

# Računarska grafika

Svetlost i senčenje

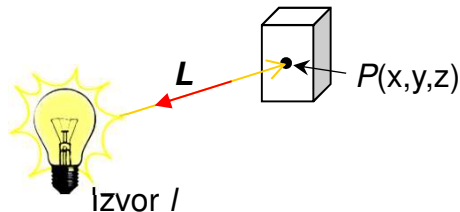


# Uvod

- Svetlost i senčenje izuzetno doprinose realističnosti slike
- Model izvora svetla – model upadnog svetla
  - izvori: ambijentalno svetlo, usmereno svetlo, tačkast izvor, reflektor
- Model osvetljenja (iluminacije) – model odbijanja (refleksije) svetla
  - lokalno (direktno) osvetljenje
  - globalno (indirektno) osvetljenje
- Modeli lokalnog osvetljenja (ambijentalno, difuzno, reflektivno)
  - relativno brzo izračunavanje
  - JavaFX podržava samo lokalno osvetljenje
- Modeli (algoritmi) senčenja (nijansiranja):
  - ravnomerno (flat) senčenje
  - Guroovo (Gouraud) senčenje
  - Fongovo (Phong) senčenje

# Izvori svetla

- Izvor se karakteriše energijom ( $E$ ) i talasnom dužinom ( $\lambda$ ) zračenog svetla
  - talasna dužina određuje boju svetla
- Intenzitet svetla izvora:  $I_L(E, \lambda)$ 
  - u računarskoj grafici se modelira komponentama modela boja (R,G,B)
- Model upadnog svetla koje potiče od datog izvora  $s$  u tački  $P_i(x,y,z)$ :  
 $I_s(P_i, \mathbf{L}_i, I_L, \dots)$ 
  - $P_i$  je osvetljena tačka sa koordinatama  $(x,y,z)$  na površini objekta
  - $\mathbf{L}_i$  je jedinični vektor smera upadnog svetla u tački  $P_i$
  - $I_L$  je intenzitet svetla izvora (modeliran R,G,B komponentama)



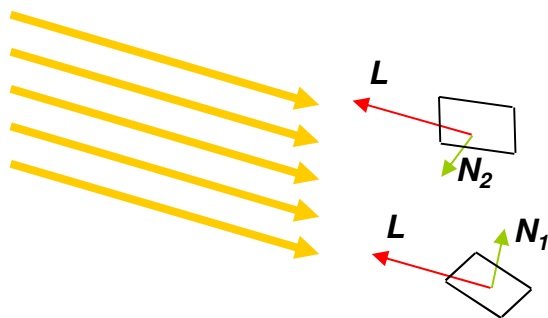
# Ambijentalno svetlo

- Objekat koji nije direktno osvetljen je i dalje vidljiv
- Svetlost koja ga obasjava potiče od ambijentalne refleksije
  - ambijentalna refleksija – odbijanje svetla od drugih objekata u sceni
- Modelira se izvorom ambijentalnog svetla
  - ne računaju se odsjaji od pojedinih površina
  - samo se specificira konstantan intenzitet svetla za sve površi u sceni
  - definiše se pomoću ambijentalnih RGB komponenti intenziteta  $I_L$
- Model intenziteta svetla u tački  $P_i$  koje potiče od ambijentalnog izvora svetla intenziteta  $I_L$ :
$$I_a(P_i, I_L) = I_L$$
- U svakoj tački  $P_i$  scene intenzitet svetla je  $I_L$

# Usmereno (*directional*) svetlo

- Izvor svetla dovoljno dalek da se svi zraci smatraju paralelnim
- Na primer, sunce kao izvor svetlosti
- Definiše se intenzitetom emitovanih RGB komponenti svetla  $I_L$  i:
  - vektorom smera svetla  $L$
- Smer svetla  $L$  je bitan za modeliranje odsjaja od površi
- Model intenziteta svetla u tački  $P_i$  koje potiče od usmerenog svetla intenziteta  $I_L$ :

