

6.3. ANALITIČKI MODELI OSVJETLJAVANJA



Postupak isijavanja (engl. Radiosity)

- Cook i Torrance načinili su model osvjetljavanja (drugačija zrcalna komp.)
<http://nishitalab.org/user/nis/javaexampl/newJava/brdf/brdf.html>
- ambijentna komponenta zamijenjena je točnijim proračunom globalnog utjecaja
- u Phong-ovom modelu proračun zrcalne komponente nije točan za male kutove (npr. papir)
- ovisnost zrcalno reflektirane svjetlosti o valnim duljinama

Osnovni pojmovi

- fizikalno zasnovan model osvjetljavanja
- interakcija svjetlosti s površinom

prostorni kut (eng. solid angle) - [sr] steradian

- mjeri dio površine **polukugle** koju obuhvaća konus s vrhom u središtu (površina cijele kugle je $4\pi r^2$)
cijela polukugla je 2π

$$d\omega = \frac{dA}{r^2}$$

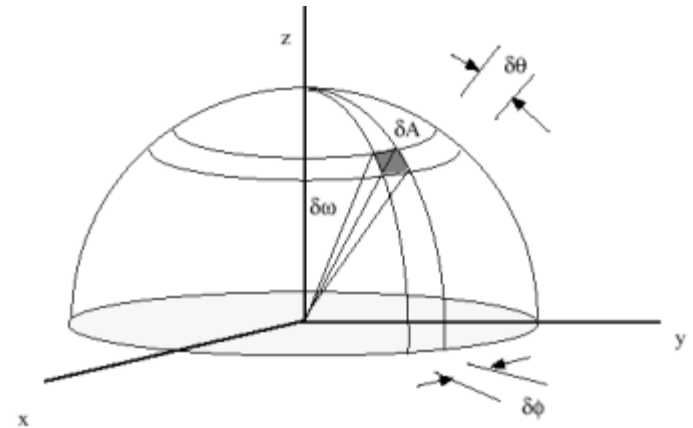
svjetlosni tok (eng. flux) Φ - [lm] lumeni

- mjera emitiranja svjetlosne energije u jedinici vremena (količina svjetlosne energije što je promatrani izvor isijava u okolni prostor)

https://threejs.org/examples/#webgl_lights_physical

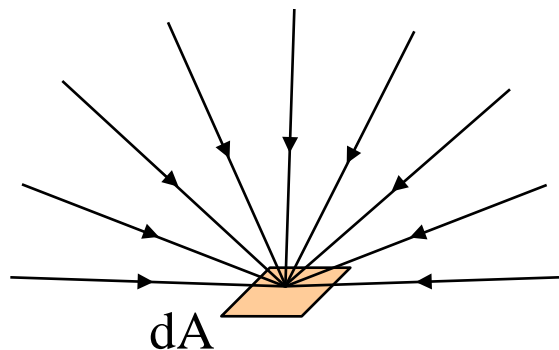
gustoća svjetlosnog toka, rasvjetljenost - [lux] luks

- osvjetljenje plohe kojoj na svaki kvadratni metar površine dolazi jednoliko raspoređen svjetlosni tok jednog lumena [lm/m^2]
(eng. illuminosity)

