

Računarska grafika
(20ER7002)

Osvetljenje i senčenje

Predavanja



Realnost prikaza

- Uklanjanje sakrivenih ivica i površina
- Boje
- **Osvetljenje**
- **Senke**



Osvetljenje i senčenje



- Realističnost prikaza donosi potrebu za modeliranjem mnogih fizičkih pojava, kao što su: refleksija, transparentnost, refrakcija, potpuno ili delimično zaklanjanje svetlosti (senke), tipova izvora svetlosti, karakteristike materijala, itd.
- Problem osvetljenja i senčenja je znatno komplikovaniji od problema vidljivosti.

Modeli osvetljenja i senčenja

- Postoji više **modela osvetljenja** (*illumination*) i **modela senčenja** (*shading*).
- **Model senčenja** je širi okvir i on koristi **model osvetljenja** (neki modeli senčenja pozivaju/koriste model osvetljenja za svaki piksel slike, dok drugi pozivaju model osvetljenja samo za neke piksele, dok se za preostale koristi interpolacija).
- Neka od rešenja za problem osvetljenja zasnovana su na iskustvu i eksperimentima i nisu utemeljena u fizici, ali daju dovoljno dobre rezultate, a brzo se izračunavaju.

Modeli osvetljenja

- Samoosvetljenje
- Ambijentalno svetlo
- Tačkasti izvori svetla
- Direkciono svetlo
- Spot svetlo
- Prošireni izvori svetla

Samoosvetljenje

- Ovo je najjednostavniji model osvetljenja.
- Svakoj tački objekta pridružen je isti (inherentni) intenzitet svetlosti, kao da sam objekat isijava svetlost.
- Intenzitet osvetljenja (I) zavisi samo od koeficijenta k_i dodeljenog objektu kao mera samoosvetljenosti:

$$\triangleright I = k_i$$



Ambijentalno osvetljenje

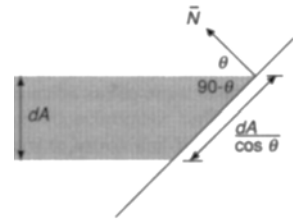
- **Ambijentalno svetlo** je difuzno, bez usmerenog izvora, koje je proizvod višestrukog odbijanja svetlosti od svih površina prisutnih u okruženju.
- Ako pretpostavimo da se svetlost rasprostire jednako u svim smerovima po svim objektima, jednačina osvetljenja je za svaki objekat:

$$I = I_a k_a$$

- ▷ I_a - (konstantni) **intenzitet ambijentalnog svetla**,
- ▷ k_a - **koeficijent ambijentalne refleksije** objekta (u opsegu [0..1])



Difuziona refleksija



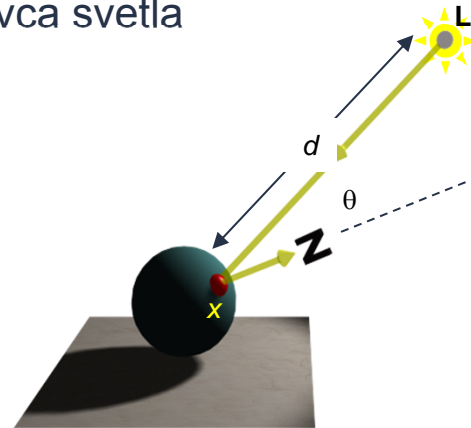
- **Tačkasti izvor svetla** ravnomerno širi zrake u svim pravcima iz jedne tačke.
- **Difuzna** ili **lambertovska refleksija** (odbijanje svetlosti od matiranih, hrapavih površina). Ovakve površine izgledaju jednako osvetljene iz svih uglova posmatranja i njihova osvetljenost zavisi samo od ugla θ između pravca svetla \mathbf{L} i pravca normale \mathbf{N} . Jednačina osvetljenosti u ovom modelu je:

$$I = I_p k_d \cos \theta$$

- ▷ I_p – jačina tačkastog (pozicionog) izvora svetlosti,
- ▷ k_d – koeficijent difuzne refleksije materijala (u opsegu [0..1]) i
- ▷ θ – ugao između pravca svetla i pravca normale.

- Ako su vektori $\bar{\mathbf{L}}$ i $\bar{\mathbf{N}}$ normalizovani, onda je:

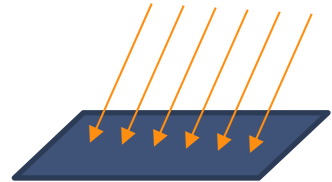
$$I = I_p k_d (\bar{\mathbf{L}} \cdot \bar{\mathbf{N}})$$



Difuziona refleksija

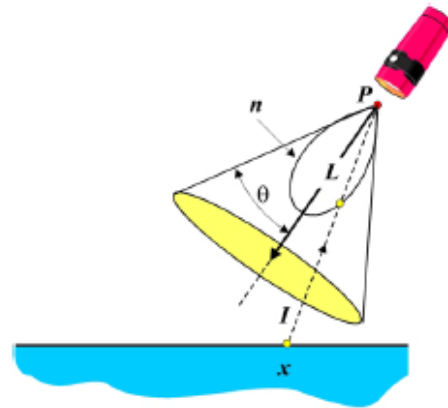
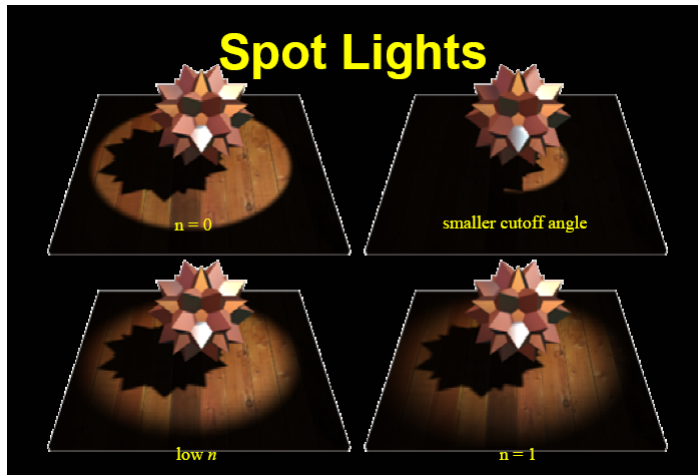
- Ukoliko je izvor svetla dovoljno udaljen od svih objekata, možemo da smatramo da je vektor \mathbf{L} konstantan za sve objekte i takav izvor svetla zovemo **direkcionni izvor svetla**.
- Primenom samo difuzione refleksije, objekti izgledaju kao da su osvetljeni samo sa jedne strane i da se nalaze u mračnoj prostoriji. Realističnost se povećava dodavanjem ambijentalnog osvetljenja:

