogu biti makroskopskih dimenzija ili npr. molekule



# Prostorni raspored senzora

- Tri osnovna prostorna rasporeda su:
  - Točkasti senzor (foto dioda)
  - Linijski senzor
  - 2-D senzor



# Linijski senzor

- Linijski senzor koristi niz individualnih senzora raspoređenih uzduž linije
- Danas postoje linijski CCD senzori koji imaju 4000 i više piksela
- Linijski senzori se koriste kod:
  - snimanja iz aviona gdje je linijski senzor postavljen okomito na smjer leta
  - vizualne inspekcije u industriji (npr. pokretne trake)

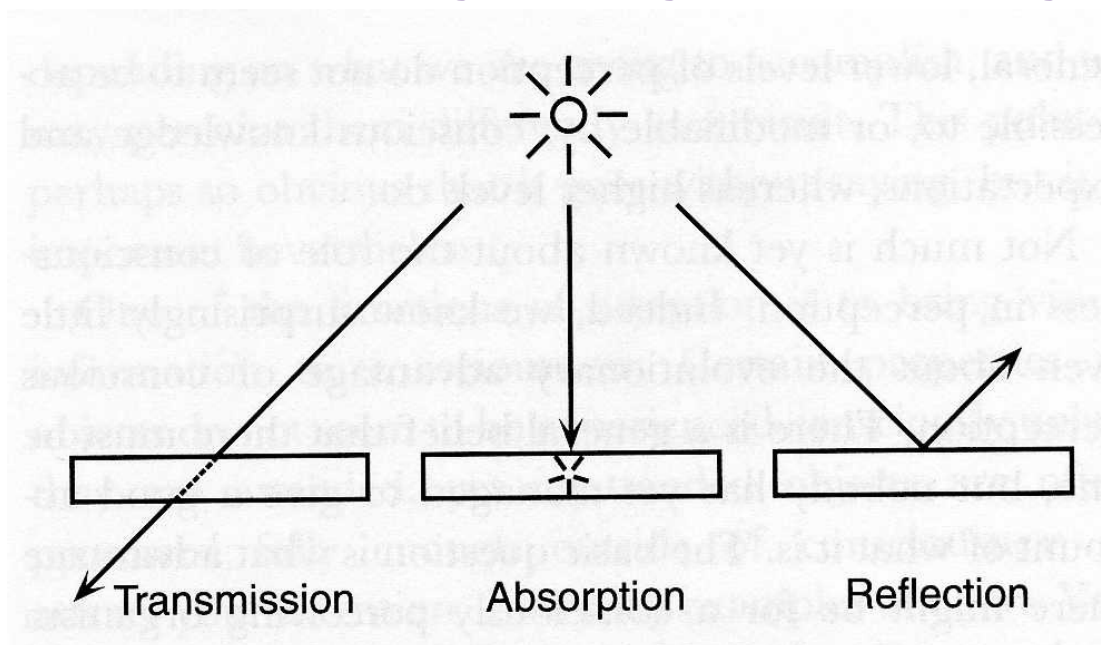


## 2-D senzor

- 2-D senzori su CCD ili CMOS senzori koji mogu imati rezolucije  $>20$  miliona piksela
- Vrijednost piksela je proporcionalna integralu ulaznog svjetla
- Kod slabog osvjetljenja slika se može snimati nekoliko minuta ili sati da bi se smanjio šum



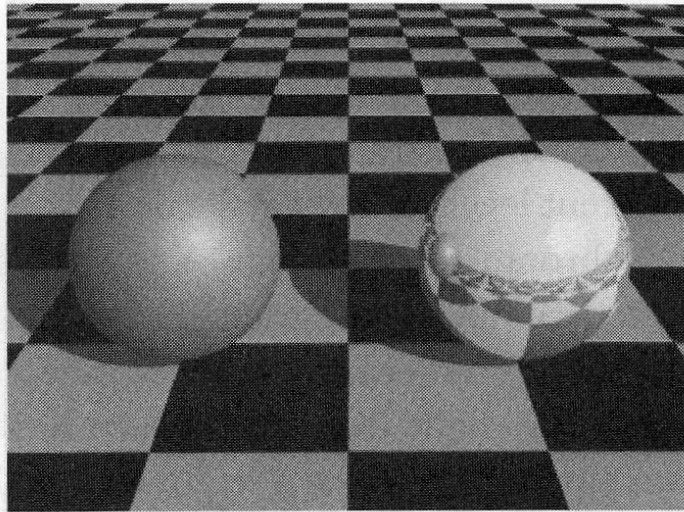
# Interakcija svjetla i objekata



- Različiti materijali imaju različita svojstva prozirnosti, apsorpcije i refleksije

