

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 5004

Modeliranje i prikaz ljudske kože

Bruno Banek

Zagreb, svibanj 2017.

*Umjesto ove stranice umetnite izvornik Vašeg rada.
Da bi ste uklonili ovu stranicu obrišite naredbu \izvornik.*

*Ovim putem zahvaljujem se mag. ing. comp. Domagoju Šalkoviću, te mentorici
prof. dr. sc. Željki Mihajlović za ustupljeno vrijeme i pomoć.*

SADRŽAJ

Popis slika	vi
1. Uvod	1
2. Programski alati	2
3. Izrada 3D modela glave	3
3.1. Referentne fotografije	3
3.2. Modeliranje lica	4
3.3. Modeliranje uha	6
3.3.1. Izrada predloška	7
3.3.2. Modeliranje uha zasnovano na predlošku	7
3.3.3. Spajanje modela uha i glave	8
3.4. Dodavanje detalja	9
4. Modeliranje i teksturiranje oka	12
4.1. Sjenčari bjeloočnice i šarenice	12
5. Ljudska koža	15
5.1. Građa kože	15
5.2. Utjecaj svjetlosti na površinu kože	16
6. Izrada tekstura	19
6.1. Priprema za izradu tekstura	19
6.2. Izrada teksture boje	20
6.3. Izrada teksture neravnina	22
6.4. Izrada tekstura podpovršinskog raspršenja	23
6.5. Izrada teksture utjecaja zrcalnih i difuznih odsjaja	24

7. Sjenčar kože	26
7.1. Pisanje sjenčara unutar Blendera	26
7.2. Ambijentna komponenta sjenčara	27
7.3. Difuzna komponenta sjenčara	29
7.4. Zrcalna komponenta sjenčara	31
7.5. Povezivanje zrcalne, difuzne i ambijentne komponente	33
7.6. Sjenčar dubine	34
7.7. Sjenčar podpovršinskog raspršenja svjetlosti	37
7.8. Završni prikaz kože	38
8. Zaključak	40
Literatura	41

POPIS SLIKA

3.1. Referentne fotografije modela	3
3.2. Ispravno centrirane referentne fotografije	4
3.3. Prikaz grubih petlji bridova lica	5
3.4. Prikaz kostura nosa i kapka oka	5
3.5. Prikaz grubog 3D modela glave	6
3.6. Predložak uha napravljen u programskom alatu GIMP 3.6a i referentna fotografija uha 3.6b	7
3.7. Završni model uha	8
3.8. Spajanje modela uha i glave	9
3.9. Završni izgled 3D modela glave	10
3.10. Detalji pora kože na obrazu 3.10a, nabori kože na kapku oka 3.10b i detalji građe usnica 3.10c	11
4.1. Završni izgled 3D modela oka	13
4.2. Postavke sjenčara bjeloočnice i leće	14
4.3. Postavke sjenčara šarenice	14
5.1. Reducirani prikaz slojeva kože	16
5.2. Prikaz mogućih puteva zraka svijetlosti kroz kožu	17
5.3. Prikaz pozadinskog raspršenja svijetlosti	18
6.1. Prikaz označenih bridova koji predstavljaju šavove za raspoređivanje uv koordinata teksture	20
6.2. Prikaz modela obavijenog teksturom za kontrolu razvlačenja	21
6.3. Prikaz metode projekcijskog preslikavanja referentnih fotografija na model	22
6.4. Prikaz nepravilnosti na teksturi boje	22
6.5. Prikaz teksture neravnina	23

6.6. Prikaz tekstura podpovršinskog raspršenja svjetlosti epiderme 6.6a, derme 6.6b, i hipoderme 6.6c	24
6.7. Prikaz teksture utjecaja zrcalnih i difuznih odsjaja	25
7.1. Prikaz ambijentne komponente osvjetljenja modela	27
7.2. Prikaz iscrtanog modela koristeći vlastiti sjenčar ambijentnog osvjetljenja	28
7.3. Prikaz iscrtanog modela koristeći vlastiti sjenčar difuznog osvjetljenja	30
7.4. Prikaz iscrtanog modela koristeći vlastiti sjenčar difuznog osvjetljenja i teksturu boje	30
7.5. Prikaz iscrtanog modela koristeći sjenčar difuznog i ambijentnog osvjetljenja	31
7.6. Prikaz iscrtanog modela koristeći sjenčar zrcalnog osvjetljenja	32
7.7. Prikaz male hrapavosti materijala modela 7.7a i nešto veće hrapavosti 7.7b	33
7.8. Prikaz doprinosa sjenčara ovisno o vrijednosti varijable <i>faculty</i>	34
7.9. Prikaz iscrtanog modela koristeći teksturu kao upravljački faktor miješanja sjenčara difuzne i zrcalne komponente	35
7.10. Prikaz sjenčara dubine uz granične vrijednosti dubine 0.5 7.10a, 1.5 7.10b i 3.0 7.10c	37
7.11. Prikaz sjenčara podpovršinskog raspršenja uz vrijednosti mjere raspršenja 0 7.11a, 4 7.11b i 15 7.11c	38
7.12. Završni prikaz modela	39
7.13. Završni detaljniji prikaz modela	39

