

Računarska grafika

Svetlost i senčenje

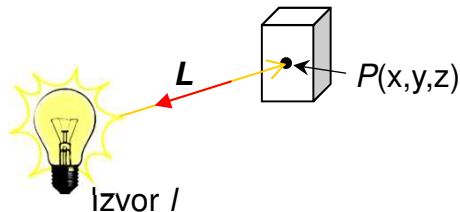


Uvod

- 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 (Gauraud) senčenje
 - Fongovo (Phong) senčenje

Izvori svetla

- Izvor se karakteriše energijom (E) i talasnom dužinom (λ) 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)



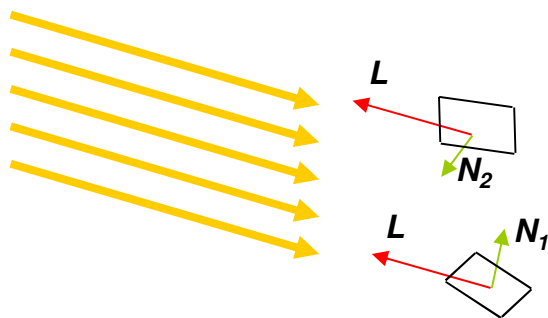
Ambijentalno svetlo

- 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

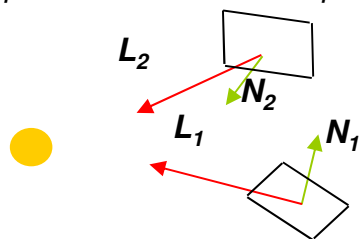
Svetlost i senčenje

13.04.2018.

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

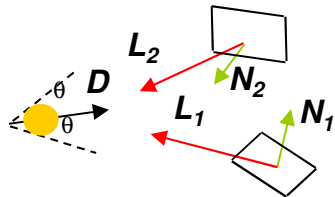
- Izvor svetla zrači tako da intenzitet opada sa povećanjem odklona zraka od vektora usmerenja reflektora \mathbf{D}
- Može da bude ograničeno zračenje na kupu sa osom na pravcu \mathbf{D}
- Na primer, reflektorska sijalica (reflektor)
- Definiše se preko intenziteta emitovanih RGB komponenti svetla 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 dohvatanje 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

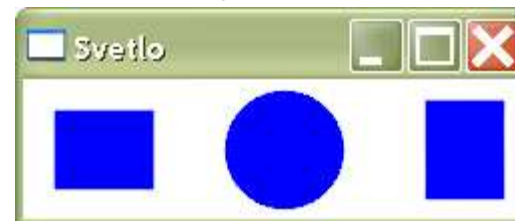
- Objekti ambijentalnog svetla i svetla tačkastog izvora se stvaraju
 - podrazumevanim konstruktorom ili
 - konstruktorom čiji je jedini parametar boja svetla
`AmbientLight (Color boja);`
`PointLight (Color boja);`
- Objekat tačkastog izvora se može pozicionirati u sceni
 - postavljanjem translacionih 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:

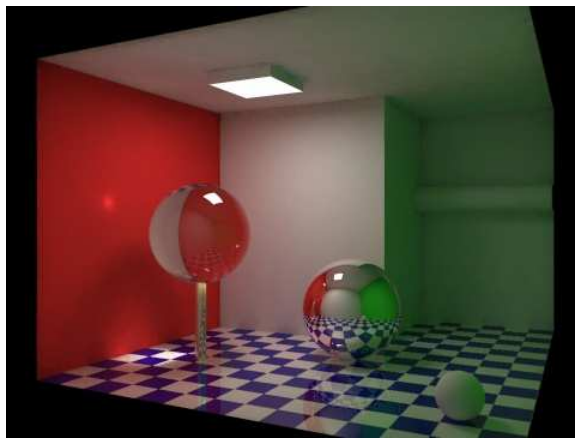


Modeli osvetljenja

- 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

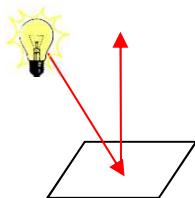
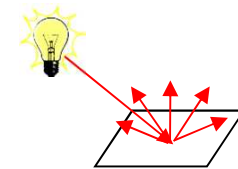
- Modeli lokalnog osvetljenja:
 - Ambijentalno osvetljenje
 - normala na osvetljenu površ se ne uzima u obzir, kao ni smer svetla
 - Difuzno osvetljenje (Lamberov model)
 - uzima se u obzir vektor normale na površ i vektor smera svetla
 - Reflektivno (spekularno) osvetljenje (Fongov model)
 - uzima se 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