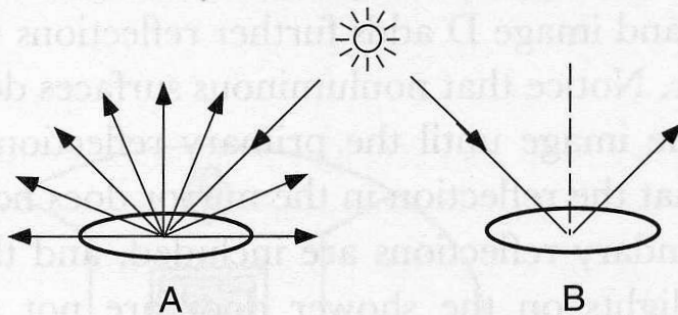


# Svojstva površina



Matte Surface

Specular Surface



A

B

- Refleksija svjetla od objekata ovisi o svojstvima površine objekta (materijala):
  - Mat površine (refleksija u svim smjerovima)
  - Spekularne površine (refleksija pod kutem jednakim upadnom kutu)



# Formiranje slike

- Uređaji za snimanje:
  - Foto aparati, kamere, mikroskopi, itd.
  - Ljudsko oko
- Svaki uređaj za snimanje sadrži:
  - Sustav za formiranje slike objekta (npr. objektiv foto aparata)
  - Senzor (pretvornik) koji vrši pretvorbu informacije iz optičkog u npr. električni oblik



# Model formiranja slike

- Slika  $f(x,y)$  je dvodimenzionalna funkcija intenziteta svjetla

$$f(x, y), \quad 0 < f(x, y) < \infty$$

- Objekti oko nas osvijetljeni su nekim izvorom svjetlosti
- Slike koje vidimo su svjetlo reflektirano od objekata





# Model formiranja slike

- Reflektirano svjetlo ovisi o dvije komponente:
  - Intenzitetu svjetla kojim je scena osvjetljena:  $i(x,y)$
  - Koeficijentu refleksije materijala:  $r(x,y)$
- Intenzitet reflektiranog svjetla  $f(x,y)$  dan je produktom:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y)$$

gdje je:

$$0 < i(x, y) < \infty, \quad 0 < r(x, y) < 1$$



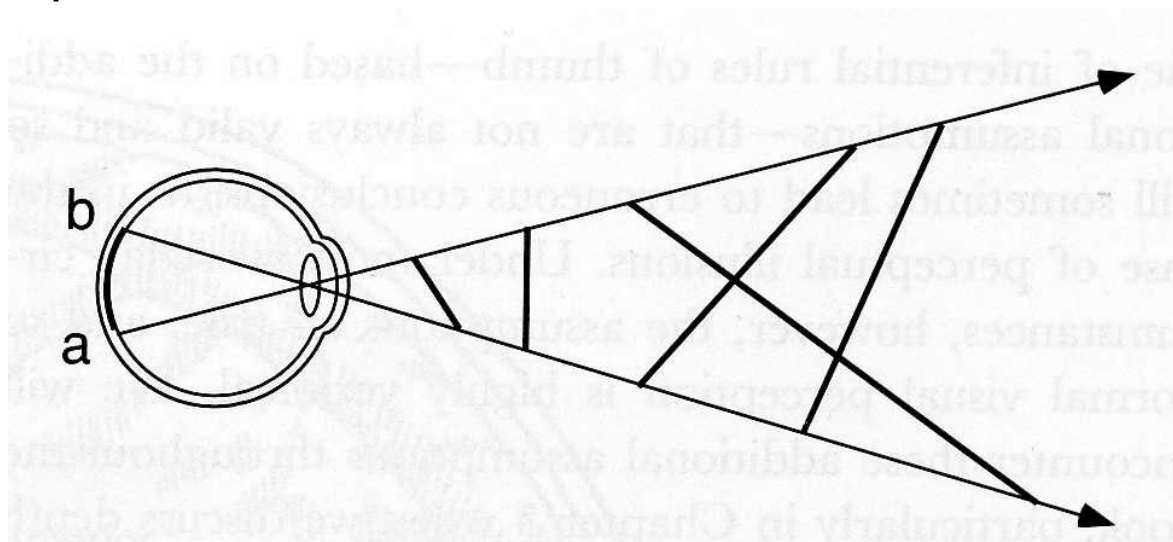
# Optički sustav

- Optički sustav (oko) radi projekciju 3D scene u 2D sliku
- Svaka točka u 3D prostoru se preslikava u jednu točku u 2D slici
- Takva projekcija zove se perspektivna projekcija