$$\triangleright I = I_a k_a + I_p k_d (\bar{\mathbf{L}} \cdot \bar{\mathbf{N}})$$



Reflektor (spot light)

Reflektor (spot light) je tačkasti izvor svetlosti čiji je opseg delovanja ograničen kupastim zastorom.



Slabljenje

- Slabljenja osvetljenja sa rastojanjem, često se modelira uvođenjem dodatnog faktora atenuacije f_{att} u jednačinu intenziteta osvetljenosti:

$$\triangleright I = I_a k_a + f_{att} I_p k_d (\bar{L} \cdot \bar{N})$$

- Iako količina emitovane energije opada sa kvadratom rastojanja ($f_{att}=1/d^2$), primena pojednostavljenog modela osvetljena ne daje zadovoljavajuće efekte. Zato se za faktor atenuacije najčešće koristi sledeća formula:

$$\triangleright f_{att} = \min(1/(c_1 + c_2 d + c_3 d^2), 1)$$

Obojena svetlost

- Prethodni modeli i jednačine razmatrali su samo monohromatsku svetlost. Obojena svetlost se obično obrađuje tako što se posebno obrađuju jednačine za njene tri komponente.
- Ako (O_{dR}, O_{dG}, O_{dB}) predstavlja crvenu, zelenu i plavu difuzionu komponentu boje objekta u RGB sistemu boja, osvetljenje se može definisati pomoću tri primarne komponente (I_{pR}, I_{pG}, I_{pB}) .
- Na primer, crvena komponenta ima sledeći oblik:

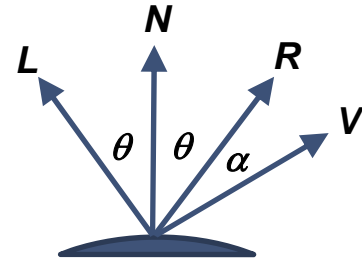
$$\triangleright I_R = I_{aR} k_a O_{dR} + f_{att} I_{pR} k_d O_{dR} (\bar{L} \cdot \bar{N})$$

- Umseto $k_a O_{dX}$ i $k_d O_{dX}$ koeficijenata, mogu se koristiti k_{aX} i k_{dX} :

$$\triangleright I_R = I_{aR} k_{aR} + f_{att} I_{pR} k_{dR} (\bar{L} \cdot \bar{N})$$

Spekularna refleksija

- **Spekularna refleksija** se javlja na sjajnim objektima i sem od položaja izvora svetlosti i orijentacije normale, zavisi i od **položaja posmatrača**.
- **Phong** je 1975. predložio model za nesavršene reflektore – maksimalna spekularna refleksija se dešava kada je $\alpha=0$ (ugao između vektora refleksije R i pravca posmatrača V) i rapidno opada sa $\cos^n \alpha$, gde je n eksponent **spekularne refleksivnosti** materijala.



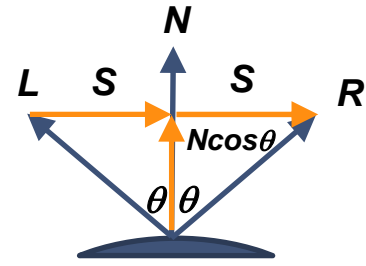
$$\triangleright I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + f_{att} I_{p\lambda} [k_d O_{d\lambda} \cos \theta + W(\theta) \cos^n \alpha]$$

- Deo reflektovane energije $W(\theta)$, koji zavisi od upadnog ugla, obično se smatra konstantnim i zamenjuje sa k_s (koeficijent spekularne refleksije)

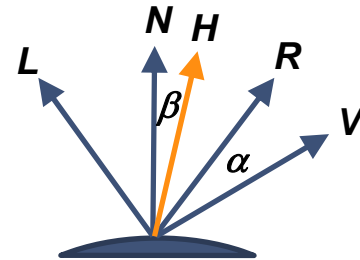
$$\triangleright I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + f_{att} I_{p\lambda} [k_d O_{d\lambda} (\bar{L} \cdot \bar{N}) + k_s (\bar{R} \cdot \bar{V})^n]$$