1. Uvod

Modeli ljudskih tijela pojavljuju se u gotovo svakom aspektu računalne grafike. Animirani filmovi, videoigre i medicina samo su neke od najvećih područja uporabe, no uporaba modela ljudskih tijela seže i u druga, manja područja, te uz takvu raširenu primjenu lako je zaključiti kako težnja za što realističnijim prikazom ljudskog tijela neprestano raste. Razvojem sklopovskog dijela računala dostižu se nove razine realističnog prikaza modela.

Ukoliko govorimo o površinskom prikazu tijela, najbitniji dijelovi koji sačinjavaju realističan prikaz čovjeka su oblik tijela, kosa, oči, proporcionalnost izgleda glave i tijela, te naravno koža, kao najveći ljudski organ. Težnjom za što realističnijim prikazom ljudskog tijela, teži se i što realističnijem prikazu ljudske kože.

Ljudska koža je veoma kompleksan i slojevit organ koji se sastoji od više dijelova, od kojih svaki drugačije reagira na svjetlost. Također je veoma složene površinske strukture, te je kao takva veoma zahtjevna za izravno predstavljanje i prikaz na računalu. Zbog prethodno navedenih razloga koriste se različite metode simulacije i pojednostavljenih prikaza, koji daju dosta dobru simulaciju izgleda kože.

Unutar ovog rada prikazat će se postupak izrade 3D modela ljudskog lica, neke od metoda simulacije prikaza kože, te problema koji se pojavljuju pri prikazu iste.

2. Programski alati

Od programskih alata potrebnih za izradu 3D modela i animacija kao najpoznatiji ističu se 3ds Max, Maya i Blender. Pri izradi modela unutar ovog rada, korišten je programski alat Blender zbog svojeg interaktivnog i jednostavnog sučelja, te dostupnosti. Blender je besplatni alat otvorenog izvora informacija (engl. *open-source*) koji je korišten pri izradi skica za animacije u filmu Spider-Man 2, no i u mnogim dokumentarcima, animacijama i sl. Blender nema nikakvih ograničenja te u usporedbi s drugim 3D softverom ima relativno male sistemske zahtjeve, te je kao takav idealan za izradu modela u ovom radu.

3. Izrada 3D modela glave

3.1. Referentne fotografije

Prije same izrade modela dobra je praksa korištenje referentnih fotografija koje mogu poslužiti za izravno modeliranje objekata prema njima, ili kao solidna referenca za neke najbitnije karakteristike modela koje je lakše vizualno predočiti kada postoji stvarna fotografija koju možemo vidjeti. U ovom radu prilikom izrade modela ljudskog lica koristio sam fotografije koje sam osobno fotografirao.

Pri stvaranju referentnih fotografija treba uzeti u obzir osvjetljenje, te jednaku udaljenost od modela pri fotografiranju iz različitih pozicija. Ukoliko je osvjetljenje na fotografijama različito fotografije se neće biti u mogućnosti koristiti pri izradi tekstura projekcijom na model, isto tako ukoliko osvjetljenje modela nije jednoliko pojavljivat će se spekularni odsjaji svjetla na modelu koji će onemogućiti izradu tekstura iz fotografija. Također, budu li fotografije modela iz različitih pozicija fotografirane iz različitih udaljenosti pojavit će se problemi pri postavljanju fotografija u jednakim mjerilima unutar Blendera. Slika 3.1 prikazuje fotografije korištene pri izradi 3D modela ljudskog lica unutar ovog rada.