# Perspektivna projekcija

- Perspektivnom projekcijom gubi se 3D informacija jer je rezultat 2D slika:
  - Jedna točka na retini može nastati od beskonačno puno točaka u prostoru (uzduž jednog pravca)
  - Jedna linija na retini može biti rezultat više mogućih linija u 3D prostoru

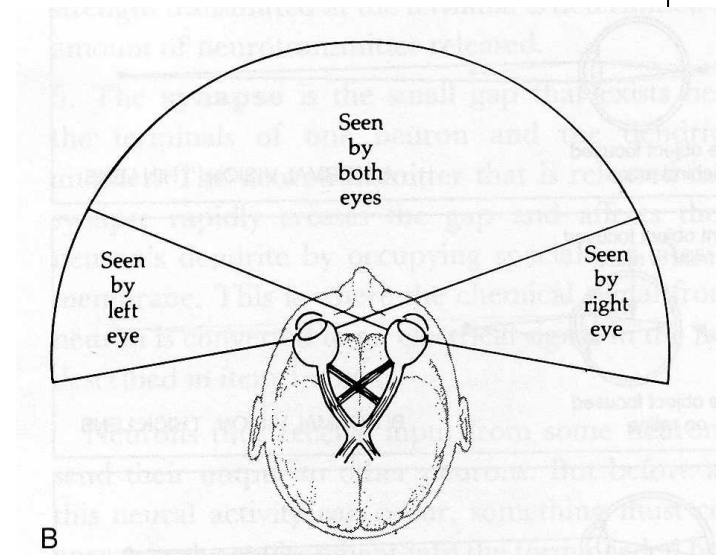
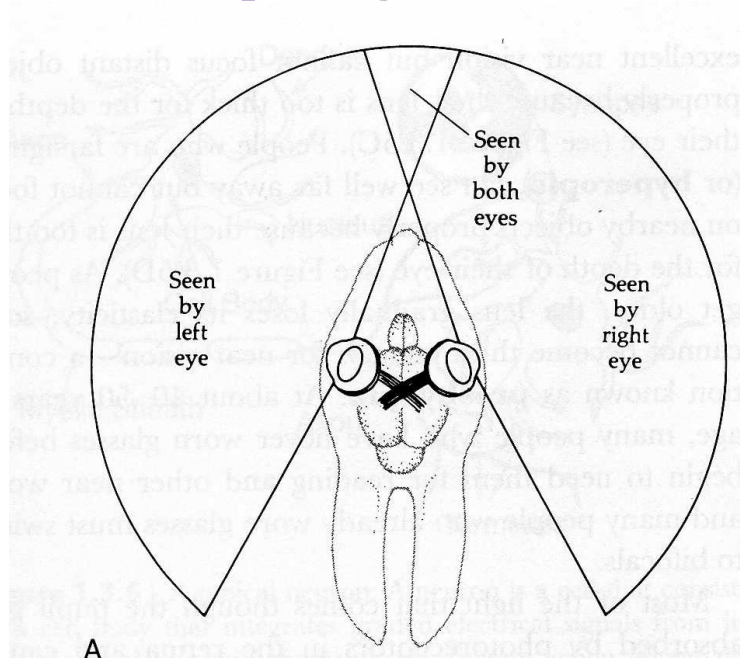
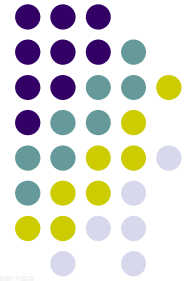




# Stereo vid

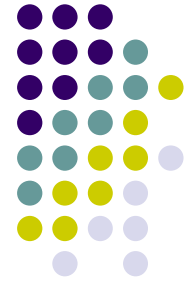
- Čovjek koristi dva oka jer je pomoću dva pogleda moguće rekonstruirati dubinu scene (3D informaciju)
- Čak i kod vida s jednim okom moguće je zahvaljujući znanju procijeniti udaljenost objekta od promatrača

# Vidno polje



- Zec (lijevo) – manje binokularno područje, širi vidni kut
- Čovjek – veće binokularno područje, manji kut

# Vid kao inverzni problem



- Zadatak vizualne percepcije je da iz dvije 2D slike rekonstruira izgled 3D okoline koja je generirala te dvije slike



# Osnove digitalne geometrije

- U nastavku uvodimo osnovne pojmove iz digitalne (diskretne) geometrije:
  - Susjedstvo
  - Relacija susjedstva
  - Put
  - Povezanost
  - Funkcije udaljenosti