Spekularna refleksija

- Spekularna refleksivnost zavisi od svojstva materijala i može imati drugačiju boju ($O_{s\lambda}$) od difuzione
 - $$I_{\lambda} = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + f_{att} I_{p\lambda} [k_d O_{d\lambda} (\bar{L} \cdot \bar{N}) + k_s O_{s\lambda} (\bar{R} \cdot \bar{V})^n]$$
- Vektor refleksije računa se po sledećoj formuli:
 - $$\mathbf{R} = \bar{\mathbf{N}} \cos\theta + \bar{\mathbf{S}} = 2\bar{\mathbf{N}} \cos\theta - \bar{\mathbf{L}} = 2\bar{\mathbf{N}} (\bar{\mathbf{N}} \cdot \bar{\mathbf{L}}) - \bar{\mathbf{L}}$$
- Alternativna formula koristi **halfway** vektor \mathbf{H} , koji se računa kao:
 - $$\mathbf{H} = (\bar{\mathbf{L}} + \bar{\mathbf{V}}) / |\bar{\mathbf{L}} + \bar{\mathbf{V}}|$$
- Faktor spekularne refleksije je u tom slučaju $(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n$ i izračunava se mnogo efikasnije, kada su izvor svetlosti i posmatrač u beskonačnosti, jer je \mathbf{H} konstantno. Eksponent spekularne refleksije (n) se razlikuje za ovu formulu, jer uglovi α i β nisu jednaki.



$$L + S = N \cos\theta$$



Prošireni izvori svetla

- Za razliku od tačkastih izvora svetla, **prošireni** ili **distribuirani** izvori svetla imaju površinu i, kao posledicu, daju mekše senke.



Rendering

- **Rendering** je postupak određivanja odgovarajuće boje piksela koji je pridružen nekom objektu u sceni.
- Ovaj postupak je složen i zavisi od geometrije objekta u toj tački (vektor normale), geometrije, tipa, pozicije i boje svetlosnog izvora, pozicije posmatrača, materijala od koga je objekat napravljen (refleksija svetlosti), uticaja drugih faktora (magla, dim,...).
- Osnovni modeli kod renderinga su modeli **osvetljavanja** i **senčenja** (*illumination and shading*).

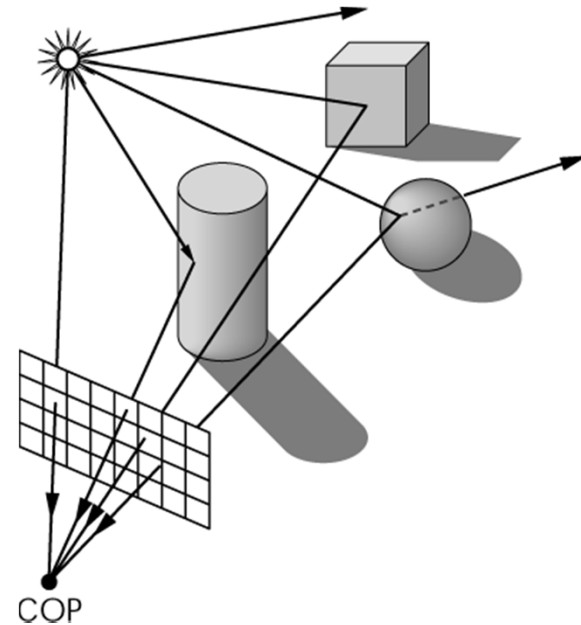
Modeli osvetljavanja i senčenja

Lokalni pristup

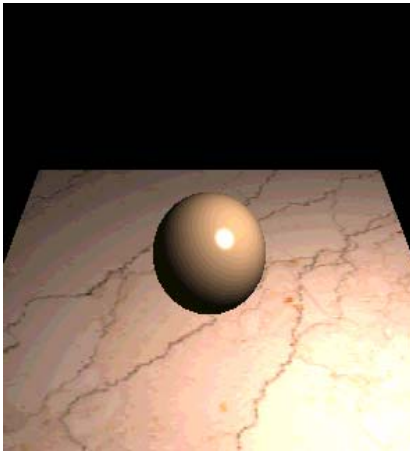
- ▷ Razmatra samo osvetljenje od lokalnih izvora svetlosti i ne uzima se u obzir refleksija od ostalih objekata u sceni.

Globalni pristup

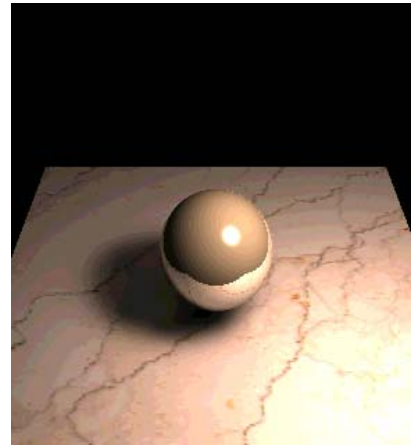
- ▷ Uzima se u obzir i refleksija od ostalih objekata u sceni.



Modeli osvetljavanja i senčenja



Lokalni pristup



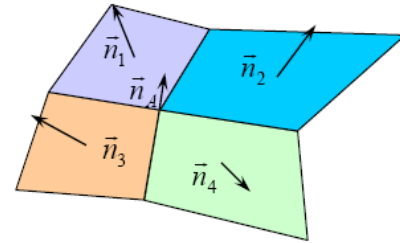
Globalni pristup

Lokalni pristup

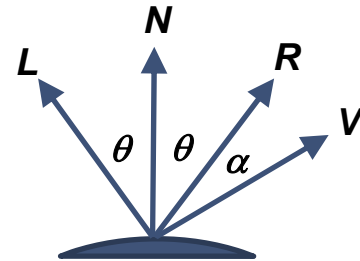
- **Konstantno** senčenje (*flat shading*)
- **Gouraud**-ovo senčenje
- **Phong**-ovo senčenje

Konstantno senčenje

- **Najjednostavniji** model senčenja
- Osvetljenje se izračunava samo jednom, a zatim primenjuje na čitav poligon
- Ovaj pristup je validan kada:
 - ▷ Izvor svetlosti u beskonačnosti, pa je $\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}$ konstantno na površini čitavog poligona
 - ▷ Posmatrač je u beskonačnosti, pa je $\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}$ konstantno
 - ▷ Poligon predstavlja ravnu površinu i nije aproksimacija za krivu površ
- Ako neki od prethodnih uslova nije zadovoljen, treba odabrati tačku za koju će biti izračunato \mathbf{L} i \mathbf{V} . To može biti centar poligona, ali je obično **prvo** ili **zadnje** teme.



$$\bar{n}_A = \frac{\bar{n}_1 + \bar{n}_2 + \bar{n}_3 + \bar{n}_4}{4}$$



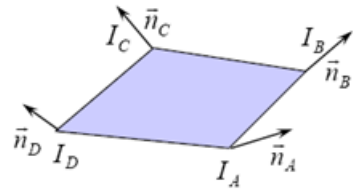
Konstantno senčenje

- Dobra strana ove metode je velika brzina, ali je veliki nedostatak prevelika istaknutost ivica.