(a) Referentna fotografija modela sprijeda

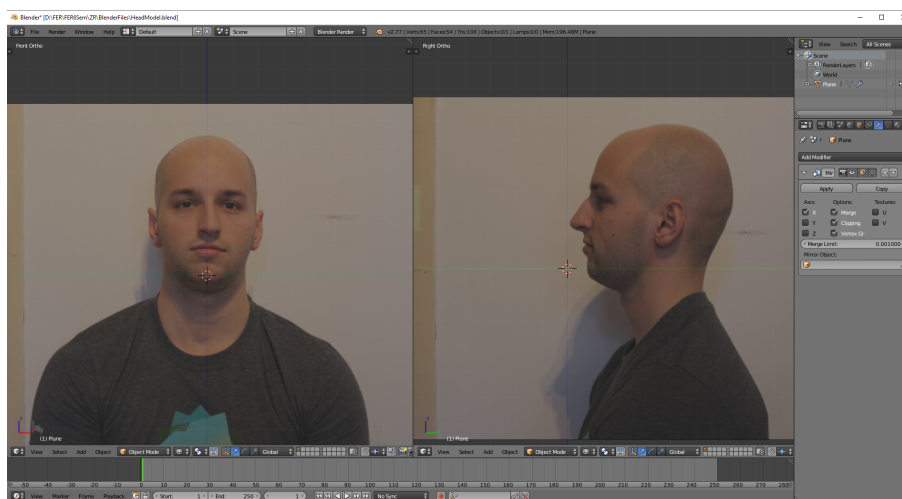
(b) Referentna fotografija modela iz profila

Slika 3.1: Referentne fotografije modela

3.2. Modeliranje lica

Postoje mnogo različitih metoda modeliranja objekata u virtualnoj sceni, no najpoznatiji su modeliranje geometrije čvrstim tijelima, modeliranje parametarskim krivuljama i plohama, volumenski prikazi objekata, te prikaz geometrije poligonima. Pri izradi modela ljudskog lica, zbog njegove kompleksnosti, ponajviše se koriste prikazi geometrije poligonima i modeliranje parametarskim krivuljama i plohama. Modeliranje objekta parametarskim krivuljama i plohama, zbog kontrolne mreže točaka, pogodno je za upravljanje promjenama geometrije objekta pri animaciji, dok nam prikaz geometrije poligonima omogućava kvalitetnu izradu 3D modela, ali je dosta spor i dugotrajan proces, te zahtjeva ručno razmještanje vrhova i poligona kako bi se ostvario željeni rezultat. Unutar ovog rada, za izradu 3D modela ljudskog lica, korišten je postupak prikaza geometrije poligonima. Zbog kompleksnosti i dugotrajnosti procesa izrade modela ljudskog lica, neće biti opisani svi koraci, već samo najbitniji koraci izrade modela.

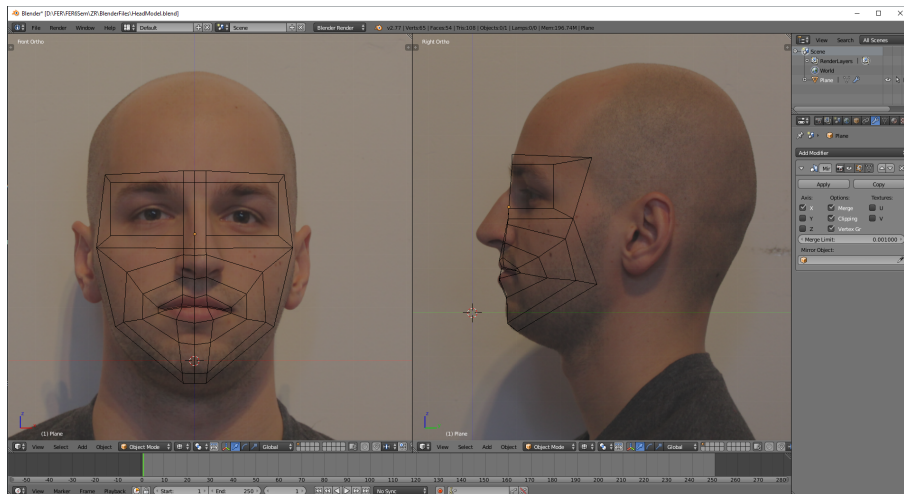
Prije početka izrade modela potrebno je centrirati referentne fotografije kako bismo nesmetano mogli mijenjati ortografske projekcije modela, iz ortografske projekcije po y-osi na ortografsku projekciju po x-osi. Time ćemo biti u mogućnosti mijenjati pogled na model, s izravnog prednjeg pogleda na bočni pogled iz profila. Ispravnim namještanjem referentnih fotografija spremni smo za početak izrade modela. Slika 3.2 prikazuje ispravno centrirane referentne fotografije unutar programskog alata Blender, na kojima je moguće vidjeti kako su najbitnije točke kao što su nos, oči i usta poravnate.



