Univerzitet u Beogradu

Elektrotehni ki fakultet Katedra za ra unarsku tehniku i informatiku



diplomski rad

Pore enje metoda za ra unanje koeficijenata Frenelove refleksije u programima za sen enje

Mentor

dr or e ur evi

Student

Sr a Šteti -Kozi 7/2010

Beograd, 2014.

Apstrakt: Jedna od tri najvažnije komponente pri fizi ki baziranom renderovanju u realnom vremenu su Frenelove refleksije. Da bi se postigli što realniji vizuelni rezultati, Frenelova funkcija mora biti izra unata precizno. Pošto fizi ki bazirano renderovanje postaje bitno i na mobilnim ure ajima, izra unavanje mora biti i brzo. Ovaj rad upore uje razli ite na ine za ra unanje koeficijenta Frenelove refleksije po preciznost i brzini. Posebna pažnja je posve ena provodnicima (prvenstveno metalima), jer je precizno izra unavanje Frenelove refleksije za njih mnogo složenije, a ujedno i bitnije u domenu ra unarske grafike, od ra unanja za dielektrike. Merenja su vršena na modernim mobilnim Android i iOS ure ajima. Teksture tabeliranih funkcija su se pokazale kao najbrži i najprecizniji na in ra unanja Frenelovih koeficijenata od trenutno dostupnih metoda.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Problem	4
2.1. Refleksija svetlosti	4
2.2 Metali	7
2.3 Predmet istraživanja	9
3. Pregled postoje ih rešenja	.10
3.1 Pregled rešenja za dielektrike	.10
3.1.1 Egzaktna formula za dielektrike	.10
3.1.2 Empirijska aproksimacija kompanije NVIDIA	.10
3.1.3 Šlikova aproksimacija	.11
3.2 Pregled rešenja za metale	.13
3.2.1 Egzaktna formula za metale	.13
3.2.2 Šlikova aproksimacija	.13
3.2.3 Reskalirana Šlikova aproksimacija	.14
3.2.4 Reskalirana Šlikova aproksimacija sa faktorom korigovanja greške	.14
3.3 Teksture tabeliranih funkcija	.15
3.4 Tro-kanalni indeks refrakcije	.16
4. Detalji implementacije	.17
5. Rezultati merenja	.21
5.1. Uslovi merenja	.21
5.2 Metodologija i ostvareni rezultati	.21
5.3 Diskusija	.24
5.3.1 Preciznost	.24
5.3.2 Performanse	.25
5.3.3 Greška ra unanja indeksa refrakcije	.26
6. Zaklju ak	.28
Reference	.29

1. Uvod

Od kada je 3D grafika po ela da se razvija, teži se ka fotorealisti nom renderovanju u realnom vremenu¹. Kako hardver postaje sve brži, polako se približava tom cilju. Jedan od elemenata koji su potrebni da bi se postiglo fotorealisti no renderovanje je na in na koji se svetlost reflektuje od objekata. Funkcije koje opisuju to ponašanje se nazivaju bi-direkcione refleksione distribucione funkcije [1] (BRDF) i predmet su stalnog unapre ivanja.

Blinn-Phong BRDF [2] je dugo vremena bio najrasprostranjeniji model. Razvijen je krajem 70-tih godina prošlog veka kao nadogradnja na Phong refleksioni model. Karakteriše ga relativno mala ra unska složenost, pa je zato koriš en kao standardni model u velikom broju 3D grafi kih biblioteka. Glavni nedostatak ovog modela je taj što je baziran na relativno grubim aproksimacijama. Ovo je bilo neophodno u trenutku kada je model formulisan, da bi refleksija mogla da se izra una u realnom vremenu na tadašnjem hardveru. Rezultati nisu fizi ki realni, a postizanje bilo kakvog konzistentnog izgleda izme u više razli itih materijala zahteva mnogo truda. Danas je na raspolaganju višestruko ja i hardver, pa su tako usvojeni BRDF modeli koji su složeniji i samim tim zahtevniji u pogledu prora una, ali daju zna ajno bolje rezultate.

U poslednjih 10 godina je do izražaja došlo fizi ki bazirano renderovanje. Ono podrazumeva da se teži ka tome da su svi parametri koji mogu da se podešavaju na izvorima svetla ili materijalima zasnovani na njihovim fizi kim svojstvima, i teže ka što realisti nijem prikazu. Najrasprostranjeniji je Cook-Torrance refleksioni model [3], zasnovan na teoriji mikroplo ica. Koristi se u dva danas najrasprostranjenija okruženja za razvoj 3D sistema, Unity (od verzije 5) [4] i Unreal (od verzije 4) [5]. Postoje tri faktora u Cook-Torrance modelu koja drasti no uti u na vernost prikaza – distribuciona funkcija mikroplo ica, geometrijska atenuacija i Frenelov faktor² [3]. Frenelov faktor najviše uti e na refleksivnost objekta i ovaj rad se koncentriše na razli ite na ine njegovog ra unanja.

¹ Pod pojmom *renderovanje u realnom vremenu* e se podrazumevati brzina crtanja od najmanje 24 slike u sekundi.

² Augustin-Jean Fresnel, 1788–1827, francuski inženjer i fizi ar



Slika 1 - Prikaz upadnog i reflektovanog svetlosnog zraka od površi

lako intuitivno mislimo da samo uglan ani materijali imaju izražene refleksije, to u prirodi nije slu aj. Pod velikim uglovima (blizu 90 stepeni) izme u pravca iz kojeg dolazi svetlo i normale na površ se javlja takozvani Frenelov efekat, gde refleksija postaje veoma izražena. Ugao izme u ta dva pravca je prikazan na slici 1 kao i. Efekat je vidljiv za posmatra a koji vidi reflektovan zrak. Nedostatak realnog Frenelovog efekta je izuzetno primetan. Dobar primer su video igre koje su se na tržištu pojavile krajem prošle decenije u kojima su svi predmeti izgledali kao da su napravljeni od uglan ane plastike. Problem naro ito nastaje sa bojom metala, jer su oni u prirodi obojeni najviše zbog Frenelove refleksije spekularnog (eng. specular) sloja.



Slika 2 - Primer stvarnog Frenelovog efekta. [6]



Slika 4 - Primer prejakog Frenelovog efekta u igri Men of War: Assault Squad 2 [7]

Primer stvarnog Frenelovog efekta je dat na slici 2. Kamenje u donjem levom uglu postaje skoro potpuno reflektivno, pa se zraci Sunca odbijaju kao da je u pitanju ogledalo. Na slici 3 je dat primer igre Fallout 3 kojoj nedostaju Frenelove refleksije. Na slici 4 je dat primer igre Men of War: Assault Squad 2, koja ima prejaku spekularnu Frenelovu refleksiju. Po izgledu neba i senci može da se zaklju i da se ne radi o izlasku ili zalasku sunca, a gornja površina tenka na slici je skoro potpuno reflektivna, što nema opravdanje zasnovano na zakonima fizike.