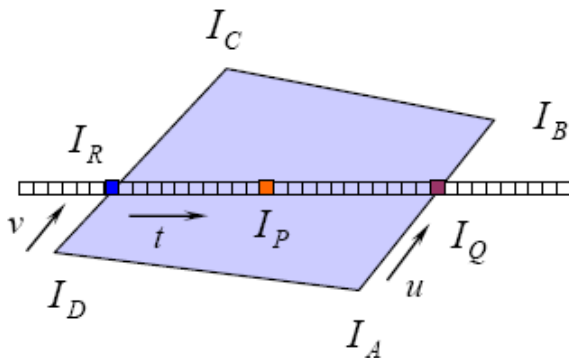
Gouraud senčenje

- Spada u grupu **interpolacionih senčenja**.
- Wylie, Romney, Evans i Erdahl su 1967. prvi predložili interpolaciono senčenje trougla na osnovu vrednosti u njegovim temenima.
- **Gouraud** je 1971. generalizovao tehniku za bilo koji poligon.
- Direktno primenljivo na **scan-line algoritam** (koji se koristi za rasterizaciju i određivanje preklapanja po dubini).
- Iako interpolacija dubine jeste fizički korektna, interpolacija senčenja **nije**.



Gouraud senčenje

- **Gouraud senčenje** je senčenje **interpolacijom intenziteta** ili **boja**.
- Izračunavanje intenziteta osvetljenja, tj. boje, vrši se u temenima poligona, a zatim se vrednosti najpre duž ivica poligona, a zatim duž sken-linije (tokom rasterizacije).



Interpolacija duž ivica

$$I_Q = (1-u)I_A + uI_B, \quad u = \frac{\overline{AQ}}{\overline{AB}}$$

$$I_R = (1-v)I_D + vI_C, \quad v = \frac{\overline{DR}}{\overline{DC}}$$

Interpolacija duž sken-linije:

$$I_P = (1-t)I_R + tI_Q, \quad t = \frac{\overline{RP}}{\overline{RQ}}$$

Gouraud senčenje

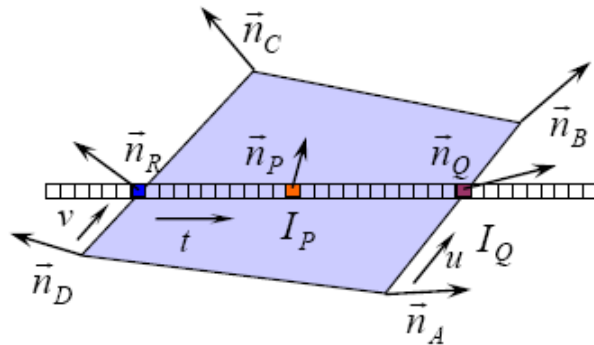
- Rezultat ovakvog postupka su vrlo glatki prelazi.
- Postupak je sporiji od prethodnog, ali još uvek dovoljno brz za praktičnu upotrebu.



Phong senčenje



- **Phong senčenje** je senčenje **interpolacijom vektora normala**.
- Metod je sličan Gouraud metodu, ali se ne interpoliraju boje, već sve tri komponente vektora normala, najpre duž ivica poligona, a zatim duž sken-linije.



Interpolacija duž ivica

$$\vec{n}_Q = (1-u)\vec{n}_A + u\vec{n}_B, \quad u = \frac{\overline{AQ}}{\overline{AB}}$$

$$\vec{n}_R = (1-v)\vec{n}_D + v\vec{n}_C, \quad v = \frac{\overline{DR}}{\overline{DC}}$$

Interpolacija duž sken-linije:

$$\vec{n}_P = (1-t)\vec{n}_R + t\vec{n}_Q, \quad t = \frac{\overline{RP}}{\overline{RQ}}$$