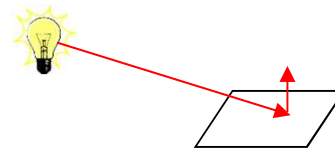
- Ambijentno ili pozadinsko (*background*) svetlo:
 - svetlo koje rasejava okruženje, reflektovano svetlo od objekata u sceni
- Predstavlja veoma uprošćeno globalno osvetljenje (aproksimacija GO)
 - model GO *Radiosity* za preciznije izračunavanje ambijentalnog svetla
- Nezavisno je od:
 - položaja izvora 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

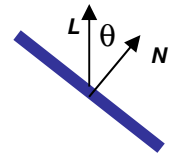


prima manje svetla

Model difuznog osvetljenja (2)

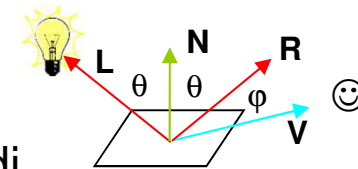
- Lamberov zakon:
 - energija zračenja E_i koju prima mali deo površine iz izvora svetla je:
 $E_i = I_d \cos(\theta)$
 - I_d intenzitet difuzne komponente upadnog svetla,
 - θ ugao između vektora smera svetla (\mathbf{L}) i normale na površinu (\mathbf{N})
- Različiti materijali mogu da reflektuju različite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

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



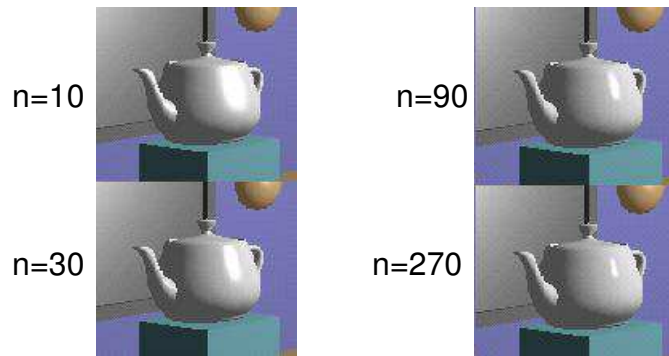
Fongov model osvetljenja (1)

- 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 θ sa normalom (N), kao i vektor svetla (L), odnosno za $\varphi=0$, ili $V=R$
- Za neidealnu površinu, za mali ugao φ , odsjaj se vidi
 - intenzitet odsjaja pada sa povećanjem φ