Ostatak rada organizovan je na slede i na in. U poglavlju 2 e biti detaljno opisano kako se svetlost reflektuje i izložen problem rešavan u ovom radu. U poglavlju 3 e biti upore eni na ini ra unanja Frenelovog koeficijenta refleksije, posebno za dielektrike, a posebno za metale. U poglavlju 4 e biti opisana implementacija koriš ena za merenja. U poglavlju 5 e biti dati uporedni rezultati performansa i preciznosti za sva postoje a rešenja. U zaklju ku e biti rezimirani najzna ajniji rezultati rada i bi e date smernice za dalja istraživanja.

2. Problem

2.1. Refleksija svetlosti

Frenelove jedna ine opisuju ponašanje svetlosti na prelazu izme u dve sredine sa razli itim indeksima prelamanja. Tada dolazi do toga da se deo svetlosnog zraka reflektuje, a deo prelomi (videti sliku 5). I je upadni (incidentni) zrak, R je reflektovani (pod istim uglom u odnosu na normalu kao i upadni, _i = _r), a T je prelomljeni zrak. Frenelove jedna ine na osnovu ugla upadnog zraka i indeksa prelamanja odre uju koliki procenat svetlosti e biti reflektovan, a koliki prelomljen i nastaviti da se kre e kroz drugu sredinu. Frenelove jedna ine koje opisuju prelaz izme u vazduha i nekog dielektrika prikazane su u izrazima (1) i (2). Vazduh, kao sredina iz koje svetlost prelazi u neku drugu sredinu, je naj eš i slu aj u praksi, pa e u svim izrazima u ostatku rada biti pretpostavljeno da je prva sredina vazduh. Ako ta sredina nije vazduh, mogu e je izra unati relativni indeks refrakcije izme u dve sredine kao $n = \frac{n_2}{n_1}$ i koristiti ga u svim formulama umesto indeksa refrakcije druge sredine.



Slika 5 - Frenelov efekat pri prelazu svetlosnog zraka izme fu dve sredine

$$R_{s} = \left| \frac{\cos \theta_{i} - n_{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta_{i}}{n_{2}}\right)^{2}}}{\cos \theta_{i} + n_{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta_{i}}{n_{2}}\right)^{2}}} \right|^{2}$$
(1)
$$R_{p} = \left| \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta_{i}}{n_{2}}\right)^{2} - n_{2} \cos \theta_{i}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta_{i}}{n_{2}}\right)^{2} + n_{2} \cos \theta_{i}}} \right|^{2}$$
(2)



Slika 6 – Koeficijent refleksije vode

R_s je procenat reflektovane s-polarizovane svetlosti, a R_p je procenat reflektovane p-polarizovane svetlosti. Ako izvor svetla, poput dnevne Sun eve svetlosti, nije polarizovan (sadrži podjednaku koli inu s i p polarizovanih zraka), procenat reflektovane svetlosti se ra una kao srednja vrednost (1) i (2), što je prikazano u izrazu (3):

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \tag{3}$$

Na primeru vode (indeks refrakcije = 1.33, slika 6) se vidi kako se Frenelove jedna ine ponašaju u odnosu na upadni ugao svetlosti. Indeks refrakcije je funkcija koja zavisi od talasne dužine upadnog svetlosnog zraka, pa ju je potrebno izra unati više puta, za svaku talasnu dužinu od interesa po jednom, ako se želi posti i realan efekat.

U modernim BRDF modelima postoje dva razli ita tipa refleksija [1] : difuzna (eng. *diffuse*) i spekularna (eng. *specular*). Iako su u prirodi oba tipa posledica Frenelove refleksije, difuzna refleksija je u ve ini slu ajeva jednostavna za



aproksimaciju, a složena za precizno izra unavanje [8]. U daljem tekstu, kada se govori o Frenelovim refleksijama, podrazumeva e se da se radi o spekularnoj refleksiji. Spekularne refleksije se dešavaju kada se svetlosni zrak pretežno odbije od ravne, glatke površi i reflektuje u samo jednom smeru, koji je odre en pravcem u kojem se kre e zrak svetla i normalom na površ na mestu odbijanja. Sa druge strane, pri difuznoj refleksiji se jedan zrak može reflektovati u proizvoljnom smeru, s tim što su neki smerovi zastupljeniji u odnosu na druge (videti sliku 3). Ovo se naj eš e dešava zbog višestruke refleksije i rasipanja svetlosti unutar samog objekta (obi no veoma blizu površine). U ve ini BRDF modela je usvojeno da hrapavost površi ne uti e na intenzitet difuzne refleksije, što je tako e i fizi ki ispravno.





Materijali koji reflektuju svetlost samo difuzno ili samo spekularno u prirodi ne postoje. Neki materijali su izrazito difuzni (npr. kreda) ili izrazito spekularni (npr. srebro), ali i na njihov izgled zna ajno uti u oba tipa refleksija. Moderni BRDF modeli zato smatraju da materijali imaju dva sloja [10]. Svetlost se prvo odbija od spekularnog sloja, a do difuznog sloja dolazi samo onaj deo svetlosti koji je prelomljen kroz spekularni sloj. Ovo svojstvo se zove o uvanje energije (eng. energy conservation). Raniji modeli, kao što je Blinn-Phong nisu o uvavali energiju [2] izme u slojeva, pa je bilo mogu e napraviti materijale koji su emitovali više energije nego što primaju, što je fizi ki nemogu e.

U slu aju dielektri kih (izolatorskih) materijala, indeks refrakcije je ceo broj definisan izrazom (4), koji je preuzet iz [11].

$$n(\lambda) = \frac{c}{v_{\lambda}} \tag{4}$$

U izrazu (4), n je indeks refrakcije, c je fazna brzina svetlosti u vakuumu, v_{λ} je fazna brzina svetlosti u materijalu, λ je talasna dužina upadnog svetlosnog zraka. Iz jedna ine je mogu e primetiti da indeks refrakcije zavisi od talasne dužine upadnog svetlosnog zraka. Ova osobina omogu ava prizmi da razloži belu svetlost na više obojenih komponenata [11].

2.2 Metali

Za razliku od dielektrika, indeks refrakcije metala je kompleksan broj, dat izrazom (5):

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$$
 (5)

U izrazu (5), *n* je realan deo indeksa refrakcije (opisan u odeljku 2.1), *i* je imaginarna jedinica, a *k* je koeficijent apsorpcije³. Ovaj koeficijent ukazuje koliko je lako svetlosti da prodre u materijal. Ve a vrednost zna i da se manje svetlosti transmituje, a više reflektuje.

Frenelova refleksija na metalima je posebno interesantna zato što su metali po pravilu izuzetno dobri reflektori svetlosti. Dielektricima je boja najviše odre ena difuznom refleksijom (malo svetlosti se reflektuje u vidu spekularne refleksije), za razliku od metala kod kojih je boja najviše odre ena spekularnom refleksijom. Veoma veliku reflektivnost metala možemo videti na primeru refleksije svetla crvene boje od zlata (slika 9).