Poređenje



Flat

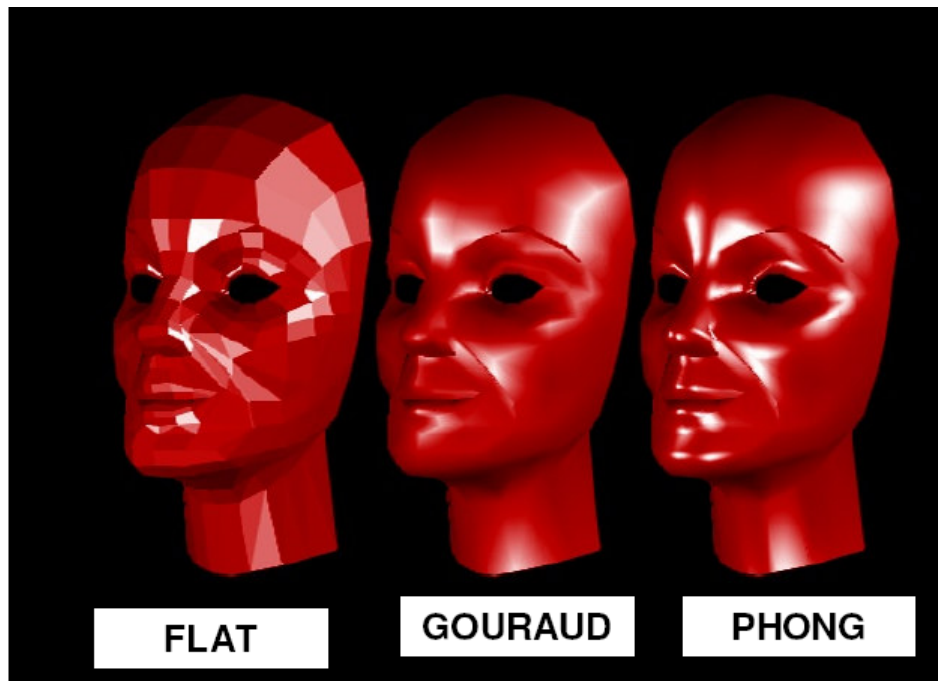


Gouraud



Phong

Poređenje

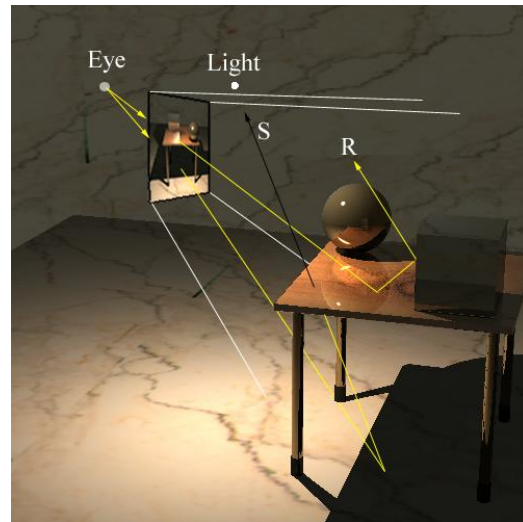


Globalni pristup

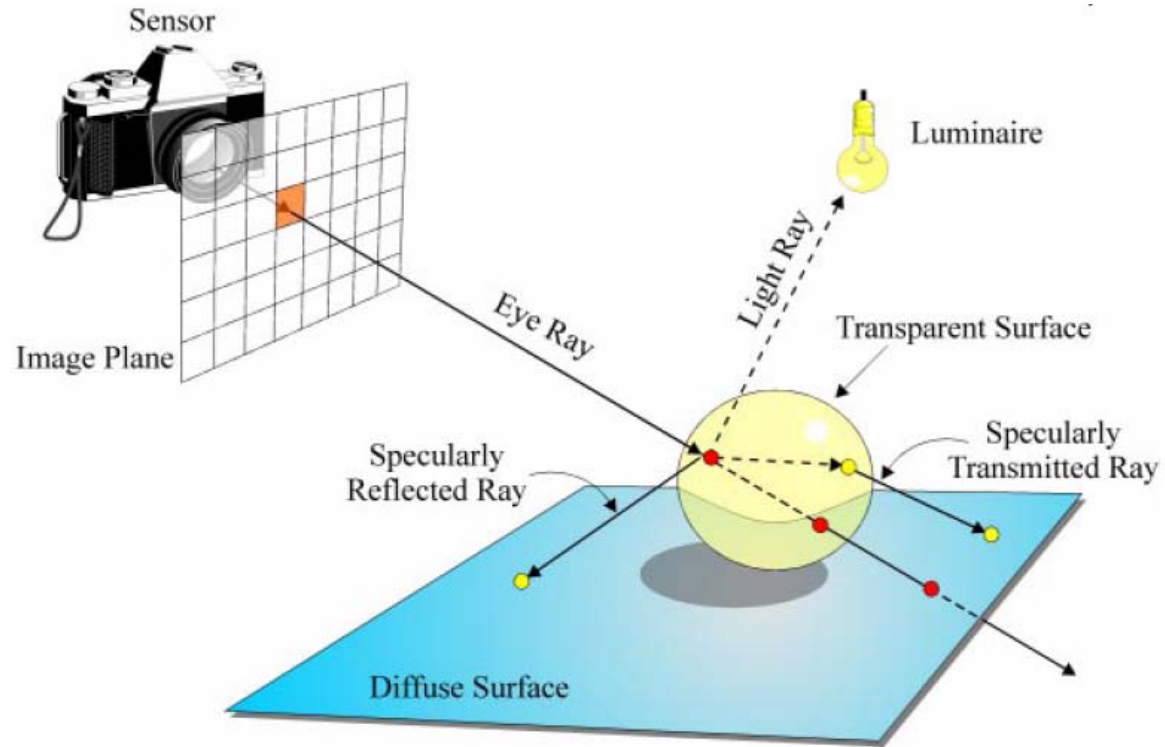
- Metod praćenja zraka (**Ray-tracing**)
- Metod isijavanja (**Radiosity method**)
- **Path-tracing** metod

Ray-tracing

- Uzima u obzir senke, refleksiju (odbijanje zraka), i refrakciju (prelamanje zraka kroz transparentne objekte).
- Podrazumeva tačkaste izvore svetlosti.
- Zavisí od položaja posmatrača

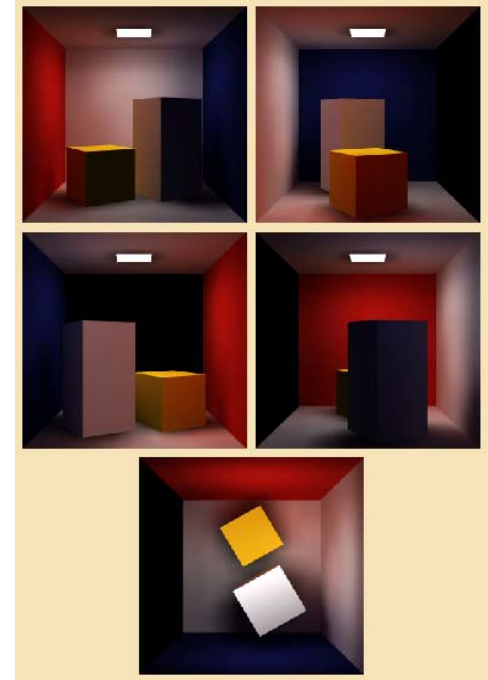


Ray-tracing



Radiosity metod

- Uzima u obzir senke, refleksiju (odbijanje zraka), i refrakciju (prelamanje zraka kroz transparentne objekte).
- Svetlosni izvori mogu da budu proizvoljnih dimenzija i geometrije.
- Ne zavisi od položaja posmatrača.