Slika 3.2: Ispravno centrirane referentne fotografije

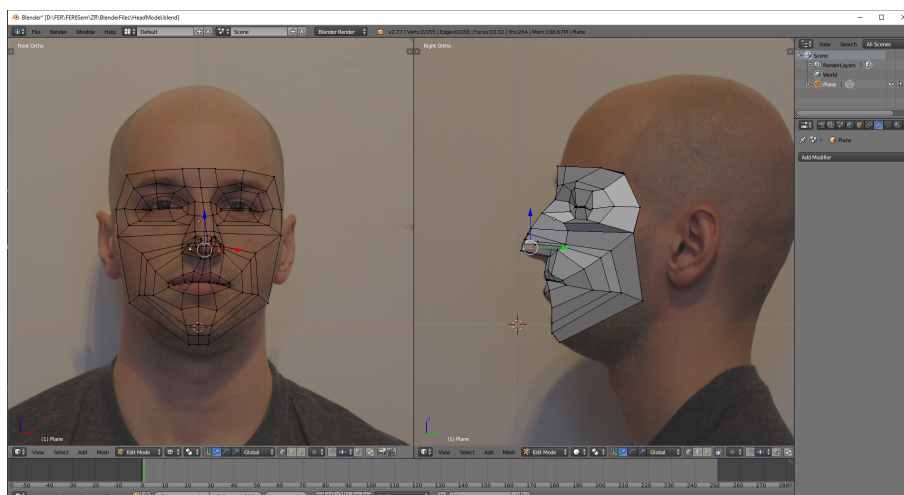
Modeliranje ljudskog lica svodi se na poravnavanje vrhova poligona s referentnim fotografijama, održavajući pritom glatke linije bridova poligona oko očiju i usta.

Slika 3.3 prikazuje početak modeliranja lica sa ugrubo ostvarenim petljama bridova oko očiju i usta.



Slika 3.3: Prikaz grubih petlji bridova lica

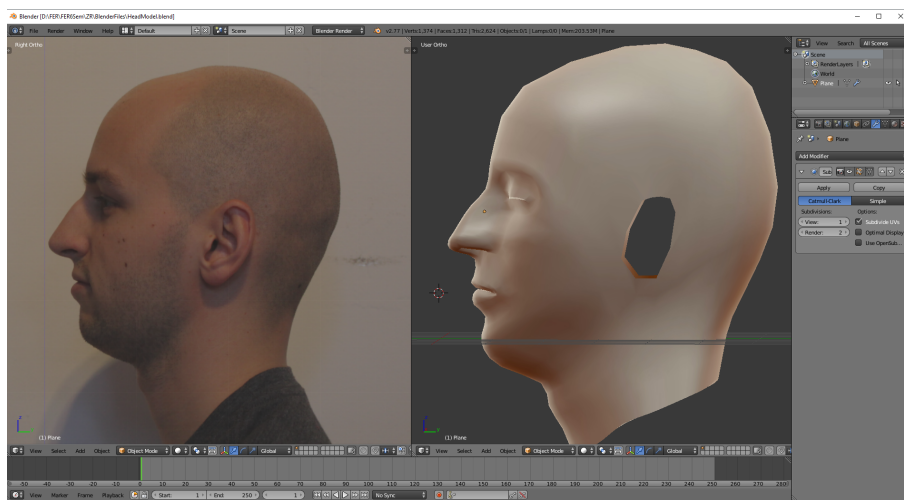
Nakon postavljanja osnovnih linija bridova uz oči i usta, uzimaju se središnji vrhovi modela, te se izvlače (engl. *extrude*) novi vrhovi koji sačinjavaju osnovnu konstrukciju nosa. Dodatnim istiskivanjem vrhova između prvotnih i novo istisnutih vrhova dobivaju se nosne šupljine. Također izravnavanjem po x-osi petlje vrhova najbliže očima ostvaruje se osnovna podloga za kapke očiju. Slika 3.4 prikazuje ostvaren kostur nosa i kapka očiju.



Slika 3.4: Prikaz kostura nosa i kapka oka

Sljedeći korak je označavanje (engl. *select*) vrhova koji se nalaze na čelu lica, i njihovo uzastopno izvlačenje uz rub glave modela na referentnim fotografijama, ostvaruje se osnovni obris glave. Ponovi li se isti postupak i za vrhove koji čine bradu, uz rub

vrata modela na referentnim fotografijama, te spajanjem tih vrhova s vrhovima obrisa glave, dobiva se veoma grub 3D model glave, s rupom u području predviđenom za uši. Radi glađeg prikaza poligona, Blender nudi opciju glatkog sjenčanja (engl. *smooth shading*) koja primjenjuje Gouraudovo sjenčanje na razini vrha, te tako prikazuje glađe prijelaze između poligona 3D modela. Također, Blender nudi i modifikator podjele poligona na manje poligone (engl. *subdivision surface modifier*) koji razdjeljuje poligone na više manjih poligona koristeći Catmull-Clarkovu metodu razdjeljivanja poligona koja je detaljno opisana u E.Catmull [3]. Slika 3.5 prikazuje grub 3D model glave za glađen glatkim sjenčanjem, te dodatno podijeljen jednostrukim razdjeljivanjem ploha prethodno spomenutim modifikatorom.