Slika 9 - Koeficijent refleksije zlata za svetlost talasne dužine 685nm

Na slici 9 se može primetiti da, bez obzira na ugao pod kojim svetlost pada na površinu predmeta od zlata, više od 92% svetlosti talasne dužine 685 nm (crveni deo spektra) e biti reflektovano. Sa druge strane, na slici 10 se može videti da je najmanji procenat reflektovane svetlosti za talasnu dužinu 475 nm (plavi deo spektra) nešto ve i

³ U fizici je poznat i pod imenom *koeficijent odumiranja* (eng. extinction coefficient)

od 20%. Frenelova funkcija za svetlost talasne dužine 685 nm ima minimum za ugao od oko 77°. Ve ina aproksimativnih formula za ra unanje Frenelovog koeficijenta je monotono rastu a, pa kod njih postoji problem sa aproksimacijom ovog minimuma.

Ve ina BRDF modela smatra da je Frenelov koeficijent isti za sve talasne dužine svetlosti [12], a koriste posebnu boju (nazvanu spekularna boja) da oponašaju obojenost metalnog materijala. Pore enjem slika 9 i 10 se vidi da to svakako nije slu aj, i da Frenelovi koeficijenti na ove dve talasne dužine nisu linearno zavisni. Pošto je cilj da se izra una fizi ki realan Frenelov koeficijent, ova pretpostavka ne e biti usvojena.



Slika 10 - Koeficijent refleksije zlata za svetlost talasne dužine 475nm

Na in prikaza sadržaja na savremenim ekranima ra unara podrazumeva postojanje crvene, plave i zelene komponente (boje) ijim mešanjem se dobijaju sve ostale. Ova injenica može da se iskoristi i da se izra unaju tri Frenelova koeficijenta, za svaku od komponenti boja po jednom [13]. Pošto je svetlost spektar, ne može da se odredi na ta no kojoj talasnoj dužini je koja boja, ali uzimanje sredina intervala za crvenu, zelenu i plavu boju [14] se pokazalo kao dovoljno dobra aproksimacija.

Suštinski, uzimaju se indeksi refrakcije (dobijeni razli itim na inima merenja, u zavisnosti od materijala [11]) na svakoj od te tri predodre ene talasne duzine i pomo u njih se izra unavaju Frenelovi koeficijenti za te tri boje. Ovo je aproksimacija još opštijeg na ina dobijanja boje materijala koja, koriš enjem itavog niza izmerenih indeksa refrakcije na raznim talasnim dužinama, izra unava kona nu boju podeljenu na crveni,

plavi i zeleni kanal [10]. Relativna greška aproksimacije je manja od 10%, što je utvr eno eksperimentalnim putem (u poglavlju 5.3.3).

2.3 Predmet istraživanja

U radu se istražuje preciznost i brzina razli itih na ina ra unanja koeficijenta Frenelove refleksije. Zbog kompleksnosti egzaktne formule za ra unanje Frenelovog koeficijenta (naro ito za metale), u nekim slu ajevima je potrebno koristiti aproksimacije. Sa usvajanjem fizi ki baziranog renderovanja na mobilnim ure ajima⁴ se pojavila potreba za brzim izra unavanjem Frenelovog koeficijenta, kao jednog od sastavnih delova bilo kog fizi ki baziranog modela osvetljenja.

⁴ Pod pojmom *mobilni ure aji* se smatraju mobilni telefoni i tableti.

3. Pregled postojećih rešenja

Zbog nedostatka ra unarske snage (do polovine prošle decenije), Frenelovi koeficijenti metala u sistemima za vizuelizaciju u realnom vremenu su bili aproksimirani formulama za dielektrike, što je dovodilo do stvaranja besmislenih parametara i njihovog ubacivanja u fizi ki zasnovane sisteme osvetljenja samo da bi se postiglo korektno ponašanje Frenelovih refleksija za metale. Zbog toga su postoje a rešenja podeljena u dve kategorije, jednu za dielektrike i jednu za metale. Vektori i uglovi koji se pominju u ovom poglavlju se mogu videti na slici 1. U daljem tekstu, kada se pominje ugao , smatra se da je to ugao _i sa slike 1.

3.1 Pregled rešenja za dielektrike

U ovom odeljku predstavljena su postoje a rešenja za ra unanje Frenelovih koeficijenata za dielektrike.

3.1.1 Egzaktna formula za dielektrike

Egzaktna formula za ra unanje Frenelovog koeficijenta je ra unski vrlo složena, pa zato nije pogodna za sve slu ajeve upotrebe. Data je izrazima (1), (2) i (3) u poglavlju 2.1

3.1.2 Empirijska aproksimacija kompanije NVIDIA

Kompanija NVIDIA je razvila empirijsku aproksimaciju [15] za ije koriš enje se zalažu u zvani noj dokumentaciji za jezik CG, jezik za sencenje koji je tako e razvila kompanija NVIDIA [16]. Aproksimacija je data izrazom (6).

$$F = \max\left(0, \min(1, bias + scale * (1 + I \cdot N)^{power})\right)$$
(6)

U izrazu (6), F je Frenelov koeficijent, I je vektor pravca svetlosti, N je normala posmatrane površi. *Bias, scale* i *power* su podesivi parametri. Pošto ovaj izraz nije fizi ki zasnovan, faktori moraju ru no da se podešavaju dok se ne dobije željeni efekat. Zbog ovoga je mogu e napraviti Frenelov koeficijent koji nije mogu e dobiti u prirodi, dok sa druge strane nije mogu e dobiti neki Frenelov koeficijent koji zaista postoji u prirodi (npr. za vodu, slika 11)



Slika 11 - Koeficijent refleksije vode, pore enje stvarnog i NVIDIA aproksimacije

3.1.3 Šlikova aproksimacija

Šlikova (eng. Schlick) aproksimacija [17] je danas najšire rasprostranjena aproksimacija Frenelovog koeficijenta u ra unarskoj grafici. Razvio ju je Kristof Šlik (eng. Christophe Schlick) 1994. godine. Šlik je uo io da sam oblik krive Frenelovog koeficijenta ne zavisi mnogo od tipa materijala, kao i da je (u ve ini slu ajeva) kriva monotono rastu a. Aproksimacija je data izrazom (7).

$$F = \frac{(n-1)^2 + 4n(1-\cos\theta)^5}{(n+1)^2}$$
(7)

U izrazu (7), F je frenelov koeficijent, *n* je indeks refrakcije materijala, je ugao izme u vektora svetlosti i normale na površ. Postoji još jedna formulacija Šlikove aproksimacije, ali e ona biti predstavljena u poglavlju o metalima (3.2), pošto je pogodnija za njih. Aproksimacije su ekvivalentne za dielektrike. Šlikova aproksimacija je precizna dok god je indeks refrakcije u opsegu od 1.4 do 2.2, van tog opsega se greška drasti no pove ava. Na slikama 12, 13 i 14 su dati primeri materijala sa razli itim indeksima refrakcije. Pretpostavka da je kriva monotono rastu a je tako e problemati na, i ne važi za neke materijale (pretežno za metale).