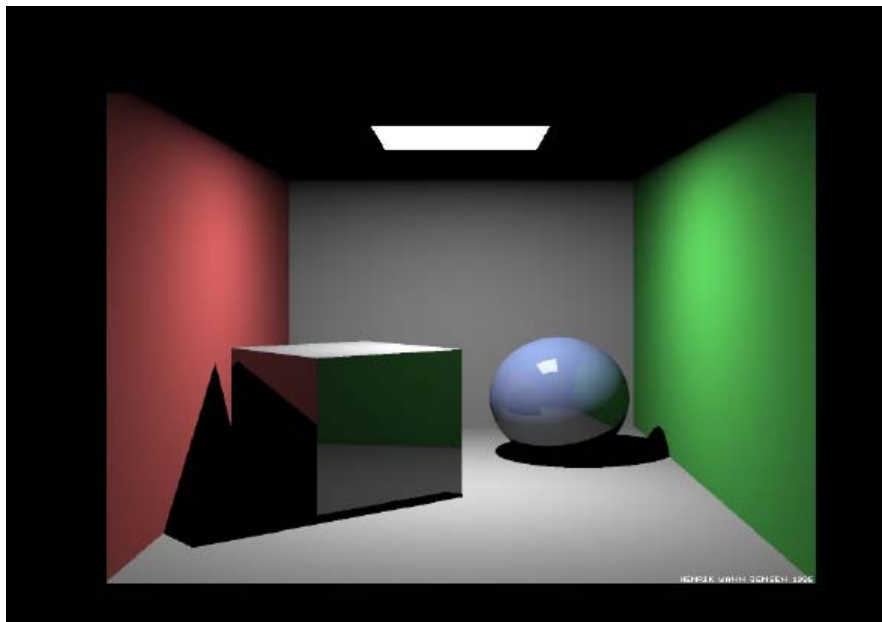


Path-tracing metod

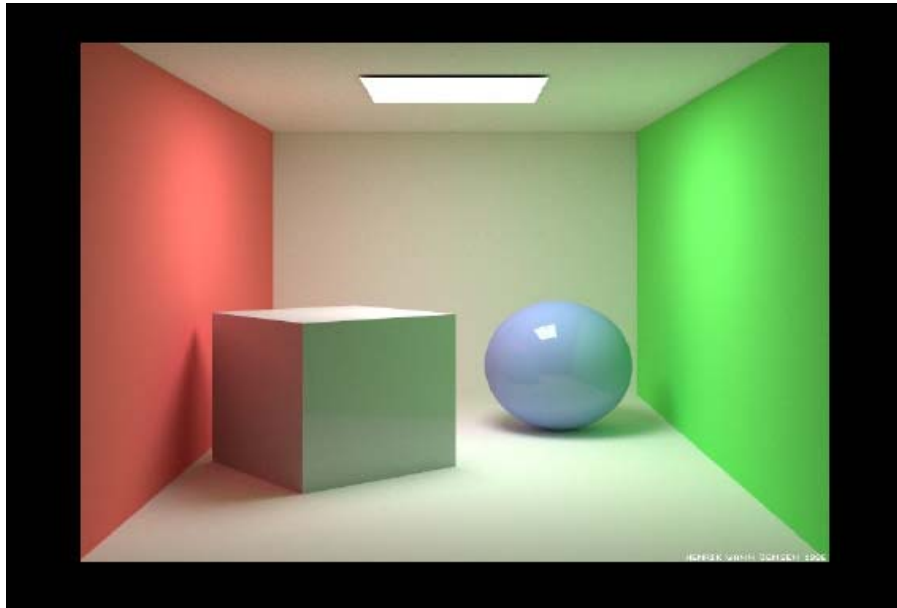
- Najbolji metod, ali i najzahtevniji.
- Koristi Monte-Carlo metodu za upravljanje geometrijom, refleksijom i osvetljajem.