$$I_d(P_i, L, I_L) = I_L$$



Intenzitet odbijenog svetla u tački  $P_i$ :  
 $\sim N_i \cdot L$

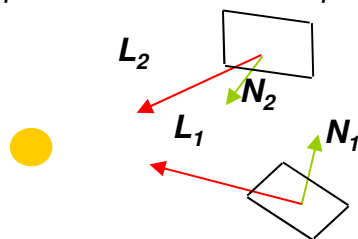
$N_i$  različito za svaku površ

$L$  konstantno za sve površi

# Tačkasto (*point*) svetlo

- Relativno blizak izvor svetla koji radijalno širi zrake u svim pravcima
- Na primer, sijalica
- Definiše se intenzitetom emitovanih RGB komponenti svetla  $I_L$  i:
  - pozicije izvora  $S(x,y,z)$
  - faktora konstantnog  $k_c$ , linearnog  $k_l$  i kvadratnog  $k_q$  slabljenja sa rastojanjem  $d$  izvora u tački  $S$  do tačke na površi objekta  $P_i$
- Model intenziteta svetla u tački  $P_i$  koje potiče od tačkastog izvora na poziciji  $S$ , intenziteta  $I_L$  i slabljenja  $k_c, k_l, k_q$ :

$$I_p(P_i, S, k_c, k_l, k_q, I_L) = I_L / (k_c + k_l * d + k_q * d^2), \quad \mathbf{L}_i = \mathbf{v}(P_i, S), \quad d = r(P_i, S)$$



Intenzitet odbijenog svetla u tački  $P_i$ :

$$\sim \mathbf{N}_i \cdot \mathbf{L}_i$$

$\mathbf{N}_i$  i  $\mathbf{L}_i$  različito za svaku površ

# Reflektorsko (*spot*) svetlo

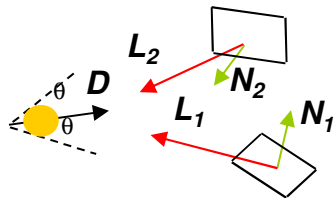
- Izvor svetla zrači tako da intenzitet opada sa povećanjem odklona zraka od vektora usmerenja reflektora  $\mathbf{D}$
- Može da bude ograničeno zračenje na kupu sa osom na pravcu  $\mathbf{D}$
- Na primer, reflektorska sijalica (reflektor)
- Definiše se preko intenziteta emitovanih RGB komponenti svetla  $I_L$  i
  - pozicije izvora  $S(x,y,z)$
  - vektora usmerenja reflektora  $\mathbf{D}$
  - faktora konstantnog  $k_c$ , linearnog  $k_l$  i kvadratnog  $k_q$  slabljenja sa rastojanjem  $d$  izvora  $S$  do tačke na površi  $P_i$
- Model intenziteta svetla u tački  $P_i$  koje potiče od reflektorskog svetla intenziteta  $I_L$ , usmerenja  $\mathbf{D}$  i slabljenja  $k_c, k_l, k_q$ :

$$I_r(P_i, S, \mathbf{D}, k_c, k_l, k_q, I_L) = I_L (-\mathbf{D} \cdot \mathbf{L}_i) / (k_c + k_l \cdot d + k_q \cdot d^2), \quad \mathbf{L}_i = \mathbf{v}(P_i, S), \quad d = r(P_i, S)$$

Intenzitet odbijenog svetla u tački  $P_i$ :

$$\sim (-\mathbf{D} \cdot \mathbf{L}_i)(\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{L}_i)$$

Opciono: ako  $\cos(\theta) > -\mathbf{D} \cdot \mathbf{L}_i \Rightarrow$  ignoriši svetlo



Svetlost i senčenje

13.04.2018.

# Izvori svetla u JavaFX

- Svetla su objekti potomaka apstraktne klase `LightBase`
- Klasa `LightBase` je potomak klase `Node`
  - svetla se kao i drugi čvorovi (na primer, geometrijski oblici) dodaju sceni
- Svakom objektu svetla se može
  - zadati boja
  - upravljati njegovim stanjem: uključeno/isključeno
- Po stvaranju svetlo je podrazumevano bele boje i uključeno
- Metodi kojima se može menjati i dohvatati boja svetla:
  - `setColor(Color)` i `getColor()`
- Metodi za uključivanje/isključivanje svetla i dohvaćanje stanja svetla:
  - `setLightOn(boolean)` i `isLightOn()`