Slika 12 – Pore enje Šlikove aproksimacije sa ta nom vrednoš u za Vodonik (n = 1.001) u gasovitom stanju.



Slika 13 - Pore enje Šlikove aproksimacije sa ta nom vrednoš u za arsenik-trisulfid (n = 2.04) u vrstom stanju.



Slika 14 – Pore enje Šlikove aproksimacije sa ta nom vrednoš u za germanijum (n = 4.01) u vrstom stanju.

3.2 Pregled rešenja za metale

U ovom odeljku predstavljena su postoje a rešenja za ra unanje Frenelovih koeficijenata za metale.

3.2.1 Egzaktna formula za metale

Egzaktna formula za metale je vrlo složena i data je izrezima (8), (9), (10), (11), (12) [11]

$$2a^{2} = \sqrt{(n^{2} - k^{2} - \sin^{2}\theta)^{2} + 4n^{2}k^{2}} + (n^{2} - k^{2} - \sin^{2}\theta)$$
(8)
$$2b^{2} = \sqrt{(n^{2} - k^{2} - \sin^{2}\theta)^{2} + 4n^{2}k^{2}} - (n^{2} - k^{2} - \sin^{2}\theta)$$
(9)

$$F_{s} = \frac{a^{2} + b^{2} - 2a\cos\theta + \cos^{2}\theta}{a^{2} + b^{2} + 2a\cos\theta + \cos^{2}\theta}$$
(10)

$$F_p = F_s \frac{a^2 + b^2 - 2a\sin\theta\tan\theta + \sin^2\theta\tan^2\theta}{a^2 + b^2 + 2a\sin\theta\tan\theta + \sin^2\theta\tan^2\theta}$$
(11)

$$F = \frac{F_s + F_p}{2} \tag{12}$$

U gornjim izrazima, F je Frenelov koeficijent, n je indeks refrakcije materijala, je ugao izme u vektora svetlosti i normale na površ, k je faktor apsorpcije.

3.2.2 Šlikova aproksimacija

Kao što je pomenuto u poglavlju 3.1.2, postoje dva oblika Šlikove aproksimacije. Izrazom (13) je data aproksimacija koja je pogodnija za metale.

$$F = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos\theta)^5$$
(13)

U izrazu (13), F je Frenelov koeficijent, θ je ugao izme u vektora svetlosti i normale na površ, a R_0 je vrednost Frenelovog koeficijenta kada je θ = 0. Da bi ova aproksimacija mogla da se koristi, vrednost Frenelovog koeficijenta kada je θ = 0 mora da bude poznato. Za dielektrike važi $R_0 = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$, čijom se smenom u izrazu (13) dobija izraz (7). Mogu e je primetiti da koeficijent apsorpcije ne u estvuje u izrazu (13). Na slici 15 se može videti pore enje izme u oba oblika Šlikove aproksimacije na primeru platine.



Slika 15 - Pore enje Šlikovog koeficijenta za platinu

3.2.3 Reskalirana Šlikova aproksimacija

Da bi se u izrazu za Šlikovu aproksimaciju koristio faktor apsorpcije, razvijena je reskalirana Šlikova aproksimacija [18], data izrazom (14)

$$F = \frac{(n-1)^2 + 4n(1-\cos\theta)^5 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$$
(14)

U izrazu (14), F je Frenelov koeficijent, n je indeks refrakcije materijala, je ugao izme u vektora svetlosti i normale na površ, k je faktor apsorpcije. Ovaj na in ra unanja Frenelovog koeficijenta još uvek ima problem sa minimumom koji Frenelov koeficijent ima za mnoge metale blizu ugla od 83°.

3.2.4 Reskalirana Šlikova aproksimacija sa faktorom korigovanja greške

Da bi se rešio problem sa lokalnim minimumom, predloženo je da se na izraz (14) doda lan oblika $-a(1 - \cos \theta)^{\lambda}$ [18]. Za *a* je uzeto 2*n*, dok λ mora da se ra una za svaki materijal ponaosob. Prime eno je da za ve inu metala za koje je greška dovoljno velika da je potrebno da se kompenzuje važi da se lokalni minimum nalazi izme u 81.37° i 84.26°. λ se računa tako da vrednost izraza (14) bude jednaka ta noj vrednosti Frenelovog koeficijenta za ugao od 84.26°.

$$F = \frac{(n-1)^2 + 4n(1-\cos\theta)^5 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} - 2n(1-\cos\theta)^{\lambda}$$
(15)

U izrazu (15), *F* je Frenelov koeficijent, *n* je indeks refrakcije materijala, θ je ugao izme u vektora svetlosti i normale na površ, *k* je faktor apsorpcije, λ je parametar korigovanja greške. Poboljšanje u odnosu na reskaliranu Šlikovu aproksimaciju se može videti na slici 16.



Slika 16 - Pore enje korigovane Šlikove aproksimacije (3.2.4) sa reskaliranom (3.2.3)

3.3 Teksture tabeliranih funkcija

lako nisu na in aproksimacije, tehnika koja se zasniva na teksturama tabeliranih funkcija (eng. Lookup Textures) e biti predstavljena zbog njenog velikog prakti nog zna aja. Ideja je da se funkcija uzorkuje jednom, sa odre enom preciznoš u, unapred (u fazi pripreme), i da se rezultat tog uzorkovanja sa uva u teksturu. Ta tekstura se kasnije, u vreme crtanja, prosle uje programu za sen enje koji je ita koriste i ugao izme u vektora pravca svetlosti i normale na površ za pristup teksturi, i time efektivno zaobilazi ra unanje funkcije. Prednost tekstura tabeliranih funkcija je u tome što je itanje teksture u ve ini slu ajeva jeftinije (brže) od ra unanja složene funkcije.

U konkretnom slu aju, koji se esto koristi u praksi, za koeficijent Frenelove refleksije, ra una se i tabelira vrednost Frenelovog koeficijenta prema kosinusu ugla izme u vektora pravca svetlosti i normale na površ, od 0 do 1, sa željenim korakom. Tabeliranje se vrši prema kosinusu ugla zato što se ta vrednost jednostavno dobija skalarnim proizvodom normalizovanih vektora normale i incidentne svetlosti. Uzorci se uvaju u jednodimenzionoj teksturi. Program za sen enje ra una kosinus ugla izme u vektora svetlosti i normale na površ i to koristi kao U koordinatu (V koordinata je nebitna zato što je tekstura jednodimenzionalna) pri itanju teksture. O igledno, ovako tabelirana funkcija je deo po deo linearizovana. Zahvaljuju i hardveru za filtriranje tekstura prilikom uzorkovanja, automatski se vrši linearna interpolacija izme u dva susedna uzorka. Primer teksture pretrage za zlato je dat na slici 17.



ugla izme u vektora pravca svetlosti i normale na površ i proteže se od 0 (levi kraj) do 1 (desni kraj).