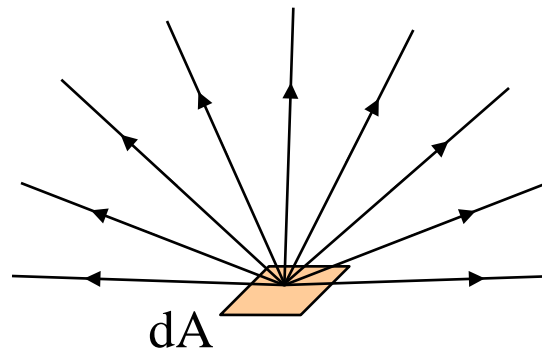


Radiometrijske i fotometrijske veličine

| Naziv | Definicija | Oznaka radi/foto | Jedinice | Radiometrijski | Jedinice | Fotometrijski |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|--|----------------------------|---|
| energija | | Q_e, Q_v | [J = Ws] Joule | energija isijavanja radiant energy | [talbot] | energija svjetlosti luminous energy |
| tok Flux | dQ/dt | Φ_e, Φ_v | [W = J/s] | tok isijavanja radiant flux | [lm = talbot/s] lumen | svjetlosni tok luminous flux |
| gustoća toka Flux density | $dQ/(dt dA)$ | E_e, E_v | [E = W/ m ²] | obasjanost irradiance | [lux = lm/m ²] | rasvijetljenost iluminance |
| | | $B_e=M_e,$ $B_v=M_v$ | [W/ m ²] | isijavanje radiosity | [lux] | iluminosity |
| | $dQ/(dA^{\Phi}d\omega dt)$ | L_e, L_v | [W/ m ² sr] | sjajnost radiance | [lm/ m ² sr] | luminance |
| intenzitet Intensity | $dQ/d\omega dt$ | I_e, I_v | [W/ sr] | intenzitet intensity | [cd = lm/sr] kandela | intenzitet svj. intensity |

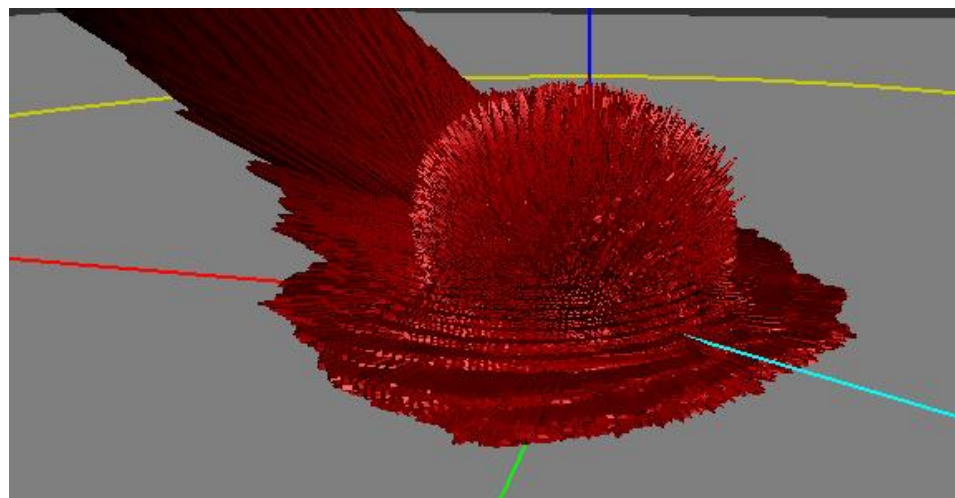


obasjanost (irradiance)



isijavanja (radiosity)

Za neki upadni kut (tirkizni pravac) dolazi do prostorne distribucije reflektirane svjetlosti ovisno o upadnom kutu (npr. najlon)



Model osvjetljavanja s ravnotežom energije u sceni

energija koja osvjetljava površinu = energija koja se odbija od površine
+ energija koja se lomi

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_t$$

Goralov model – 1984. adaptirao je postupak isijavanja iz termalnog inženjerstva

$$I_v = I_l + r_d \int_0^{2\pi} I_i(\theta, \varphi) (\vec{l}_i \cdot \vec{n}) d\omega$$

I_v intenzitet promatrane površine

I_l emisivnost površine (ukoliko je površina izvor svjetlosti)

I_i intenzitet isijavanja pojedinih ostalih površina

$d\omega$ prostorni kut

r_d koeficijent difuzne refleksije

Koraci postupka isijavanja:

Opis scene

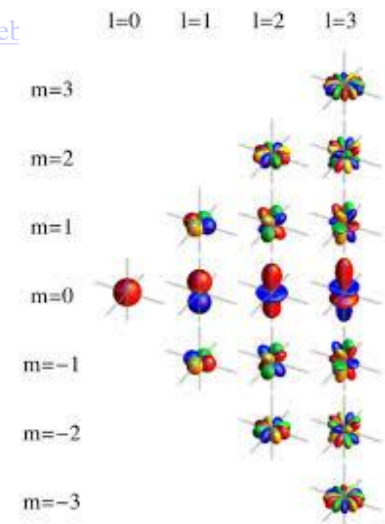
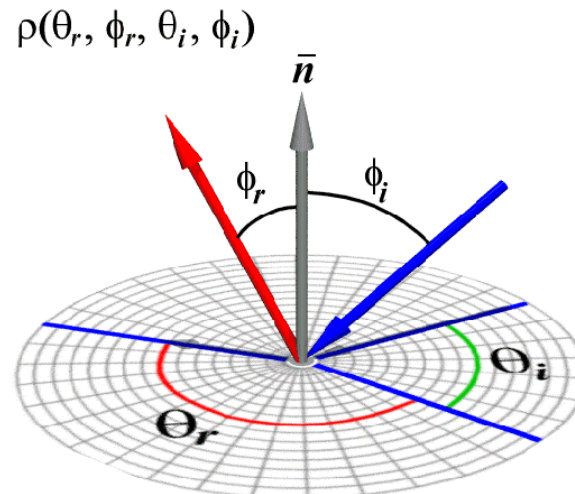
geometrijski opis scene

- omeđenost tijela površinama koja imaju položaj i orijentaciju
- omeđenost scene (zbog ravnoteže energije) tj. ako je vanjski prostor omeđimo ga

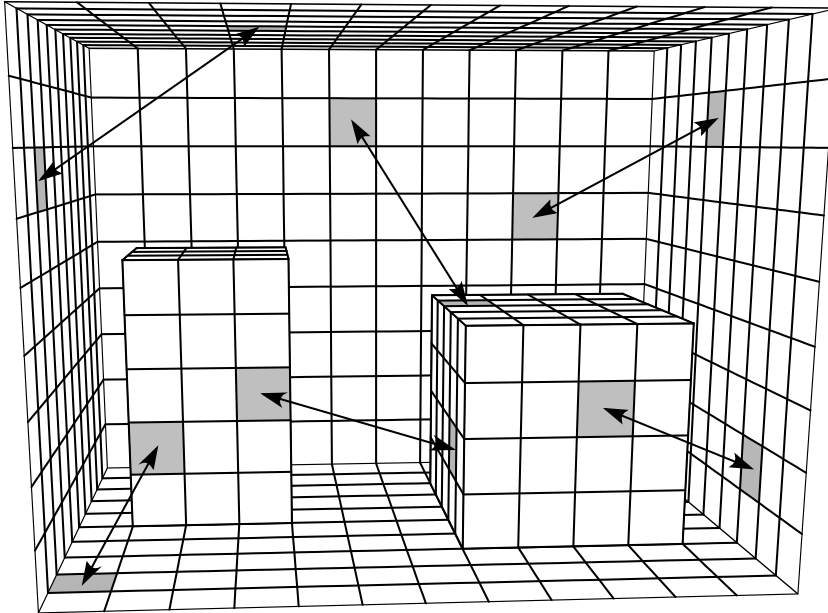
fizikalni opis scene

- podaci o reflektivnosti, boji, uzorku površine <http://patapom.com/topics/WebGL/BRDF>
- funkcija **BRDF** funkcija dvosmjerne distribucije raspršenja (engl. *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) određuje koliko je svjetla koje dolazi iz smjera i do točke k na površini reflektirano u smjeru r tj. $f(i \rightarrow k \rightarrow r, \lambda)$ (funkcija može biti različita za valne duljinu λ svjetla RGB) https://depot.floored.com/brdf_explorer
- korištenje sfernih harmonika za pohranu BRDF <http://hybrid0.github.io/SHL-Web>
<http://haptic-data.com/toxiclibsjs/examples/spherical-harmonics-three>

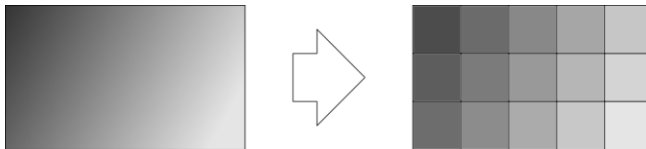
1. Umrežavanje scene
2. Izračunavanje faktora utjecaja
3. Rješavanje sustava jednačbi
4. Prikaz rezultata