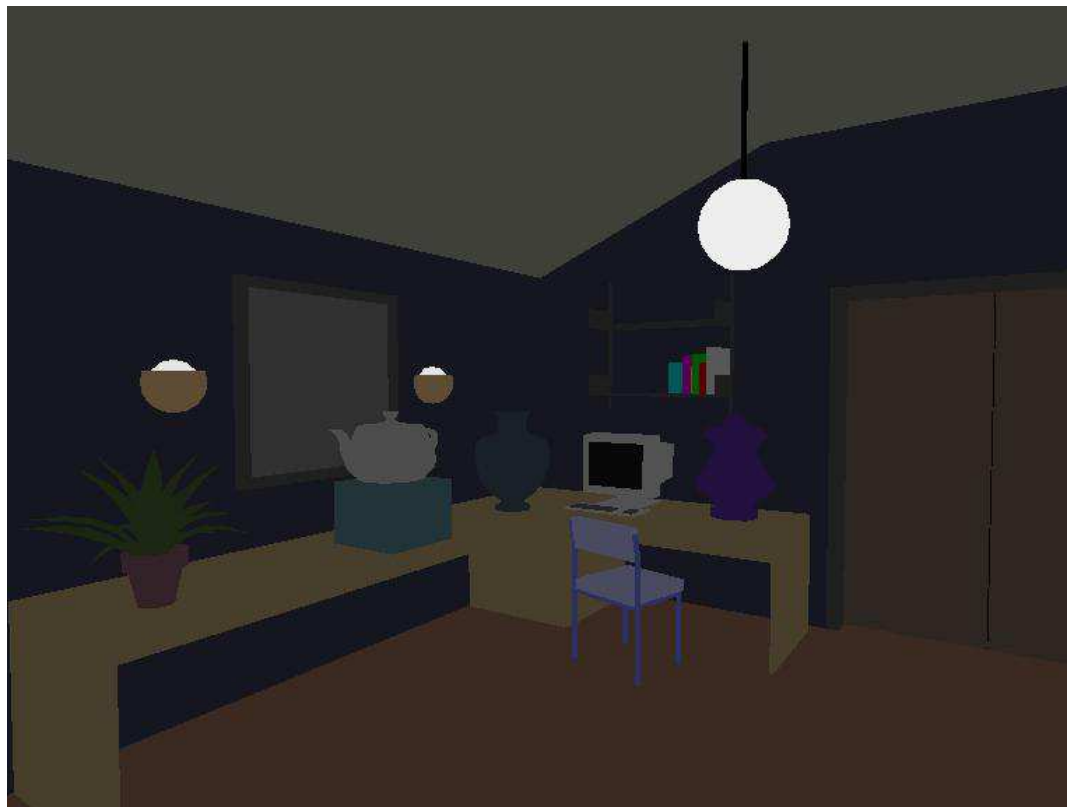
Fongov model osvetljenja (2)

- 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
 - φ 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

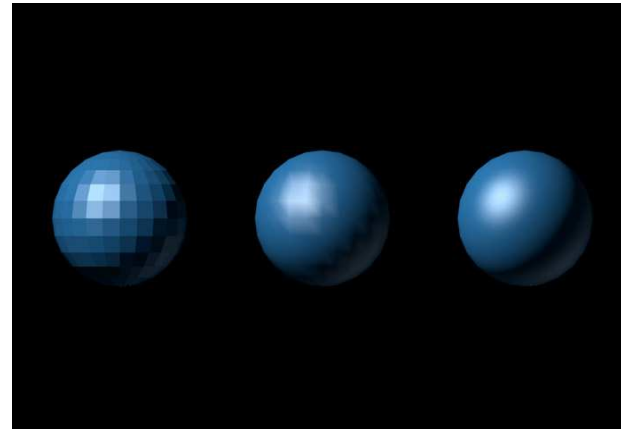
Teksture i globalno osvetljenje



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

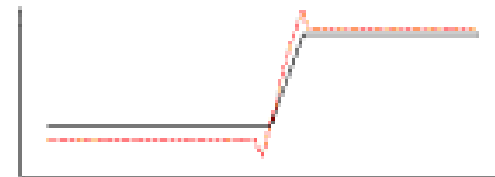
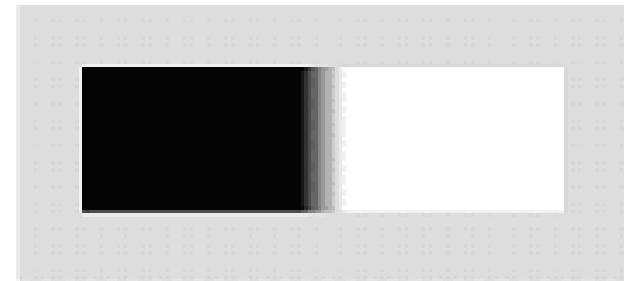