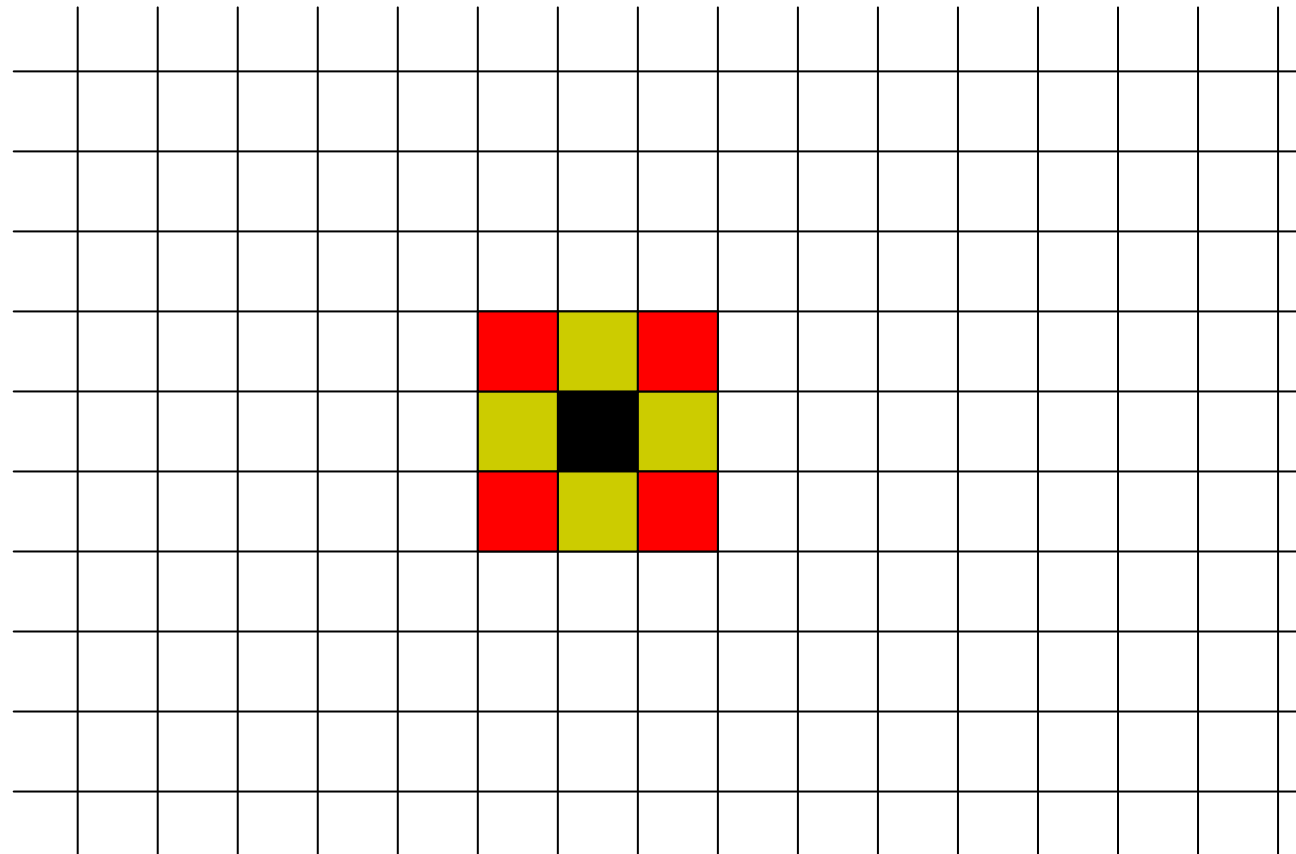
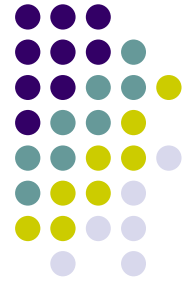


## 4-susjedstvo

- Točka (piksel)  $p$  na lokaciji  $(x, y)$  ima četiri horizontalna i vertikalna susjeda na koordinatama:  
 $(x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1)$
- Ovaj skup susjeda zove se 4-susjedstvo piksela  $p$  i označava se s  $N_4(p)$
- Četiri dijagonalna susjeda od  $p$  su:  
 $(x+1, y+1), (x+1, y-1), (x-1, y+1), (x-1, y-1)$
- Skup dijagonalnih susjeda označava se s  $N_D(p)$