1. Umrežavanje scene, aproksimacija sa sumom i krpica



k - promatrana krpica,
 I_{vk} - ukupni intenzitet promatrane krpice
 I_{lk} - emisivnost promatrane krpice
 I_i - intenzitet drugih krpica



$$I_{vk} = I_{lk} + r_{dk} \sum_{i=1}^n I_i F_{i,j}$$

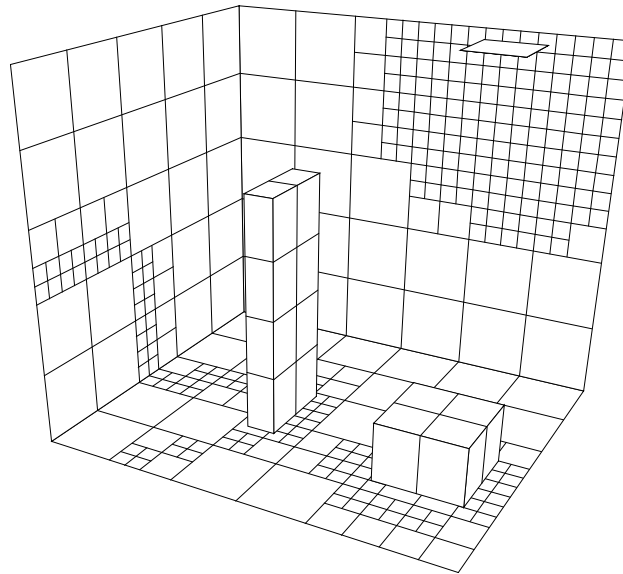
n broj krpica

F_{ij} faktori utjecaja

(engl. *Form factor*)

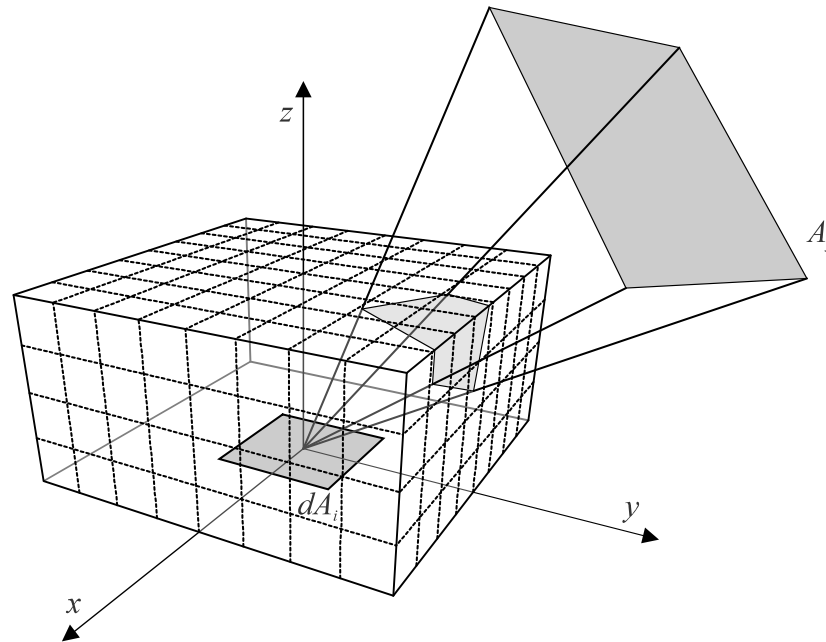
Podjela na elemente

- približno jednaki poligoni (ili hijerarhijski, adaptivno) koji zadržavaju svojstva površine kojoj pripadaju
- površine izvora sadržavaju početnu energiju
- što je podjela finija rezultat je točniji



2. Proračun faktora utjecaja (proračun geometrijskih odnosa između elemenata)

faktor utjecaja između dva elementa određuje koliki dio energije koju isijava prvi element dolazi do drugog.