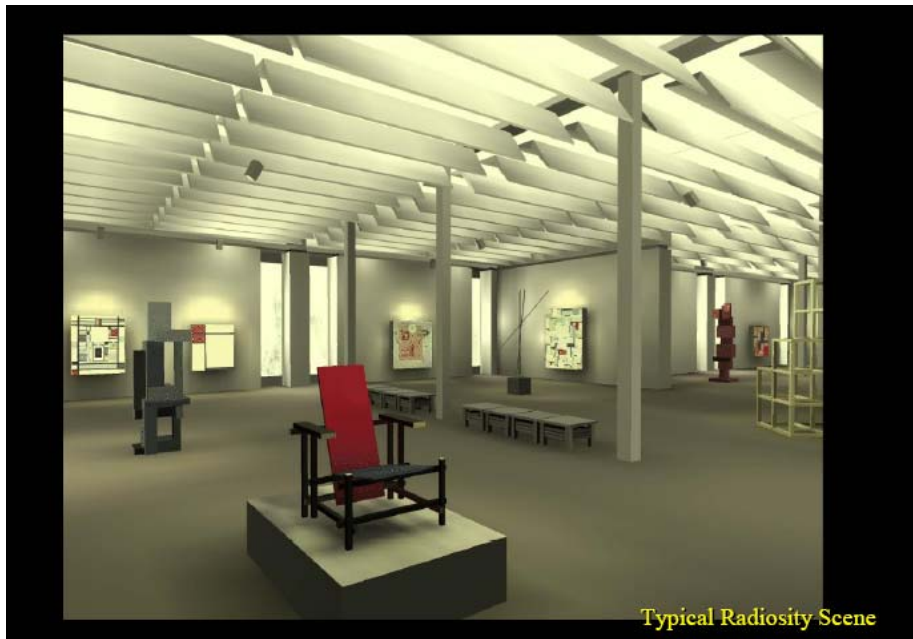
Poređenje - Ray-tracing



Poređenje - Path-tracing



Radiosity

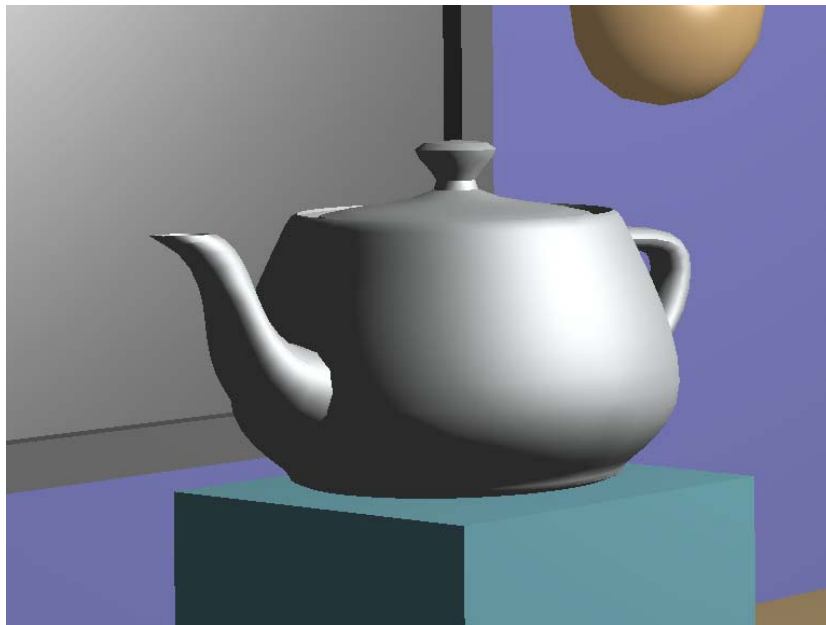


Typical Radiosity Scene

Path-tracing



Uticaj materijala - aluminijum



Uticaj materijala - bronza



Uticaj materijala - hrom



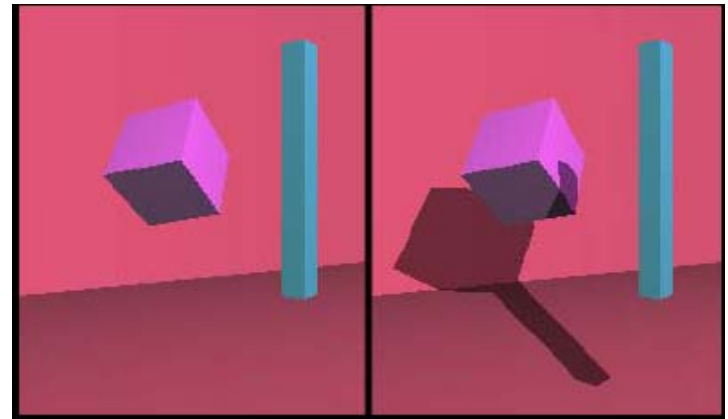
Teksture

- Korišćenje tekstura čini scene realističnijim



Senke

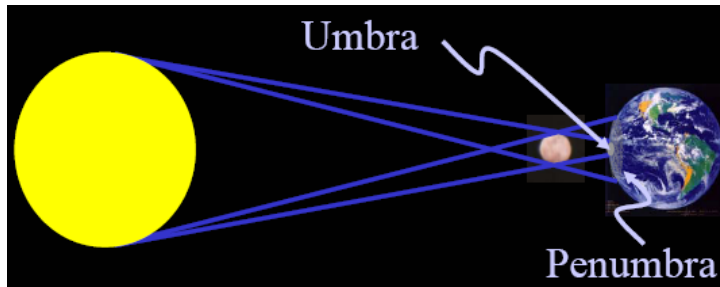
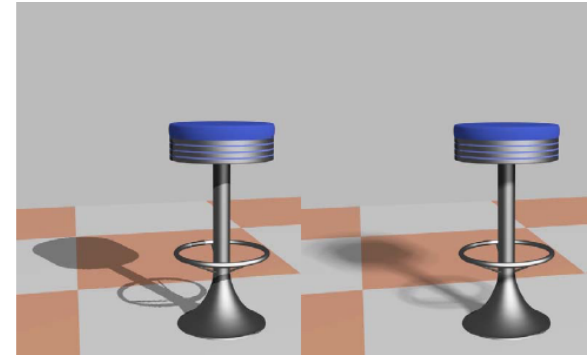
- Doprinosе realističnosti scene.
- Omogućavaju dobijanje dopunskih informacija:
 - ▷ Položaj objekta u sceni
 - ▷ Dubinska udaljenost objekta
 - ▷ Oblik objekta
 - ▷ Položaj izvora svetlosti



Vrste senki

- Umbra
- Penumbra

(Uticaj više izvora svetlosti ili izvora svetlosti koji nisu tačkasti)