# 4-susjedstvo



$p$



$N_4(p)$



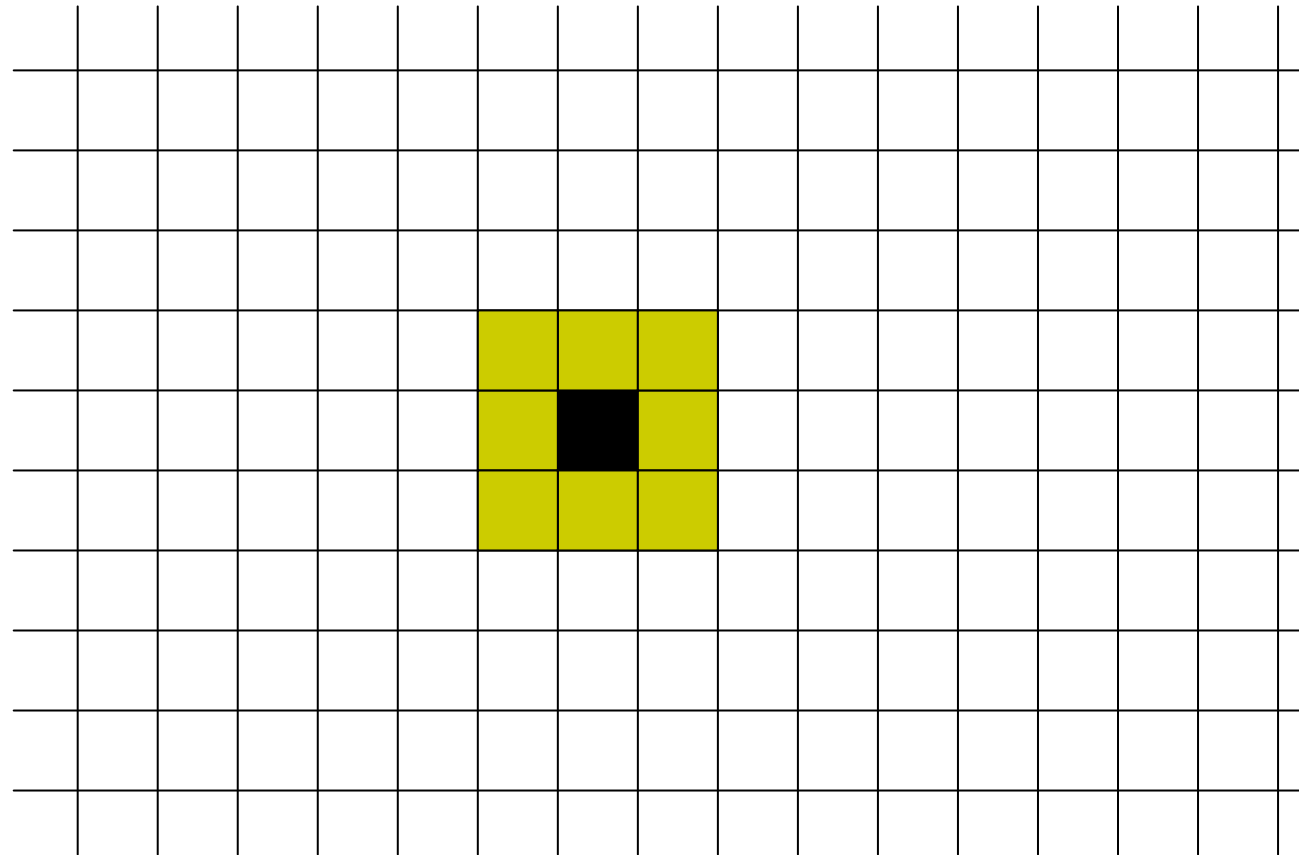
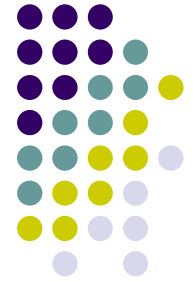
$N_D(p)$



## 8-susjedstvo

- Skup piksela koji se sastoji od 4-susjeda i dijagonalnih susjeda zove se 8-susjedstvo i označava se s  $N_8(p)$
- Ako se piksel  $p$  nalazi na granici slike neki od 4- or 8-susjeda će biti izvan granica slike