Razmjena svjetlosne energije među elementima u sceni

- energija se prenosi među elementima u sceni tako da se više energije predaje elementima koji se vide pod većim prostornim kutom
- ukoliko su zaklonjeni energija se uopće ne predaje
- svaki element je idealni difuzni element

faktor utjecaja

- geometrijski odnos između dva elementa
- specificira koji dio ukupne energije jedan element predaje nekom drugom elementu
- za svaki par elemenata u sceni treba odrediti $F_{i,j}$
- odrede se jednom na početku (zahtjevno računanje) za ravnotežno stanje
- promjena pogleda, gašenje izvora nije potrebno ponovo računati

<http://dusanbosnjak.com/test/webGL/new/radiosityNormal/radiosity.html>

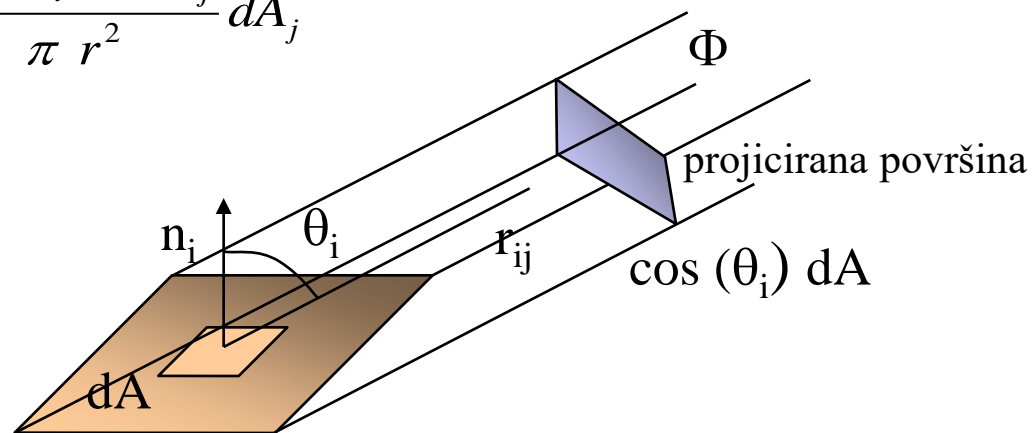
Faktori utjecaja (eng. form factor)

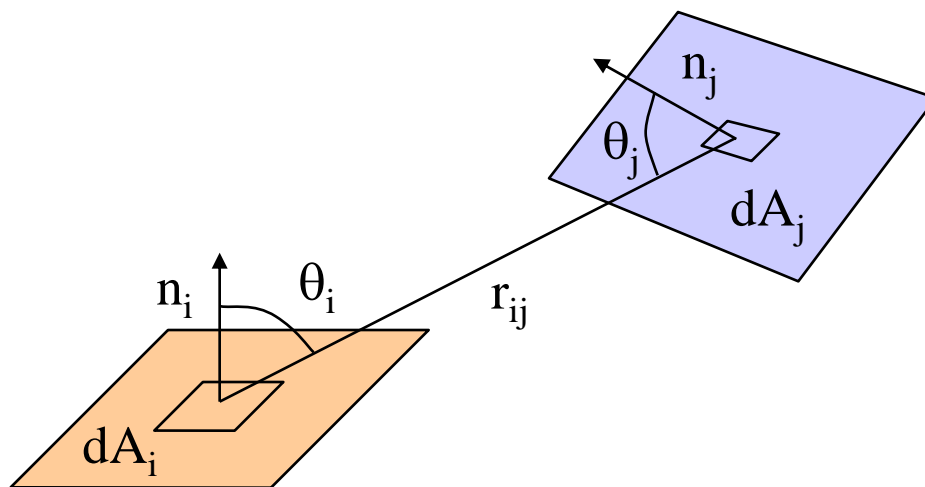
- veliki dio proračuna
- potrebno odrediti za svaki par krpica u sceni