# Liste objekata na koje utiče svetlo

- Svetlu se mogu pridružiti oblici na koje svetlo utiče
  - razdvaja se uticaj različitih svetala na različite oblike u sceni
- Objekat svetla održava listu pridruženih čvorova na koje se dato svetlo primenjuje
  - tip liste: `ObservableList<Node>`
- Metod `getScope()` objekta svetla vraća listu pridruženih čvorova
  - na tekuću listu se dodaju novi čvorovi scene na koje dato svetlo ima uticaj
  - `svetlo.getScope().addAll(čvor1, ..., čvorN);`
- Ukoliko je u datoj listi svetla čvor tipa `Group`
  - dato svetlo se primenjuje i na sve čvorove članove grupe, rekurzivno
- Ukoliko je lista prazna, svetlo utiče na sve objekte u sceni

# Vrste izvora svetla u JavaFX

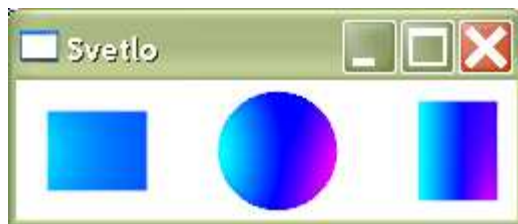
- JavaFX podržava dve vrste svetala:
  - ambijentalno (klasa `AmbientLight`)
  - svetlo tačkastog izvora (klasa `PointLight`)
- Obe klase su potomci klase `LightBase`
- Ambijentalno svetlo
  - po prirodi difuzno, nije usmereno (dolazi iz svih i odbija se u svim pravcima)
  - jednak mu je intenzitet na svim površinama svih oblika u sceni
- Tačkasti izvor svetla
  - ima svoju poziciju u sceni
  - radijalno širi zrake svetla
  - intenzitet slabi sa rastojanjem od izvora
- U sceni može biti proizvoljan broj svetala obe vrste
- U sceni se podrazumeva (ako se ne doda ni jedno svetlo) tačkasti izvor svetla na poziciji kamere (*headlight*)

# Stvaranje i manipulacija izvorima

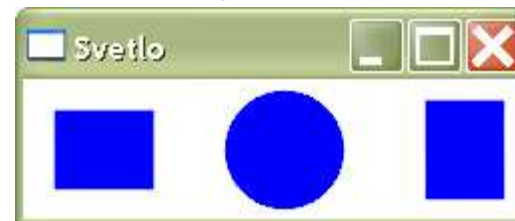
- Objekti ambijentalnog svetla i svetla tačkastog izvora se stvaraju
  - podrazumevanim konstruktorom ili
  - konstruktorom čiji je jedini parametar boja svetla  
`AmbientLight (Color boja);`  
`PointLight (Color boja);`
- Objekat tačkastog izvora se može pozicionirati u sceni
  - postavljanjem translacionih svojstava po odgovarajućim osama
  - proizvoljnom transformacijom čvora svetla
- Ambijentalno svetlo nema poziciju, pa transformacije nemaju smisla

# Primer

```
import javafx.scene.PointLight;
import javafx.scene.AmbientLight;
...
    AmbientLight a = new AmbientLight();
    a.setColor(Color.BLUE);
    PointLight s1 = new PointLight(); s1.setColor(Color.CYAN);
    s1.setTranslateX(0); s1.setTranslateY(35); s1.setTranslateZ(-20);
    PointLight s2 = new PointLight(); s2.setColor(Color.RED);
    s2.setTranslateX(250); s2.setTranslateY(70); s2.setTranslateZ(10);
    Group koren = new Group();
    koren.getChildren().addAll(kvadar, lopta, valjak, a, s1, s2);
```



Samo ambijentalno svetlo:

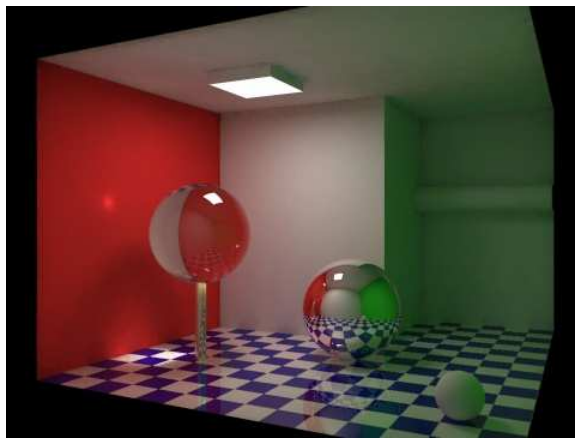


# Modeli osvetljenja

- Modelira se interakcija svetla sa određenim tačkama osvetljene površine objekta da se odredi njihova nijansa
- U opštem slučaju, nijansa u nekoj tački površine objekta je određena:
  - ambijentalnim svetlom
  - difuznim svetlom
  - odsjajem izvora svetla (*specular reflection*) koji zavisi od reflektivnosti materijala
  - drugim osobinama materijala: boja, prozirnost, tekstura, reljefnost, samoosvetljenje
  - senkama drugih objekata
  - ogledanjima drugih objekata (*reflections*)
  - prelamanjem svetla (*refractions*)
- Model osvetljenja razmatra
  - attribute izvora svetla (vrstu, intenzitet, poziciju, smer svetla)
  - attribute sredine prostiranja (konstantno, linearno, kvadratno slabljenje)
  - attribute površine objekta (boju, reflektivnost, transparentnost)
  - interakciju između svetla i objekata (orijentaciju površi objekta)
  - interakciju između objekata i oka posmatrača (smer pogleda)

# Podela modela osvetljenja

- Modeli osvetljenja se dele na lokalne i globalne modele
  - Lokalni modeli (direktno svetlo) razmatraju samo
    - izvor svetla, poziciju posmatrača i svojstva materijala objekta
  - Globalni modeli (indirektno svetlo) uzimaju u obzir
    - interakciju svetla sa svim površinama u sceni
    - primeri globalnog osvetljenja:



Preuzeto sa Wikipedia

# Crtanje (*rendering*)

- Crtanje u rasterskoj grafici može biti zasnovano na sledećim tehnikama:
  - sken-konverzija (*scan-conversion*), adekvatno je lokalno osvetljenje
  - praćenje zraka (*ray-tracing*), adekvatno je globalno osvetljenje
- Sken-konverzija – za svaki piksel duž linije skeniranja poligona:
  - određuje se nijansa svakog piksela
- Praćenje zraka – za svaki piksel slike:
  - kreira se zrak od oka kroz piksel
  - za svaki objekat u sceni
    - određuju se preseki zraka sa objektima u sceni
    - čuva se presek koji je bliži od prethodno utvrđenih
  - određuje se osvetljaj i boji se piksel nijansom objekta u tački preseka
- JavaFX podržava samo tehniku sken-konverzije, pa tako i samo modele lokalnog (direktnog) osvetljenja

# Modeli lokalnog osvetljenja

- Modeli lokalnog osvetljenja:
  - Ambijentalno osvetljenje
    - normala na osvetljenu površ se ne uzima u obzir, kao ni smer svetla
  - Difuzno osvetljenje (Lamberov model)
    - uzima se u obzir vektor normale na površ i vektor smera svetla
  - Reflektivno (spekularno) osvetljenje (Fongov model)
    - uzima se u obzir vektor normale, vektor smera svetla i vektor pogleda
- Modeli se kombinuju, efekti se superponiraju
- JavaFX podržava kombinaciju sva tri modela
- OpenGL takođe podržava kombinaciju sva tri modela

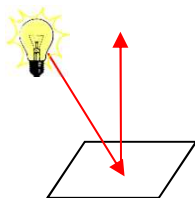
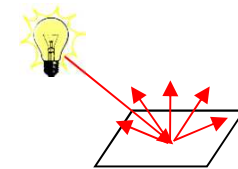


# Model ambijentalnog osvetljenja

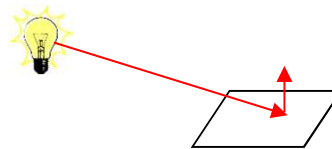
- Ambijentno ili pozadinsko (*background*) svetlo:
  - svetlo koje rasejava okruženje, reflektovano svetlo od objekata u sceni
- Predstavlja veoma uprošćeno globalno osvetljenje (aproksimacija GO)
  - model GO *Radiosity* za preciznije izračunavanje ambijentalnog svetla
- Nezavisno je od:
  - položaja izvora svetla, orijentacije objekta, položaja i orijentacije posmatrača
- Nema usmerenje
- Uzima se da je intenzitet ambijentalnog svetla na svakoj površi  $I_a$
- Različiti materijali mogu da reflektuju različite iznose ambijentalnog svetla
  - koeficijent  $k_a$  ( $0 \leq k_a \leq 1$ ) određuje odnos reflektovanog ambijentalnog svetla i upadnog
- Ambijentalna komponenta reflektovanog svetla na objektu iznosi:
  - $Ambient = k_a * I_a$