# 8-susjedstvo



$p$



$N_8(p)$



# Relacija susjedstva

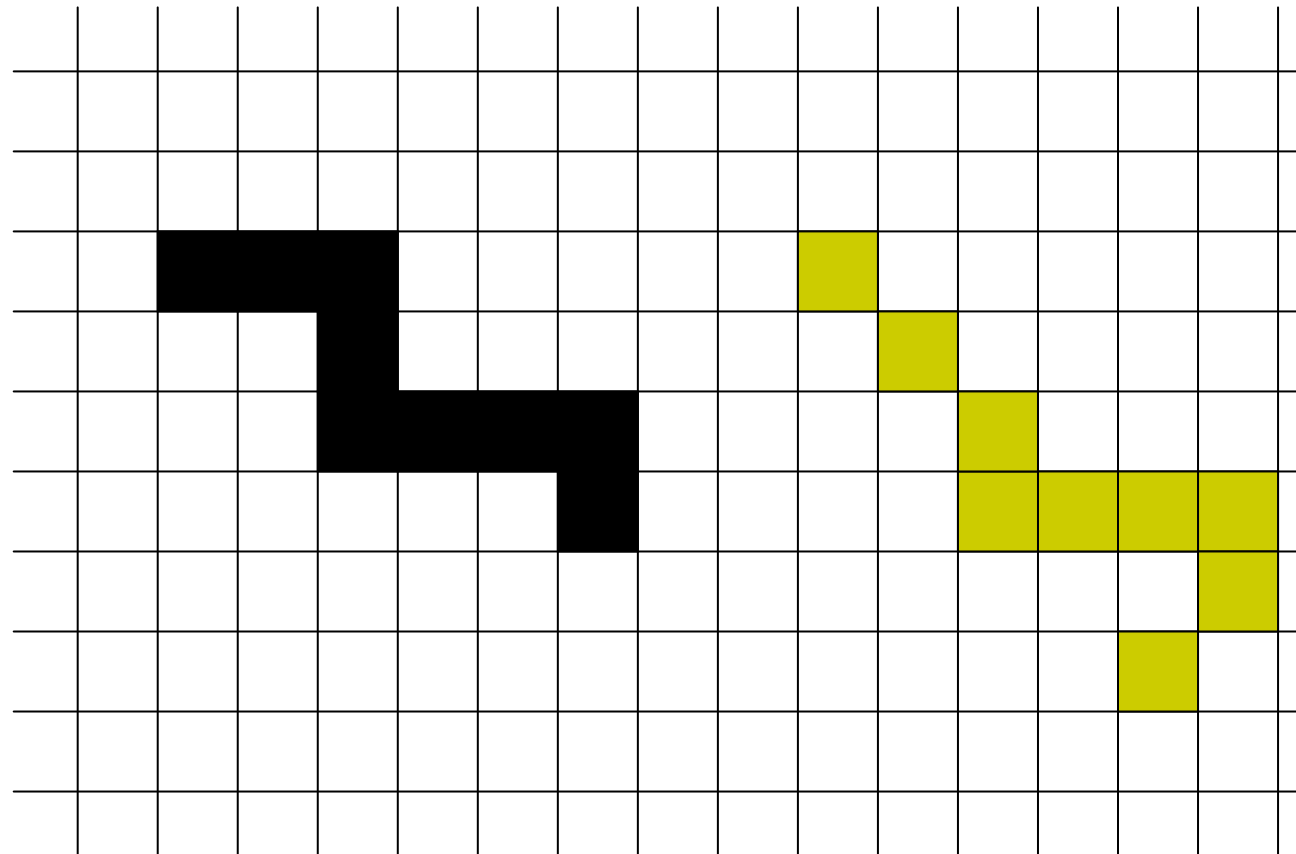
- Neka je  $S$  skup svih piksela u slici
- Relacija je podskup Kartezijevog produkta skupova  $S \times S$
- Dva piksela  $p$  i  $q$  su 4-susjedi ako je  $q \in N_4(p)$
- Dva piksela  $p$  i  $q$  su 8-susjedi ako je  $q \in N_8(p)$




# Put

- Put između dvaju piksela na koordinatama  $(x, y)$  i  $(s, t)$  je niz susjednih piksela s koordinatama:  
 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$   
tako da je  $(x_0, y_0) = (x, y)$  i  $(x_n, y_n) = (s, t)$  a pikseli  $(x_i, y_i)$  i  $(x_{i-1}, y_{i-1})$  su susjedi za svaki  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$
- Možemo imati 4-put ili 8-put zavisno od korištene relacije susjedstva
- Napomena: vrijednost piksela nije važna

# 4-put i 8-put



 4-put (i 8-put)