- $d\omega_j$ diferencijalni prostorni kut
- $dF_{dA_i dA_j}$ dio svjetlosne energije koji napušta dA_i i dolazi do dA_j

- http://www.cs.brown.edu/exploratories/freeSoftware/repository/edu/brown/cs/exploratories/applets/radiosityFormFactor/radiosity_form_factor_java_browser.html

$$dF_{dA_i dA_j} = \frac{\cos \Theta_i}{\pi} d\omega_j = \frac{\cos \Theta_i \cos \Theta_j}{\pi r^2} dA_j$$





$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \Theta_i \cos \Theta_j}{\pi r_{i,j}^2} V_{ij} dA_i dA_j$$

$$V_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{površina je zaklonjena} \\ 1 & \text{površina je vidljiva} \end{cases}$$

3. Rješavanje sustava jednačbi

$$I_{vk} = I_{lk} + r_{dk} \sum_{i=1}^n I_i F_{i,j}, \quad k - \text{krpica}$$

$$I_{vk} - r_{dk} \sum_{i=1}^n I_i F_{i,j} = I_{lk}$$

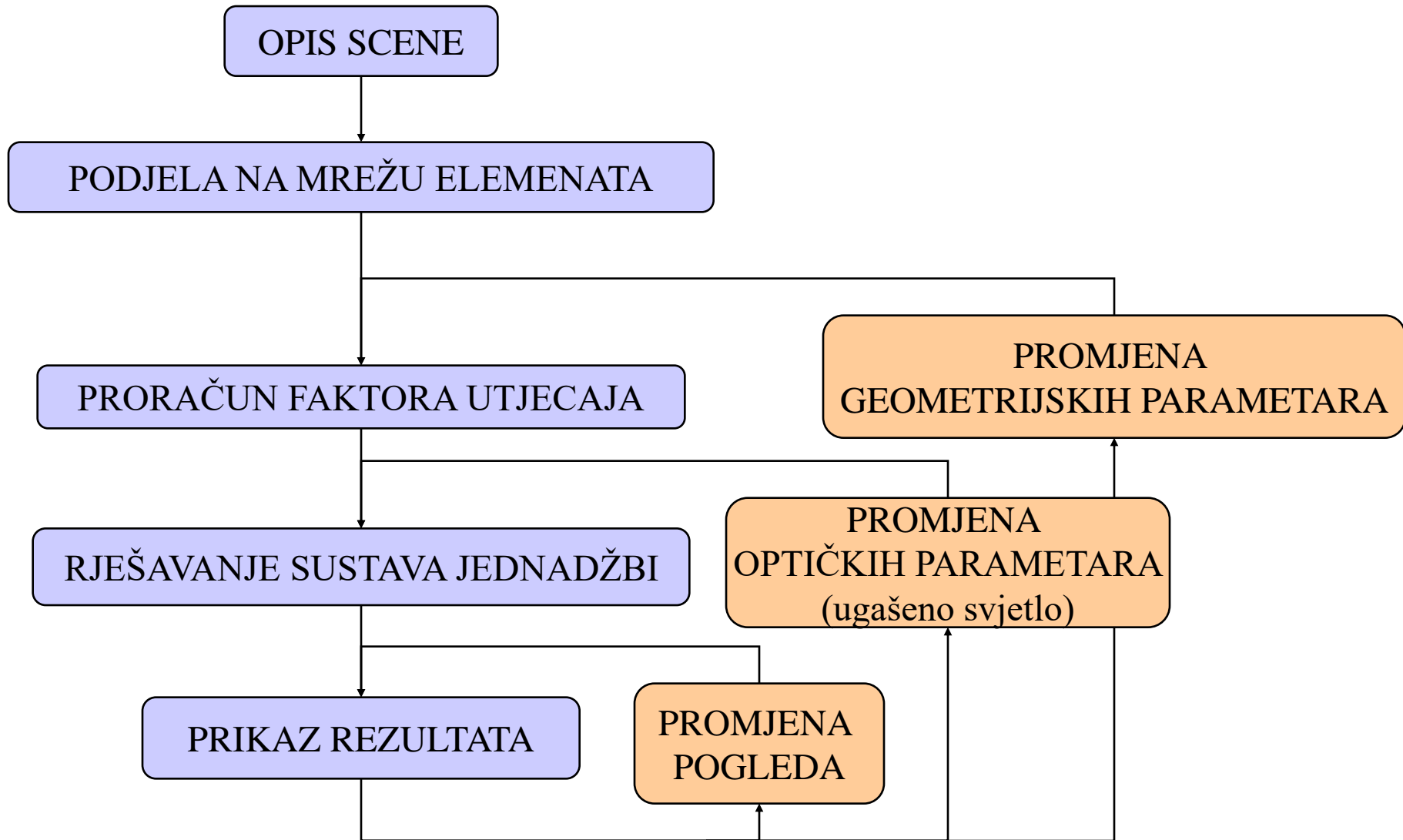
$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{1,1} & -\rho_1 F_{1,2} & \cdot & \cdot & -\rho_1 F_{1,n} \\ -\rho_2 F_{2,1} & 1 - \rho_2 F_{2,2} & \cdot & \cdot & -\rho_2 F_{2,n} \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ -\rho_{n-1} F_{n-1,1} & -\rho_{n-1} F_{n-1,2} & \cdot & \cdot & -\rho_{n-1} F_{n-1,n} \\ -\rho_n F_{n,1} & -\rho_n F_{n,2} & \cdot & \cdot & 1 - \rho_n F_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{n-1} \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ E_{n-1} \\ E_n \end{bmatrix}$$