3.4 Tro-kanalni indeks refrakcije

Dva danas najrasprostranjenija okruženja za razvoj 3D sistema, Unity [4] i Unreal [5] smatraju da koeficijent Frenelove refleksije ne zavisi od talasne dužine. Ova pretpostavka može da uvede zna ajnu grešku u izra unavanje Frenelove refleksije. Šlik [17] i Cook i Torrance [3] ukazuju na tu injenicu, a kao glavni razlog zašto je potrebno uzeti tu aproksimaciju u nekim slu ajevima je nedostatak pravilno izmerenih vrednosti indeksa refrakcije na više talasnih dužina. Ako su ti indeksi refrakcije poznati, mogu e je izra unati potpuno ta an koeficijent Frenelove refleksije koriste i itav spektar i ponderisati vrednosti na osnovu osobina ljudskog vida i na ina prikaza ra unarskih ekrana [10].

Ovakav na in ra unanja je još uvek previše spor za prikaz slike u realnom vremenu, pa je zato u radu uzeta tro-kanalna aproksimacija indeksa refrakcije. Umesto da se koristi samo jedan indeks refrakcije, koristi e se 3, za svaki kanal (boju) po jedan. Izabrane su primarne boje kompjuterskih ekrana, crvena, zelena i plava. To zna ajno doprinosi preciznosti kona nog rezultata [17].

4. Detalji implementacije

Za razvoj programa za merenje performansi i preciznosti razli itih na ina ra unanja koeficijenta Frenelove refleksije koriš eno je razvojno okruženje Unity (verzija 4.5). Programski kod koji se izvršava na glavnom procesoru je napisan na programskom jeziku C#. Unity koristi Mono virtualnu mašinu da omogu i izvršavanje C# koda na ne-Windows platformama.

Kod koji se izvršava na grafi kom procesoru (programi za sen enje) je napisan u Unity-jevom okruženju *ShaderLab* koriste i jezik za sen enje Cg. Ovaj kod se, u zavisnosti od platforme, prevodi u HLSL⁵ (Microsoft platforme) ili GLSL⁶ (sve ostale platforme). Kod za *Vertex* program za sen enje je zajedni ki za sve programe za ra unanje Frenelovog koeficijenta i zato je odvojen u poseban fajl.

Funkcije za ra unanje svih predstavljenih metoda ra unanja Frenelovog koeficijenta su implementirane u programima za sen enje kao i u kodu koji se izvršava na glavnom procesoru. Jedini izuzetak su teksture tabeliranih funkcija koje se ra unaju samo na glavnom procesoru (jednom, pre upotrebe) i koriste samo u programima za sen enje. Implementacija u programima za sen enje omogu ava pore enje brzine razli itih metoda, kao i greške u prikazu slike. Za sva ra unanja je koriš en broj u pokretnom zarezu sa punom preciznoš u (eng. full precision floating point). Na svim testiranim platformama, takvi realni brojevi predstavljaju se na širini od 32 bita.

Program poseduje mogu nost da izmeri performanse proizvoljnog programa za sen enje. Mogu e je izmeriti i relativnu grešku prikaza koji daje izabrani program za sen enje u odnosu na referentni program. Ovo se postiže tako što se isti objekat crta tri puta. Prvi put se crta izabranim programom, drugi put referentnim, i tre i put se crta tako da sav prostor na ekranu koji objekat zauzima bude bele boje, dok je sve ostalo crno. Te tri slike se prosle uju (u vidu tekstura) u etvrti program za sen enje koji vrši pore enje i proizvodi sliku u kojoj je sve što ne treba da se poredi potpuno belo, dok su pikseli sa izra unatom relativnom razlikom (relativna greška se ra una za svaki kanal ponaosob) sabijeni iz opsega [0-1] u opseg [0-0.9]. Rezultuju a slika se prosle uje centralnom procesoru koji sabira sve relativne greške (u onim pikselima koji nisu potpuno beli) i odre uje prosek. Slike 18, 19, 20 i 21 prikazuju postupak.

⁵ *High-level shader language*, jezik za sen enje za Microsoft platforme.

⁶ OpenGL Shading Language, jezik za sen enje za OpenGL.



Slika 18 - Prva slika za pore enje



Slika 19 - Druga slika za pore enje



Slika 20 - Maska za pore enje



Slika 21 - Rezultat pore enja (poja an 8 puta radi boljeg uo avanja razlika)

Kao što je ranije objašnjeno, indeks refrakcije zavisi od talasne dužine svetlosti. Iz tog razloga, kada se ra una Frenelov efekat, uvek se ra unaju 3 nezavisna Frenelova koeficijenta, po jedan za svaku od primarnih boja za kompjuterske ekrane (crvenu, zelenu i plavu). Svetlosni spektar je kontinualan, pa ne postoji jedinstvena talasna dužina za svaku boju. Ovaj problem je rešen tako što su za svaku boju uzete talasne dužine na sredini njihovog spektra. Za crvenu je uzeto 685 nm, za zelenu je uzeto 535 nm, a za plavu 475 nm.

Sa sajta RefractiveIndex.Info [16] je preuzeta baza podataka o indeksima refrakcije. Svi materijali koji nemaju podatke o indeksima refrakcije u opsegu vidljive svetlosti (390nm do 700nm), kao i materijali koji imaju aproksimirane vrednosti za indekse refrakcije su odba eni. Pomo u podataka iz te baze, u programu je implementirana mogu nost ra unanja indeksa refrakcije sa injenog iz tri komponente (boje), pravljenje teksture tabeliranih funkcija kao i odre ivanje greške pri ra unanju aproksimacija Frenelovog koeficijenta za taj konkretan materijal.

Za merenje performansi je zadužena klasa Benchmark. Ona prima materijal koji je potrebno da prikaže u pozadini, spisak materijala koje je potrebno da izmeri, kao i vreme koliko dugo e da meri svaki materijal. Prijavljuje se FPS Counter klasi koja je obaveštava kada je istekao interval za merenje, kao i koliko slika je prikazano za to vreme. Posle završenog merenja klasa ispisuje vreme renderovanja svakog od materijala koji se merio.

Za merenje preciznosti je zadužena klasa Comparer. Ona prima dva objekta tipa ComparisonCamera (umeju da podese svoju kameru tako da crta samo objekte za pore enje i masku za pore enje), kao i materijal koji se koristi za pore enje. ComparisonCamera objekti prvo iscrtaju svoje objekte u teksture (veli ine ekrana), pa potom te teksture od njih preuzme Comparer objekat. Comparer postavlja potrebne teksture u materijal za pore enje i iscrtava ga u teksturu, iste veli ine kao primljene teksture. Pikseli te teksture se potom itaju i ra una se relativna greška. Comparer ima parametar koji kontroliše koliko slika e da obradi. Nakon završene obrade ispisuje kona nu grešku.

CameraRotator skripta služi da bi rotirala kameru oko zadate ta ke po zadatoj osi na zadatoj udaljenosti. Ima mogu nost da rotira nezavisno od proteklog vremena.

MaterialWavelengthInformation sadrži indeks prelamanja i talasnu dužinu za koju važi taj indeks prelamanja. MaterialSpectrum sadrži informacije o fizi kom materijalu kao i indekse prelamanja za više talasnih dužina. Omogu ava ra unanje tro-kanalnog indeksa refrakcije za taj materijal. MaterialDatabase sadrži više fizi kih materijala (MaterialSpectrum-a).