# Model difuznog osvetljenja (1)

- Difuzno svetlo:
  - osvetljaj koji površ prima od svetlosnog izvora i reflektuje jednako u svim pravcima
- Nebitno gde se nalazi posmatrač, bitan smer svetla i orijentacija površi
- Potrebno je odrediti iznos svetla koje objekat prima iz izvora svetla
- Zasniva se na Lamberovom zakonu:



prima više svetla

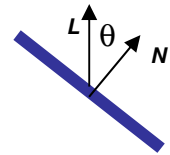


prima manje svetla

# Model difuznog osvetljenja (2)

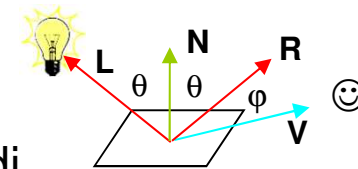
- Lamberov zakon:
  - energija zračenja  $E_i$  koju prima mali deo površine iz izvora svetla je:  
 $E_i = I_d \cos(\theta)$
  - $I_d$  intenzitet difuzne komponente upadnog svetla,
  - $\theta$  ugao između vektora smera svetla ( $\mathbf{L}$ ) i normale na površinu ( $\mathbf{N}$ )
- Različiti materijali mogu da reflektuju različite iznose difuznog svetla
  - koeficijent refleksije difuznog svetla:  
 $k_d$ , ( $0 \leq k_d \leq 1$ )
- Difuzna komponenta reflektovanog svetla na objektu iznosi:

$$\text{Diffuse} = k_d I_d \cos(\theta) = k_d I_d \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}$$



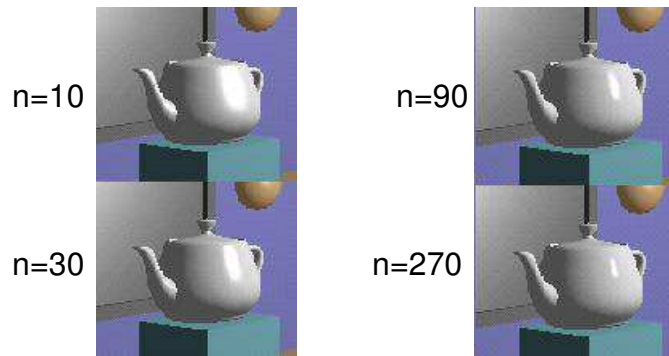
# Fongov model osvetljenja (1)

- Empirijski model lokalnog osvetljenja tačaka na površini objekta
- *Phong reflection model, Phong illumination, Phong lighting*
- Ne treba mešati sa algoritmom Fongovog senčenja (*Phong shading*)
  - algoritam interpolacije
- Predložen 1973.u PhD disertaciji na *University of Utah*
- Fong je zapazio da sjajne površine imaju male istaknute odsjaje, dok mat površine imaju veće površi odsjaja sa blagim prelazima
- Ako bi površina bila idealno reflektivna, odsjaj izvora bi se video samo na pravcu vektora pogleda ( $V$ ) koji zaklapa isti ugao  $\theta$  sa normalom ( $N$ ), kao i vektor svetla ( $L$ ), odnosno za  $\varphi=0$ , ili  $V=R$
- Za neidealnu površinu, za mali ugao  $\varphi$ , odsjaj se vidi
  - intenzitet odsjaja pada sa povećanjem  $\varphi$