$F_{i,j}$ faktori utjecaja (između elemenata i, j)

B_i nepoznanice – vrijednosti isijavanja koje svaki element ima u stanju ravnoteže

E_i početna isijavanja (izvori)

ρ_i refleksivnost elemenata

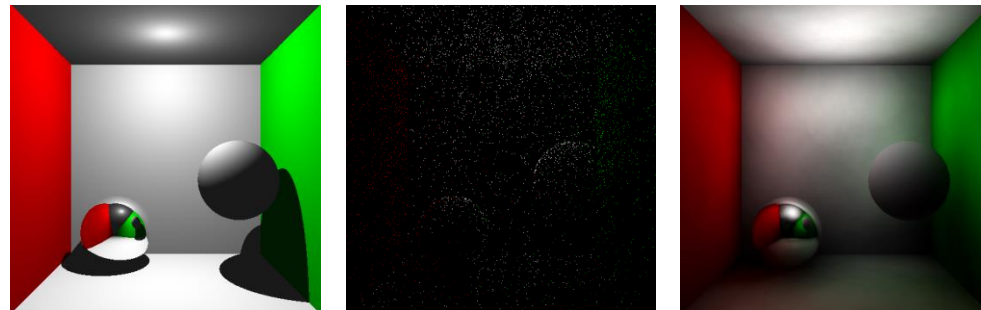
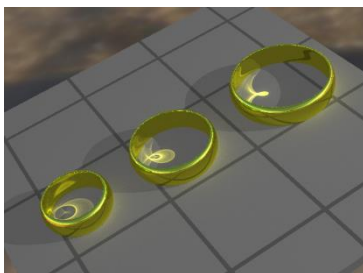


<http://codeflow.org/webgl/deferred-irradiance-volumes/www/> (SSAO+CubeMap; spherical harm.+Deferred Rendering Light probes)

Hibridni postupci – problem neizravnog osvjetljenja

- kombinacija postupka praćenja zrake iz očišta i emitiranih [fotona](#) iz izvora
- (engl. *photon mapping*)

<http://www.cc.gatech.edu/~phlosoft/photon/>

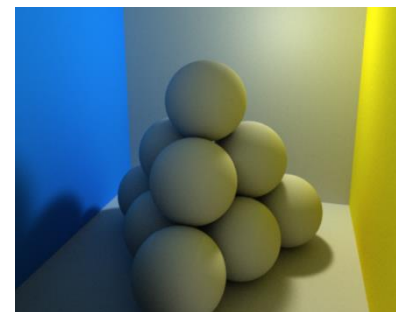


- kombinacija s praćenjem staze (engl. *Path Tracing*) integrira gustoću svjetlosnog toka na točki površine