BenchmarkScene i ComparisonScene su Unity scene koje služe za merenje performansi i merenje preciznosti, tim redom.





Slika 22 - UML dijagram klasa

5. Rezultati merenja

5.1. Uslovi merenja

Merenja performansi su izvršena na jednom prenosivom ra unaru (Lenovo W530 – Intel HD4000 grafi ki procesor) i nekoliko mobilnih telefona (Samsung Galaxy S3, Samsung Galaxy S5, iPhone 5s i Nexus 4). Ovim moblnim telefonima su pokrivene sve 3 dominantne arhitekture na tržištu mobilnih ure aja (Qualcomm Adreno, ARM Mali i Imagination Technologies PowerVR).

Merenja preciznosti su izvršena na desktop ra unaru sa NVIDIA Geforce GTX570 grafi kim procesorom. U prethodnom poglavlju je opisan sistem za upore ivanje prikazanih objekata. Ovaj sistem se koristi za ra unanje relativne greške pri prikazu slike.

Koriš ena su dva 3D modela za merenje preciznosti, standardna kocka sa injena od 8 temena i skulptura koja je prikazana na slici 23 [20]. Kocka je uzeta zbog malog broja relativno velikih trouglova i ravnih strana, dok je skulptura uzeta zbog velikog broja malih trouglova sa normalama pod raznim uglovima.

5.2 Metodologija i ostvareni rezultati

NVIDIA-ina formula za ra unanje Frenelovog koeficijenta nije uzeta u obzir pri merenju preciznosti zato što ne uzima u obzir vrednosti indeksa refrakcije, pa njeno upore ivanje sa metodama koji ga uzimaju u obzir nema smisla. Preciznost se meri na dva na ina. Prvi na in je analiza greške same funkcije koja se koristi za aproksimaciju Frenelovog koeficijenta. Ovo se postiže tako što se funkcija aproksimacije uzorkuje sa milion ta aka koje predstavljaju ugao izme u pravca svetlosti i normale na površinu, uniformno raspore enih od 0° do 90° (oko 11000 uzoraka po stepenu). Sa ovolikim brojem ta aka se postiže prciznost pri ra unanju od barem 6 decimalnih cifara. Za svaku uzorkovanu ta ku, referentna funkcija se uzorkuje u istoj ta ci i ra una se relativna greška. Kao kona na greška se uzima srednja vrednost na enih grešaka. Ovaj postupak se ponavlja za crvenu, zelenu i plavu boju i kona na greška je srednja vrednost te 3 greške.

Drugi na in analize greške je analiza prikaza na ekranu. Koriste i sistem za upore ivanje prikazanih objekata koji je opisan u poglavlju 4, upore uju se proizvedene slike sa aproksimiranim i egzaktnim na inom ra unanja Frenelovih koeficijenata. Ovaj test je izveden zato što prethodni test podrazumeva da e podjednak broj piksela na ekranu da bude pod svakim mogu im uglom (izme u vektora pravca svetlosti i normale na površ), što je skoro nemogu e u stvarnosti. U ovom testu, kamera se okre e oko objekta po osi rotacije <1,1,1> (x,y,z) sa distancom 2m, ukupno 180 slika sa korakom po 1 stepen. Test je izvršen dva puta, jednom sa geometrijskom primitivom (kockom) i jednom sa složenim objektom (skulptura, slika 23).

Broj slika u sekundi na mobilnim ure ajima je limitiran na 60, i ne postoji ni jedan drugi na in da se meri vreme renderovanja slike, osim posmatranja broja slika u sekundi. Zbog ovoga je potrebno vešta ki opteretiti postupak crtanja i smanjiti broj slika u sekundi na ispod 60 pre nego što se zapo nu merenja. Ovo se postiže tako što se uvek preko celog ekrana crta upotrebom ra unski skupog programa za sen enje, nakon ega se crta, isto preko celog ekrana, programom za sen enje ije se performanse mere. Prvo se prikaže samo skup program preko celog ekrana tokom 10 sekundi, prebroji se broj prikazanih slika i pomo u toga se izra una prose no vreme za renderovanje jedne slike. Zatim se zajedno crtaju preko celog ekrana skup program i program koji se meri, isto u trajanju od 10 sekundi. Ponovo se prebroji broj prikazanih slika i izra una prose no vreme za renderovanje jedne slike. Razlika ova dva vremena daje vreme renderovanja merenog programa. Ovaj pristup se koristi pri merenju performansi razli itih na ina ra unanja Frenelovog koeficijenta (tabele 6 i 7).

Testovi su ra eni za dva metala (zlato i platinu) i dva nemetala (voda u te nom obliku i ugljenik u obliku dijamanta). Ovi materijali su izabrani zbog velike razlike u njihovim indeksima refrakcije. Sve greške su predstavljene u procentima, kao relativna greška izme u aproksimacije i ta ne vrednosti. Indeksi refrakcije materijala su prikazani u tabeli 1. Indeksi refrakcije su podeljeni po kanalima (bojama). n je realan deo indeksa refrakcije a k imaginaran. Materijali sa k = 0 su dielektrici, ostalo su metali.

Materijal	Crvena		Zelena		Plava		
	n	k	n	k	n	k	
Zlato	0.23	3.94	0.57	2.18	1.39	1.72	
Platina	2.49	4.44	2.04	3.63	1.9	3.28	
Voda (te no stanje)	1.331	0	1.3336	0	1.336	0	
Ugljenik (dijamant)	2.41	0	2.42	0	2.43	0	

Tabela 1 - Indeksi refrakcije koriš enih materijala



Slika 23 - Skulptura koriš ena za pore enje preciznosti

Tabele 2 i 3 prikazuju relativnu grešku funkcija za aproksimaciju u odnosu na referentnu funkciju. Ovo se ra una pomo u prethodno opisanog uzorkovanja.

Tabele 4 i 5 prikazuju relativni grešku pri prikazu slike pomo u funkcija za aproksimaciju u odnosu na odgovaraju u referentnu funkciju. Test se radi za oba odabrana 3D objekta.