Algoritmi određivanja senki

- Lažne senke
- Projektovane senke
- Mape senki
- Zapremina senke

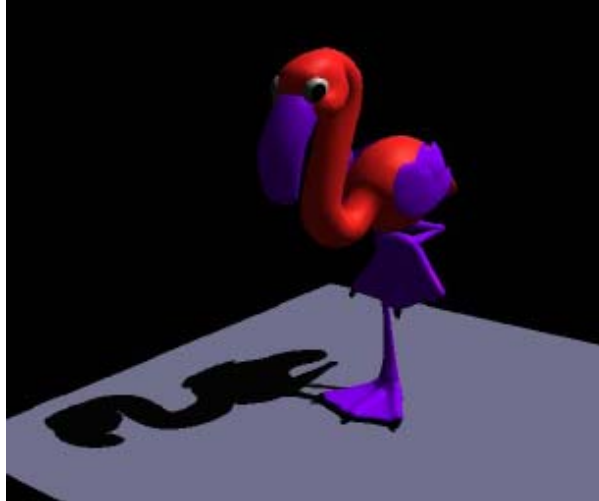
Lažne senke

- Koriste se jednostavni objekti kao senke...

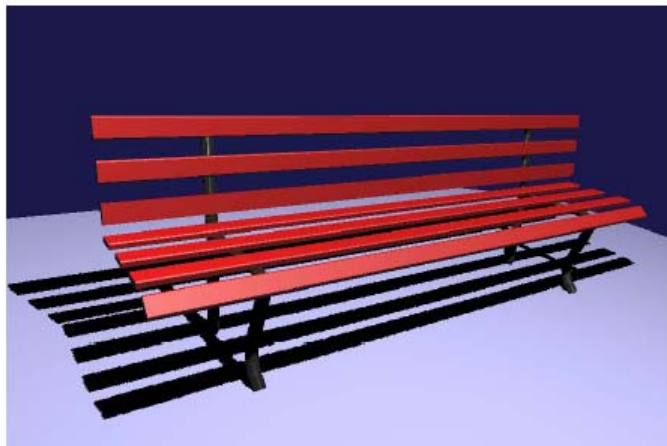
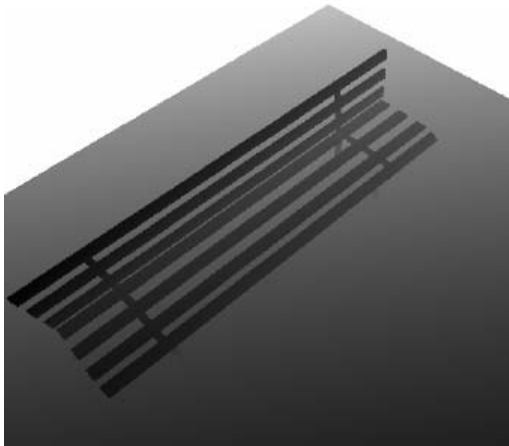


Projektovane senke

- Koriste se projekcije objekata iz pozicije izvora svetla kao senke...

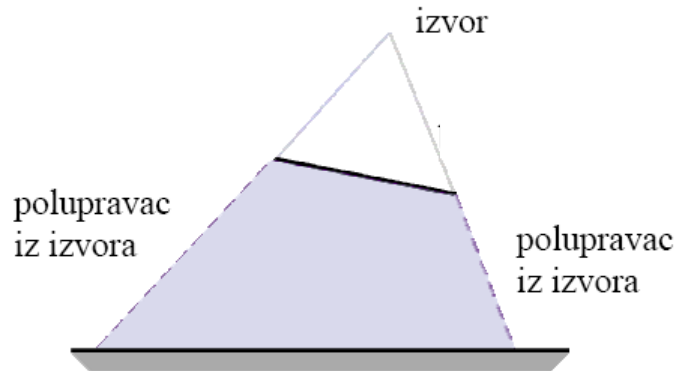


Mape senki



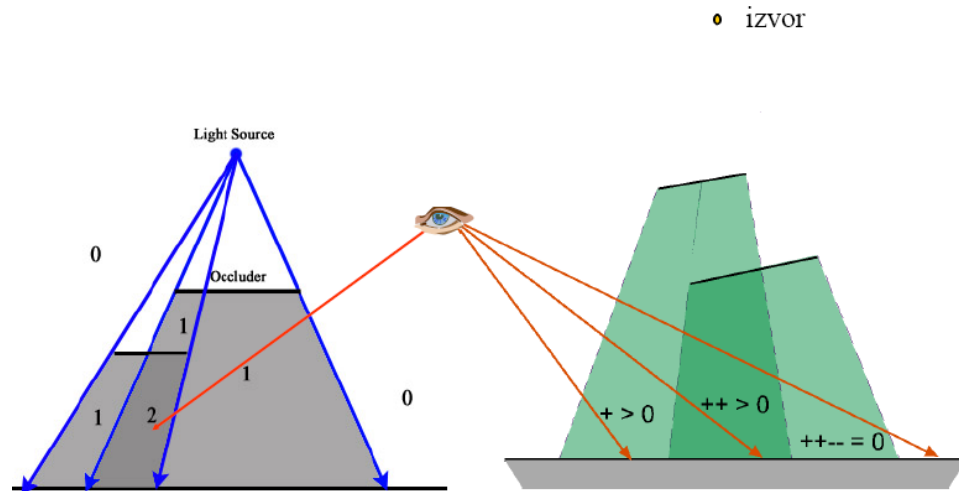
Zapremina senke

- Za svaki objekat se određuje poluotvorena zapremina senke.



Dubina senke

Prolazak zraka kroz svaki “prednji” poligon povećava dubinu senke, dok izlazak iz zapremine senke smanjuje dubinu senke.



PITANJA