<http://madebyevan.com/webgl-path-tracing/> Chrome

http://wulinjiansheng.github.io/WebGL_PathTracer/

<https://www.shadertoy.com/view/MsySzd>



- kvalitetniji izračun ambijentne komponente ambijentnim zasjenjenjem SSAO (engl. *Screen space ambient occlusion*)

https://threejs.org/examples/webgl_postprocessing_ssao.html



PBR – Fizikalno temeljeno sjenčanje (Physically Based Rendering)

- model Cook Torrance

$$f_{microfacet}(l, v) = \frac{F(l, h)G(l, v, h)D(h)}{4(n \cdot l)(n \cdot v)}$$

f je BRDF mikro površine

F Fresnelova refleksija

G član koji opisuje geometriju – koliko je mikropovršina zasjenjeno

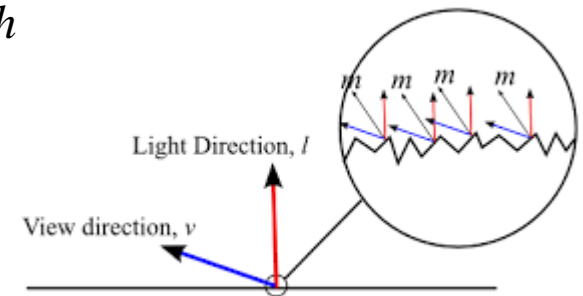
D distribucija normala mikropovršine u smjeru poluvektora h

l jedinični vektor prema izvoru

v jedinični vektor prema promatraču

n jedinični vektor normale

h poluvektor $(l+v)/2$



$F(l, h)$ - (Schlick's approximation). Svjetlost se promatra kao val koji se reflektira od površine između dva medija (npr. zrak-voda). Prilikom refleksije promatra se promjena amplitude i faznog pomaka svjetlosnog vala. Fresnelova refleksija određuje omjer dolazne i reflektirane svjetlosti i ovisi o kutu upada svjetlosti. F_0 je bazna refleksivnost za kut 0° .

$$F(l, h) = F_0 + (1 - F_0)(1 - (l \cdot h)^5), F_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2, n_i - \text{indeks loma svjetla}$$

$G(l, v, h)$ geometrijski član – vjerojatnost da mikropovršine nisu zaklonjene drugim mikropovršinama.

$$G(l, v, h) = \min \left(1, \frac{2(nh)(nv)}{vh}, \frac{2(nh)(nl)}{vh} \right)$$

Implementacija ovog člana može biti i Smith-ovim modelom – razdvaja ovu komponentu na komponentu prema izvoru i komponentu prema promatraču.

$$G(l, v, h) = G_1(l)G_1(v)$$

Za G_1 često se koristi GGX aproksimacija.

$D(h)$ distribucijski član (NDF – Normal distribution function). Određuje postotak površina orijentiranih u smjeru h . Zbog očuvanja energije treba vrijediti:

$$\int_{\Omega} D(h) (nh) d\omega = 1$$

Koriste se dodatni parametri, najčešće mape teksture (u RGB α komponentama) s informacijom o materijalu (uz mapu normala) npr.:

- osnovna boja baseColor (odgovara difuznoj komp.)
- reflektivni faktor (albedo)
- metalnost površine
- ambijentno zasjenjenje (ambient occlusion) - kaviteti
- hrapavost
- zrcalna komponenta (specular)
- sjajnost (gloss)
- emisivnost <http://johann.langhofer.net/PBRComposer/>

Izvor svjetlosti za objekt je obično kupolasta slika cijele scene (Environment Maps - image-based lighting) također se može ukomponirati u mape teksture

<http://github.khronos.org/glTF-WebGL-PBR/>

<http://simonstechblog.blogspot.hr/2011/12/microfacet-brdf.html>



ostvarivanje PBR – fizikalno temeljenog modela prikaza - usporedba s modelom Phong

<http://alunevans.info/apps/webgl/pbr/>