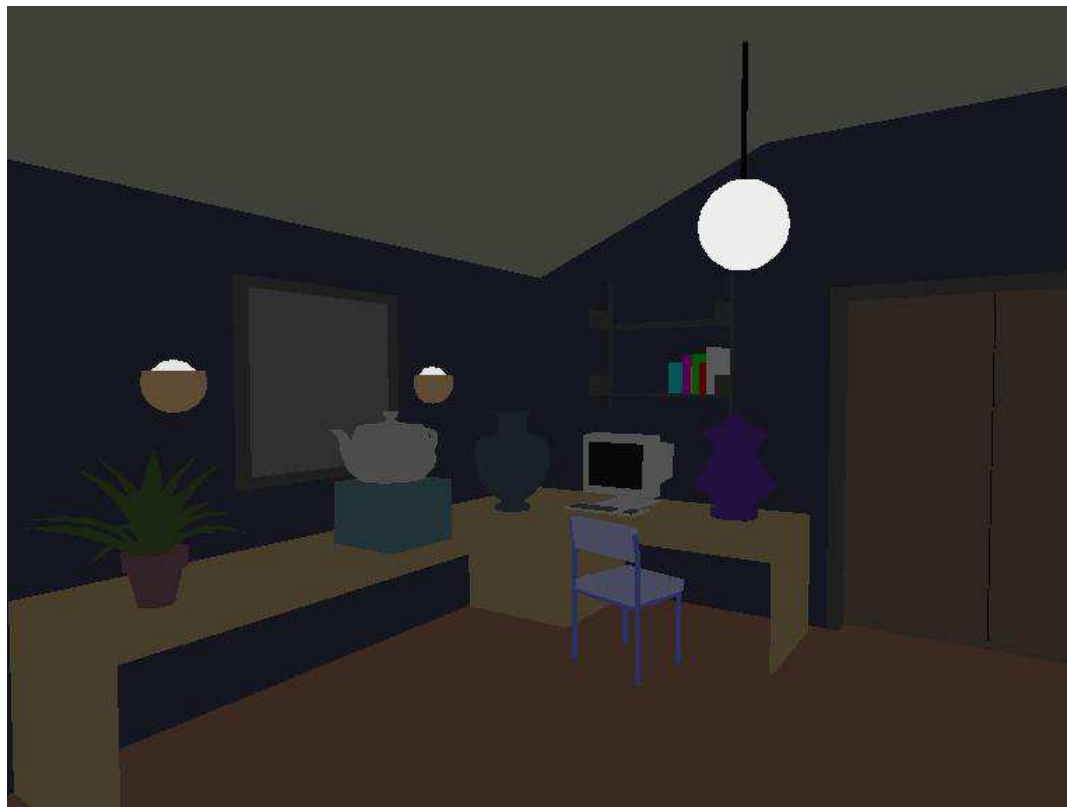
# Fongov model osvetljenja (2)

- Fongov model (spekularnog) osvetljenja:  
$$Specular = k_s * I_s * \cos^n(\varphi) = k_s * I_s * (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n$$
  - $k_s$  koeficijent spekularne refleksije
  - $I_s$  intenzitet spekularne komponente upadnog svetla
  - $\varphi$  ugao između vektora pogleda ( $\mathbf{V}$ ) i vektora idealne refleksije ( $\mathbf{R}$ )
  - $n$  koeficijent sjaja (refleksivnosti materijala)
- Što je veće  $n$  (visoka refleksivnost) to je manja vrednost  $\cos^n(\varphi)$ ,
  - odsjaj je bliži idealnom, rasipanje svetla je manje