Mahov efekat traka

- Ljudsko čulo vida pojačava efekat naglih prelaza u nijansi



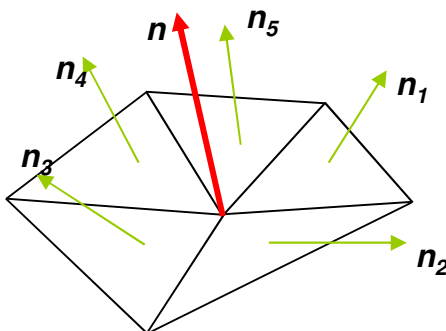
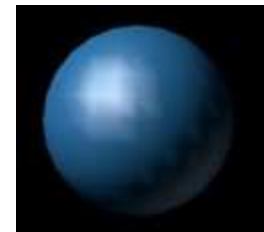
- Smanjivanje efekta traka
 - ukloniti diskontinuitete vrednosti nijanse
 - izračunati svetlo u više tačaka površi, pa raditi inetrpolaciju
 - dobijaju se blagi prelazi, umanjuje se Mahov efekat traka
 - crvena linija na grafikonu – percepcija nijanse



- 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

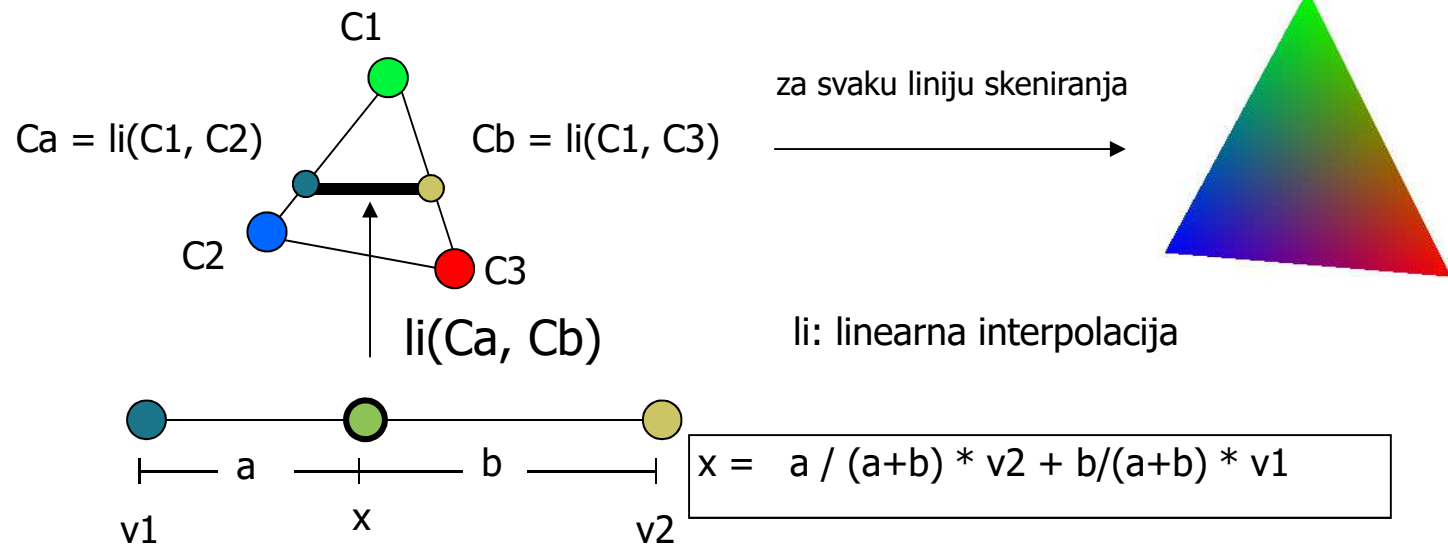


$$n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) / 5$$

Svetlost i senčenje

13.04.2018.

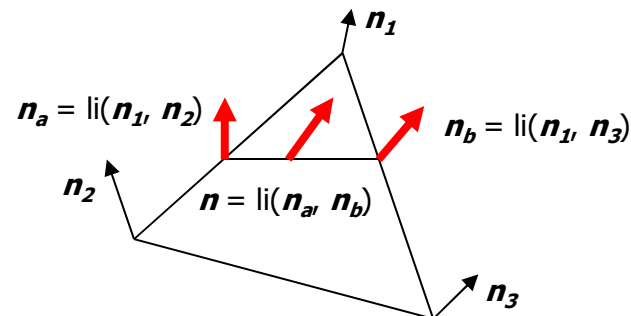
Interpolacija



- 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
- ...