Materija	ıl Res	Korigov	ani Šlik				
Zlato		0.98%	0.82	2%			
Platina	Tabala 0	5.31%	2.03	7%			
	Tabela 2 -	Greska funkcije	za metale				
	Materijal		Šlik				
	Voda (te no stanje	e)	8.68%				
	Ugljenik (dijamani	:)	3.8%				
	Tabela 3 - Greška funkcije za dielektrike						
Materijal	Objekat	Šlik	Korigovani Šlik	Tekstura tabeliranih funkcija			
	Kocka	0.59%	0.52%	0.02%			
Zlato	Skulptura	0.87%	0.79%	0.02%			
	Kocka	2.4%	1.16%	0.01%			
Platina	Skulptura	3.03%	1.66%	0.01%			
l	•						

Materijal	Objekat	Šlik	Tekstura tabeliranih funkcija
Voda (te_no	Kocka	7.7%	0.52%
stanje)	Skulptura	10.1%	0.58%
Ualionik	Kocka	2.62%	0.09%
(dijamant)	Skulptura	3.19%	0.09%

Tabela 5 - Greška pri prikazu za dielektrike

Ure aj	Grafi ki procesor	Egzaktna za dielektrike	Šlik za dielektrike	Egzaktna za metale	Šlik za metale	Korigovani Šlik	Tekstura tabeliranih funkcija	NVIDIA
Lenovo W530	Intel HD4000	100%	54%	143%	59%	70%	50%	56%
Samsung Galaxy S3	Mali 400	100%	42%	289%	62%	62%	36%	47%
Apple iPhone 5s	PowerVR G6430	100%	60%	157%	75%	84%	43%	60%
Google Nexus 4	Adreno 320	100%	32%	141%	61%	80%	27%	37%
Samsung Galaxy S5	Adreno 330	100%	33%	131%	61%	75%	27%	38%

Tabela 6 - Performanse metoda ra unanja koeficijenta u odnosu na egzaktnu formulu za dielektrike. Manje vrednosti ozna avaju brži algoritam

Tabela 6 prikazuje performanse (vreme potrebno za renderovanje) za svaki na in ra unanja Frenelovog koeficijenta, po ure aju. Kao referentna brzina je uzeta brzina renderovanja egzaktne formule za dielektrike, i sve ostale brzine su relativne u odnosu na nju.

5.3 Diskusija

5.3.1 Preciznost

Ako posmatramo metale (tabele 2 i 4) možemo uo iti da zlato ima mnogo manju relativnu grešku od platine (u svim slu ajevima). Ovo nastaje zbog problema sa

Šlikovom aproksimacijom koji je spomenut ranije (odeljak 3.1.3): za velike vrednosti indeksa refrakcije (realnog dela u slu aju metala) se gubi na preciznosti. Može da se primeti da faktor korigovanja zna ajno poboljšava preciznost u slu aju platine, dok je za zlato poboljšanje minimalno.

Greška pri merenju preciznosti prikaza (tabela 4) je o ekivano manja od greške same funkcije aproksimacije (tabela 2) za metale. Ovo se objašnjava injenicom da u realnim slu ajevima broj piksela pod ekstremnim uglovima pod kojima je greška ve a je manji od broja piksela pod ne-ekstremnim uglovima. Ista logika se primenjuje na rezultate kocke u pore enju sa skulpturom. Kod kocke je veoma mali broj piksela pod ekstremnim uglovima u pore enju sa skulpturom. Tako e se može primetiti da teksture pretrage postižu odli ne rezultate u slu aju metala sa ne više od 0.02% greške.

Posmatraju i dielektrike (tabele 3 i 5), može se primetiti da Šlikova aproksimacija u slu aju vode ima veliku grešku. Ovaj problem nastaje zato što funkcija ima veoma malu vrednost na velikom delu intervala, pa i mala odstupanja proizvode veliku relativnu grešku. Apsolutna greška je vrlo mala - manja od 0.01 u 80% intervala. Ono što je interesantno je što se pri merenju preciznosti prikaza 3D modela skulpture za vodu dobila greška od 10.1% (tabela 5), dok se pri merenju greške funkcije aproksimacije (tabela 3) dobila manja greška, samo 8.68%, što je neo ekivano. Ovo je nastalo upravo zbog malih vrednosti sa malim razlikama i nepreciznosti brojeva u pokretnom zarezu u grafi kim procesorima. Tekstura tabeliranih funkcija i u ovom slu aju ima malu grešku.

Može se primetiti da je u pogledu preciznosti (tabele 4 i 5) tekstura pretrage najbolja, sa greškom ne ve om od 0.58%, i 10 do 100 puta manjom prose nom greškom od slede e najpreciznije aproksimacije.

5.3.2 Performanse

Sa stanovišta performansi, egzaktna formula za dielektrike je uzeta kao referenca, i sve ostale aproksimacije su ra unate u odnosu na nju. Rezultati merenja performansi su dati u tabeli 6.

Odmah može da se primeti da je NVIDIA aproksimacija sporija od Šlikove za dielektrike. Egzaktna formula za metale ima oko 90% više instrukcija (na Adreno arhitekturi), uklju uju i i dva dodatna korenovanja, u odnosu na egzaktnu formulu za dielektrike. Zbog toga je za u uju e što je samo 50% sporija, osim na Mali 400 grafi kom procesoru, na kome je razlika u brzini ogromna. Iz prethodnog iskustva sa Mali 400 arhitekturom, najverovatniji razlog za ovo je kompleksnost programa za sen enje. Posle odre ene granice, vreme crtanja po inje da raste eksponencijalno.

Šlikova aproksimacija se jako dobro pokazala, u svim slu ajevima je barem duplo brža od odgovaraju e egzaktne formule. Faktor korigovanja uti e na performanse Šlikove aproksimacije, ali ne zna ajno, što je i o ekivano.

Najbolje performanse imaju teksture tabeliranih funkcija, na svim arhitekturama su najbrže i to 2 do 4 puta brže od egzaktne formule za dielektrike (tabela 6).

Ure aj	Grafi ki procesor	Egzaktna za dielektrike	Šlik za dielektrike	Egzaktna za metale	Šlik za metale	Korigovani Šlik	Tekstura tabeliranih funkcija	NVIDIA
Lenovo W530	Intel HD4000	0.769	0.418	0.427	1.1	0.45	0.383	0.537
Samsung Galaxy S3	Mali 400	11.3	4.69	5.3	32.64	7.02	4.05	7.05
Apple iPhone 5s	PowerVR G6430	1.69	1.01	1.01	2.66	1.26	0.72	1.42
Google Nexus 4	Adreno 320	4.033	1.31	1.51	5.69	2.44	1.09	3.21
Samsung Galaxy S5	Adreno 330	9.08	2.96	3.48	11.9	5.52	2.43	6.79

Tabela 7 - Apsolutna vremena renderovanja pravougaonika po slici pri testu performansi u milisekundama.

Test performansi je podrazumevao prikaz Frenelove refleksije preko celog ekrana. U zavisnosti od sadržaja koji se u praksi prikazuje, procenat ekrana (broj piksela) za koji je potrebno da se ra una Frenelova refleksija može biti veoma velik. Zbog toga je interesantno pogledati i red veli ina apsolutnih vremena (tabela 7). Na *Samsung Galaxy S5* telefonu je vreme potrebno za prikaz egzaktne formule za metale reda veli ine 10ms. Zbog drugih prora una koji moraju da se urade na grafi kom procesoru pri prikazu svake slike, to vreme nije prihvatljivo (budžet je 33.33ms ako se cilja 30 slika po sekundi). Sa druge strane, to vreme je reda veli ine 3ms na *iPhone 5s*, što jeste prihvatljivo. Potrebno je uzeti u obzir da *iPhone 5s* ima ekran sa 2.85 puta manje piksela od *Samsung Galaxy S5*, što je zna ajan faktor u razlici u brzini izme u ta dva telefona, pošto se ra unanje Frenelovog koeficijenta skoro u potpunosti radi u *fragment* delu programa za sen enje.