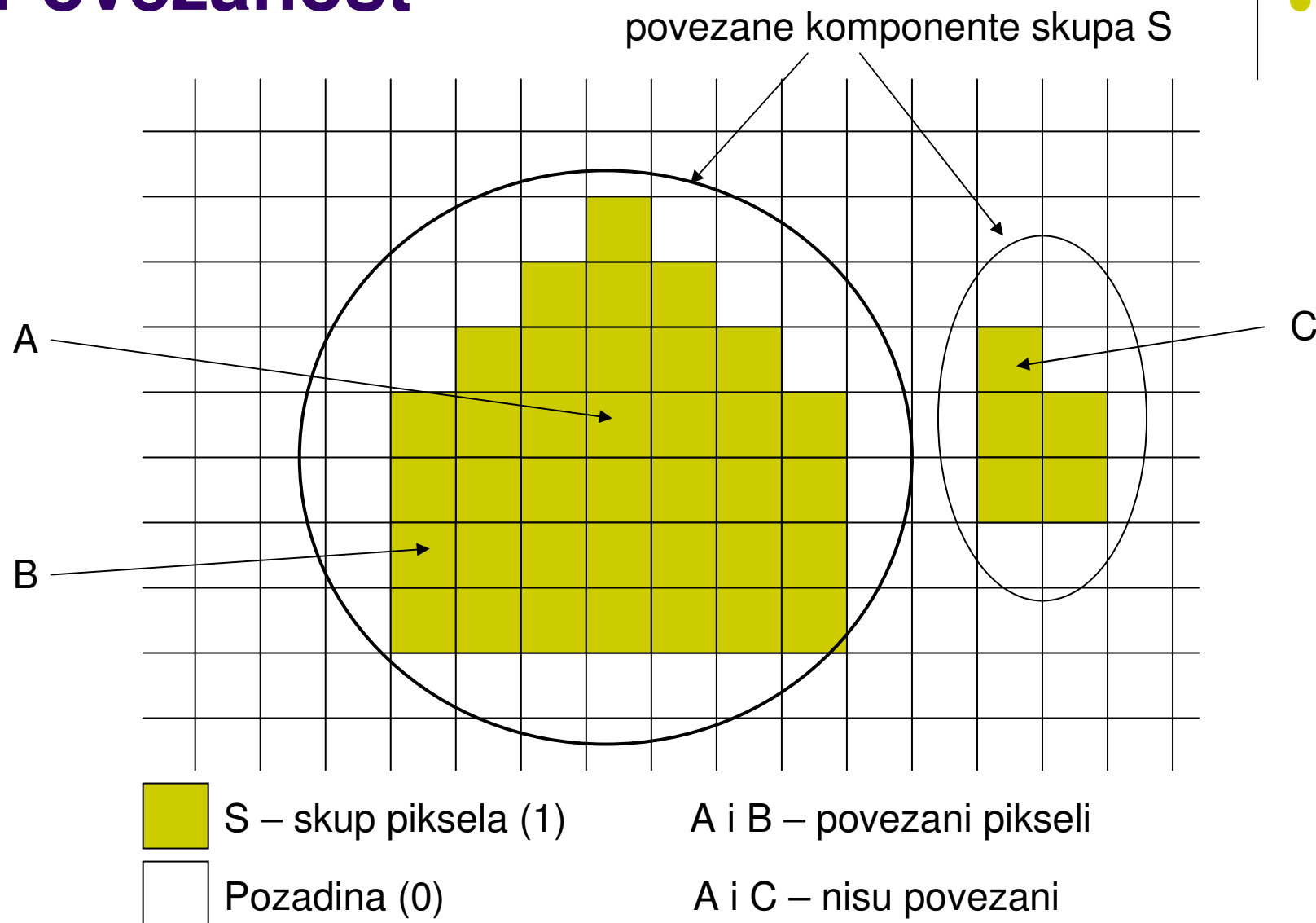
 8-put



# Povezanost

- Neka je  $S$  podskup piksela u slici
- Dva piksela  $p$  i  $q$  su povezana u skupu  $S$  ako postoji put između njih, koji se sastoji isključivo od piksela iz skupa  $S$
- Za svaki piksel  $p \in S$  skup svih piksela koji su povezani s pikselom  $p$  zove se povezana komponenta od  $S$
- Ako skup  $S$  ima samo jednu povezanu komponentu tada se skup  $S$  naziva povezani skup

# Povezanost







# Definicija funkcije udaljenosti

- Neka su  $p$ ,  $q$ , i  $z$  pikseli s koordinatama  $(x, y)$ ,  $(s, t)$ , i  $(v, w)$ .  $D$  je funkcija udaljenosti ako vrijedi:
  1.  $D(p, q) \geq 0$  ( $D(p, q) = 0 \Leftrightarrow p = q$ )
  2.  $D(p, q) = D(q, p)$
  3.  $D(p, z) \leq D(p, q) + D(q, z)$