Preuzeto iz A.Watt  
3D Computer Graphics

# Ambijentalno osvetljenje - primer



Preuzeto iz A.Watt  
3D Computer Graphics

## + difuzno osvetljenje - primer



Preuzeto iz A.Watt  
3D Computer Graphics

# + spekularno osvetljenje - Primer



Preuzeto iz A.Watt  
3D Computer Graphics



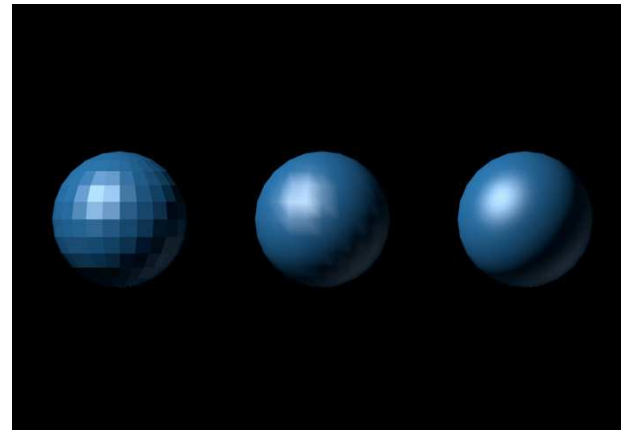
# Teksture i globalno osvetljenje



Preuzeto iz A.Watt  
3D Computer Graphics

# Modeli senčenja

- Prilikom rasterizacije poligona vrši se određivanje nijanse piksela na (horizontalnoj) liniji skeniranja
- U određenim tačkama poligona koji se isrtava primenjuje se odgovarajući model osvetljenja
- Tri algoritma senčenja:
  - ravnomerno,
  - Guroovo (Gouraud)
  - Fongovo (Phong)



# Ravnomerno (*flat*) senčenje

- Svetlo se izračunava samo u jednoj tački pologona
  - uzima se u obzir normala i osobina materijala u prvom temenu
- Ceo planarni poligon (svi njegovi pikseli) se senči istom nijansom
- Dobra strana:
  - brzina, izračunava se samo jedna nijansa za ceo poligon
- Loše:
  - dobijaju se oštre ivice poligona, realističnost je slaba
  - izražen “Mahov efekat traka” (sledeći slajd)
- Kada može da se koristi:
  - kada su poligoni dovoljno mali (fina mreža)
  - kada je izvor svetla dovoljno udaljen
  - kada je posmatrač dovoljno udaljen

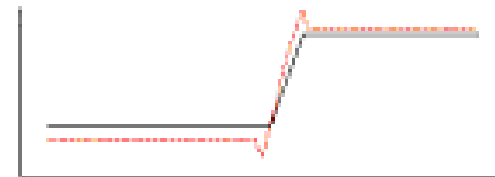
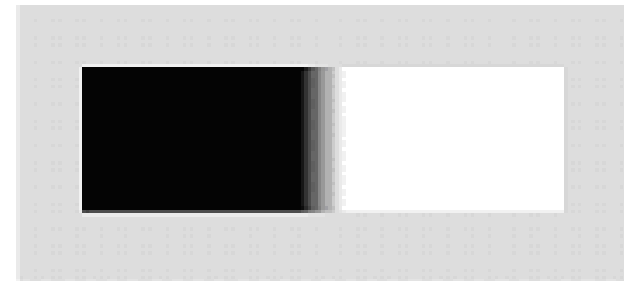


# Mahov efekat traka

- Ljudsko čulo vida pojačava efekat naglih prelaza u nijansi



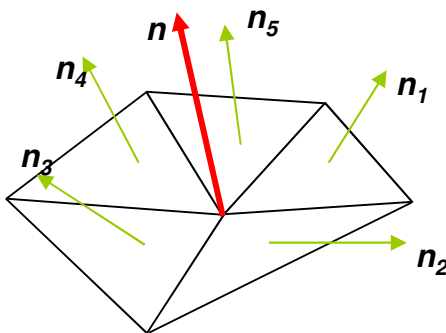
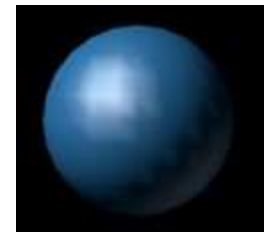
- Smanjivanje efekta traka
  - ukloniti diskontinuitete vrednosti nijanse
  - izračunati svetlo u više tačaka površi, pa raditi inetrpolaciju
  - dobijaju se blagi prelazi, umanjuje se Mahov efekat traka
  - crvena linija na grafikonu – percepcija nijanse



- Dva algoritma (modela) senčenja koja rešavaju gornji problem
  - Guroovo senčenje
  - Fongovo senčenje