5.3.3 Greška računanja indeksa refrakcije

Pošto se indeks refrakcije aproksimira polovinom intervala za svaku boju, to je mesto koje može da dovede do velike greške. Preciznije bi bilo kada bi se koristio celokupan spektar za odre ivanje koeficijenata refleksije [10], ali je to previše ra unski zahtevno da bi se radilo u programu za sen enje.

Materijal	Relativna Greška
Aluminijum	0.30%
Srebro	1.31%
Platina	1.92%
Zlato	8.58%

Tabela 8 - Relativna greška boje materijala pod uglom od 0 stepeni izme u normale i upadne svetlosti

U tabeli 8 su date greške koje nastaju pri ra unanju pomo u aproksimiranih indeksa refrakcije u pore enju sa vrednostima koje su izra unate koriš enjem celokupnog spektra [21].

6. Zaključak

Cilj ovog rada je bilo upore ivanje metoda za ra unanje Frenelovog koeficijenta po preciznosti, performansama i sveopštoj upotrebljivosti. Kao rezultat istraživanja, predloženo je da se ra unaju 3 razli ita koeficijenta, za svaku od primarnih boja kompjuterskih ekrana po jedan (crvena, zelena i plava). Ovim se dobija mnogo preciznija Frenelova refleksija u pore enju sa onom koja se koristi u ve ini sistema za prikaz u realnom vremenu. Specijalna pažnja je posve ena metalima, zbog velikog uticaja spekularne Frenelove refleksije na njihovu boju.

Od svih metoda aproksimacije, metoda kompanije NVIDIA se pokazala kao najslabija. Sporija je od Šlikove aproksimacije i nije fizi ki zasnovana. Šlikove aproksimacije su se pokazale dobro, brže su od egzaktne formule (i za metal i za dielektrike) i daju zadovoljavaju e rezultate. Verovatno najbolja metoda je metoda tekstura pretrage, u svim slu ajevima je najbrža i ima najmanju grešku. Jedina mana ove metode je nefleksibilnost – potrebno je napraviti teksture za sve kombinacije (sredina, materijal), što može da oduzme mnogo vremena i memorije ako postoji mnogo sredina.

Merenja apsolutnih vremena potrebnih za iscrtavanje na mobilnim ure ajima pokazuju da neki ure aji (iPhone 5s na primer) ve sada mogu da koriste egzaktnu formulu za metale. Ako se razvoj mobilnih ure aja nastavi sadašnjim tempom, uskoro se može o ekivati da e svi ure aji mo i da je koriste bez zna ajnog gubitka performansi.

Analizom rezultata pokazalo se da je za neke materijale (na primer zlato) greška aproksimacije indeksa refrakcije nezanemarljivo velika (8.5%), ve a od grešaka zbog aproksimacije Frenelovih koeficijenata. Dalje istraživanje bi moglo da se kre e u pravcu preciznijeg izra unavanja indeksa refrakcije za svaku od primarnih boja, koriste i celokupni spektar za njihovo izra unavanje, a ne tri diskretne talasne dužine. Tako e se postavlja pitanje da li je uzimanje srednje vrednosti relativne greške od sva tri kanala (boje) najbolji na in za ra unanje te greške. Pošto je ljudsko oko osetljivije na odre ene talasne dužine [22], možda bi greška svakog kanala trebala da se ponderiše odre enim koeficijentom? Odgovor na to pitanje bi mogao da bude predmet narednog istraživanja.

Reference

- 1. Chris Wynn, An Introduction to BRDF-Base Lighting, http://www.cs.ucla.edu/~zhu/tutorial/An_Introduction_to_BRDF-Based_Lighting.pdf, NVIDIA Corporation, 2000.
- 2. James F. Blinn, Models of light reflection for computer synthesized pictures, SIGGRAPH '77 Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 192-198, 1977.
- 3. Robert L. Cook, Kenneth E. Torrance A Reflectance Model for Computer Graphics, Proceeding SIGGRAPH '81 Proceedings of the 8th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 307-316, 1981.
- 4. Aras Pranckevi ius, Physically based shading in Unity, GDC 2014
- 5. Brian Karis, Real shading in Unreal Engine 4, SIGGRAPH 2013
- 6. Landscape HD Walls, <u>http://www.landscapehdwalls.com/splendid-sunlight-warming-the-rocks-5821/</u>, poslednji pristup: 6.10.2014.
- 7. Rock, Paper, Shotgun, <u>http://www.rockpapershotgun.com</u>, poslednji pristup: 6.10.2014.
- 8. GPU Gems 3, Advanced Techniques for Realistic Real-Time Skin Rendering, <u>http://http.developer.nvidia.com/GPUGems3/gpugems3_ch14.html</u>, poslednji pristup: 6.10.2014.
- 9. http://en.wikipedia.org/wiki/Diffuse_reflection, poslednji pristup: 6.10.2014.
- 10. Matt Pharr, Greg Humphreys, Physically Based Rendering, Second Edition: From Theory To Implementation, 2010.
- 11. Andrew S. Glassner, Principles of digital image synthesis, 1995.
- 12. Brent Burley, Physically-Based Shading at Disney, 2012.
- 13. Sebastien Lagarde, Memo on Fresnel equations, <u>http://seblagarde.wordpress.com/2013/04/29/memo-on-fresnel-equations/</u>, poslednji pristup: 24.09.2014.
- 14. Wikipedia, <u>http://en.wikipedia.org/wiki/Visible_spectrum</u>, poslednji pristup: 24.09.2014.
- 15. Nvidia Developer zone, <u>http://http.developer.nvidia.com/CgTutorial/cg_tutorial_chapter07.html</u>, poslednji pristup: 24.09.2014.
- 16. Cg language Specification, <u>http://http.developer.nvidia.com/Cg/Cg_language.html</u>, poslednji pristup: 28.09.2014.
- Christophe Schlick, An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering, Computer Graphics Forum Volume 13, Issue 3, pp. 233-246, Avgust 1994.
- 18. István Lazányi i László Szirmay-Kalos, Fresnel Term Approximation for Metals, WSCG Short Papers, pp. 77-80, 2005.
- 19. M. N. Polyanskiy, Refractive index database, <u>http://refractiveindex.info</u>, poslednji pristup 4.10.2014.
- 20. Madonna and baby Christ statue model, <u>http://artist-</u> <u>3d.com/free_3d_models/dnm/model_disp.php?uid=591</u>, poslednji pristup: 6.10.2014.

- 21. Sebastien Lagarde, Feeding a physically based shading model, <u>http://seblagarde.wordpress.com/2011/08/17/feeding-a-physical-based-lighting-</u> mode/, poslednji pristup: 6.10.2014.
- 22. Kenneth R. Spring, Thomas J. Fellers i Michael W. Davidson, Human Vision and Color Perception, <u>http://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/humanvisionintro.html</u>, poslednji pristup: 7.10.2014.