# Funkcije udaljenosti: Euklidska

- $D_e$  udaljenost (Euklidska udaljenost) je definirana izrazom:

$$D_e(p, q) = [(x - s)^2 + (y - t)^2]^{1/2}$$



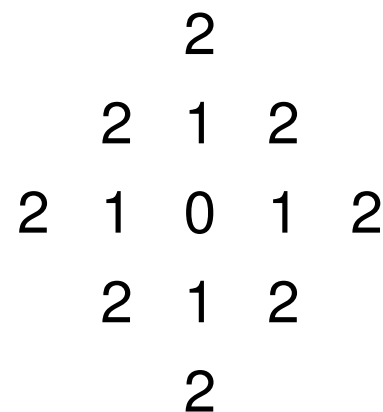
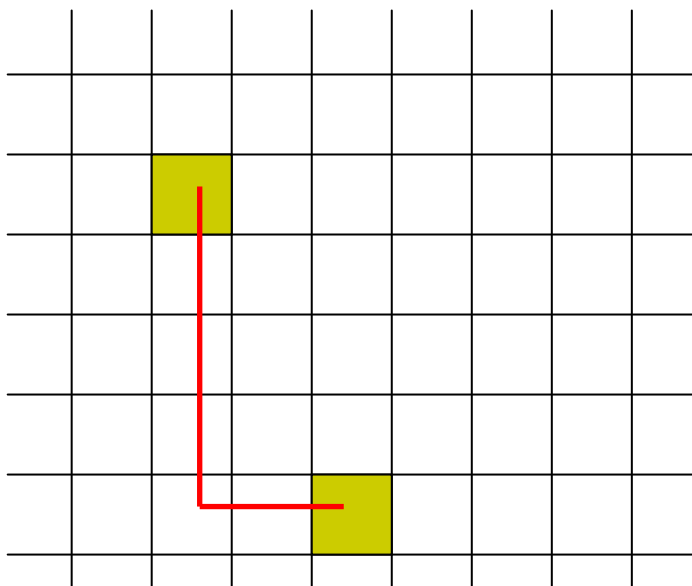


# Funkcije udaljenosti: City-Block

- $D_4$  udaljenost (city-block) je definirana kao:

$$D_4(p, q) = |x - s| + |y - t|$$

- Primjer  $D_4$  udaljenosti: Pikseli s  $D_4 = 1$  su 4-susjedi od  $p$  (centralnog piksela)



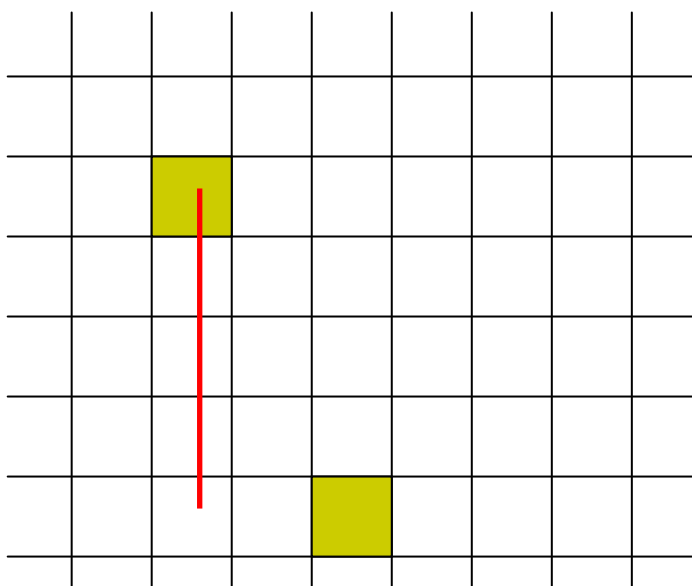


# Funkcije udaljenosti : Chessboard

- $D_8$  udaljenost (šahovska ploča) je definirana kao:

$$D_8(p, q) = \max(|x - s|, |y - t|)$$

- Pikseli s  $D_8 = 1$  su 8-susjedi od  $p$  (centralnog piksela)



|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |



# Zaključak

- Prezentiran je pregled nekih temeljnih aspekata obrade slike i računalnog vida:
  - Osnovne karakteristike ljudskog vizualnog sustava
  - Svjetlo, luminancija, svjetlina, kontrast
  - Vizualna percepcija, iluzije
  - Osnove digitalne geometrije