# Guroovo senčenje

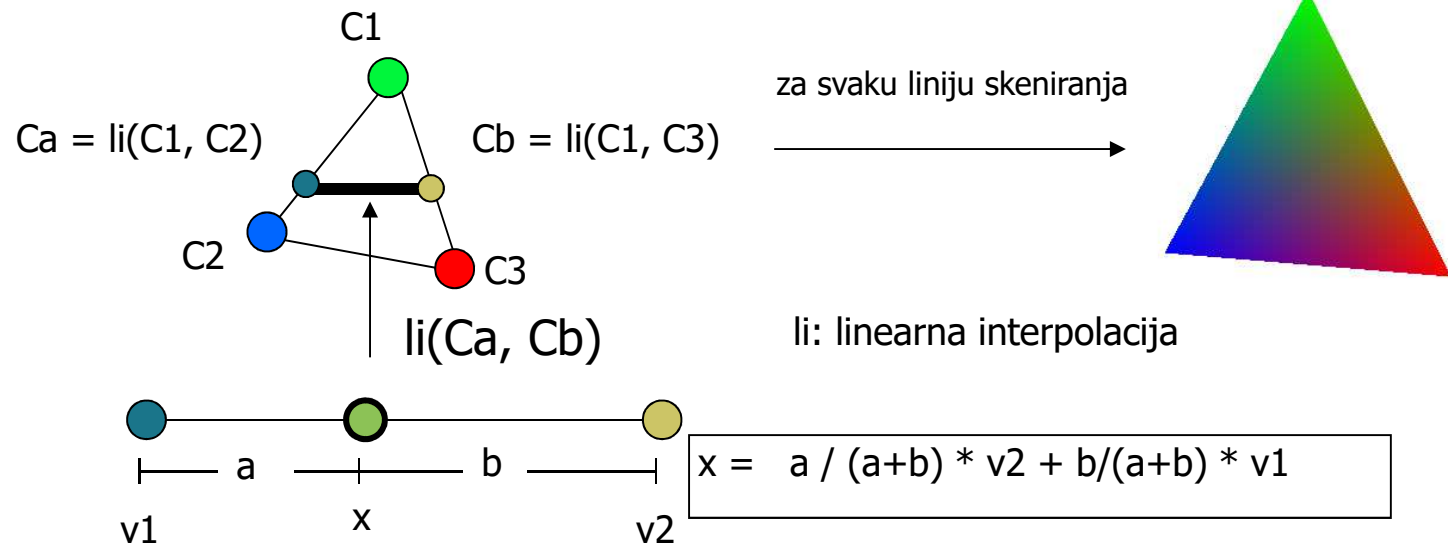
- Nijansa se izračunava u temenima poligona, pa se u pikselima poligona uzima interpolirana vrednost boje
- Interpoliranje se radi prvo duž ivica poligona, a zatim duž svake linije skeniranja pri popunjavanju poligona
- Dobija se kontinualna promena nijanse unutar poligona
- Problem – ogledanje izvora je tačno samo u temenima
- Mogućnost da se u svakom temenu poligona normala izračuna usrednjavanjem normala susednih poligona



$$n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) / 5$$

Svetlost i senčenje

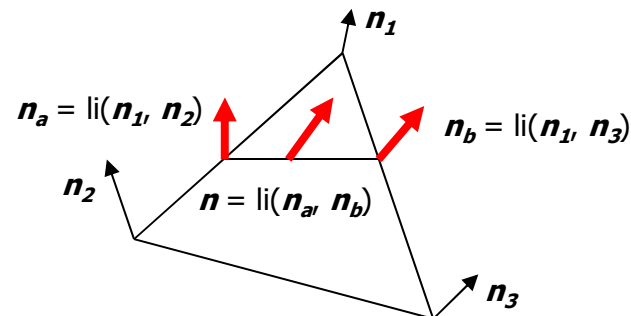
# Interpolacija



- Za izračunavanje krajnjih tačaka linije skeniranja može da se koristi interpolacija po y

# Fongovo senčenje

- Izračunava se osvetljaj svakog piksela unutar poligona
  - Guroovo senčenje – boja po pikselu
  - Fongovo senčenje – svetlo po pikselu
- Umesto interpolacije boje vrši se interpolacija normale
- Potrebne su normale u svakom pikselu
  - ne obezbeđuje ih korisnik, moraju se računati
  - korisnik obezbeđuje samo normale u temenima
  - algoritam interpolira normale i računa svetlo u toku rasterizacije poligona
  - račun se sprovodi u koordinatnom sistemu realnog sveta



Svetlost i senčenje

# Modeli globalnog osvetljenja

- Ray casting
- Recursive ray tracing
- Radiosity
- Radiance
- Photon mapping
- ...