Slika 3.5: Prikaz grubog 3D modela glave

Ovisno o željenim detaljima i kvaliteti modela, potrebno je ručno dodati još vrhova i poligona kako bi se ostvario detaljniji prikaz. Detaljniji opisi modeliranja ljudskog lica uz poneke dodatne tehnike mogu se pronaći na Alger [1].

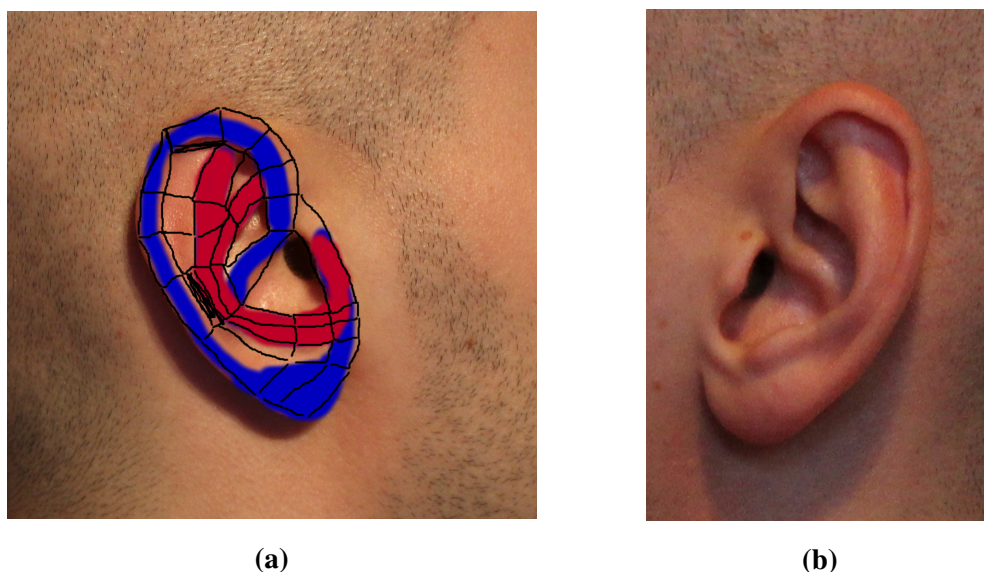
3.3. Modeliranje uha

Jedan od složenijih dijelova ljudskog tijela, kada govorimo o modeliranju, zasigurno je uho. Zbog svoje kompleksne građe pune šupljina i izbočina teško ga je izmodelirati bez korištenja većeg broja poligona, a zbog male površine u odnosu na cijelu glavu zapravo ne bismo željeli potrošiti velik broj poligona na tako malenu površinu. Ipak, postoje metode modeliranja ljudskog uha koje uvelike olakšavaju taj postupak. Unutar ovog rada korišten je relativno jednostavan algoritam modeliranja uha zasnovan na predlošku.

3.3.1. Izrada predloška

Kako bi se izradio predložak uha, potrebno je imati referentnu fotografiju uha kojeg se želi napraviti. Također bit će nam potreban neki od alata za uređivanje slika kao što su GIMP ili Photoshop. Zbog svoje dostupnosti i jednostavnosti uporabe, unutar ovog rada korišten je programski alat GIMP za uređivanje referentne fotografije uha, te kasnije za uređivanje tekstura.

Pokretanjem programskog alata GIMP imamo mogućnost stvaranja nove slike ili učitavanja postojeće slike nad kojom želimo raditi neke promjene. Pošto želimo raditi promjene nad referentnom fotografijom uha, odabrat ćemo opciju učitavanja postojeće slike, te odabrati sliku uha. Sljedeći korak prema izradi predloška za modeliranje je iscrtavanje obrisa uha markerom, podjeljujući pritom rub na četverokute. Zatim treba podijeliti sve izbočine na četverokute, i spojiti sve četverokute izbočina s četverokutima rubova uha, čime se dobivaju novi četverokuti koji predstavljaju udubine. Slika 3.6 prikazuje predložak koji je korišten pri modeliranju uha unutar ovog rada, te referentnu fotografiju iz koje je predložak napravljen.

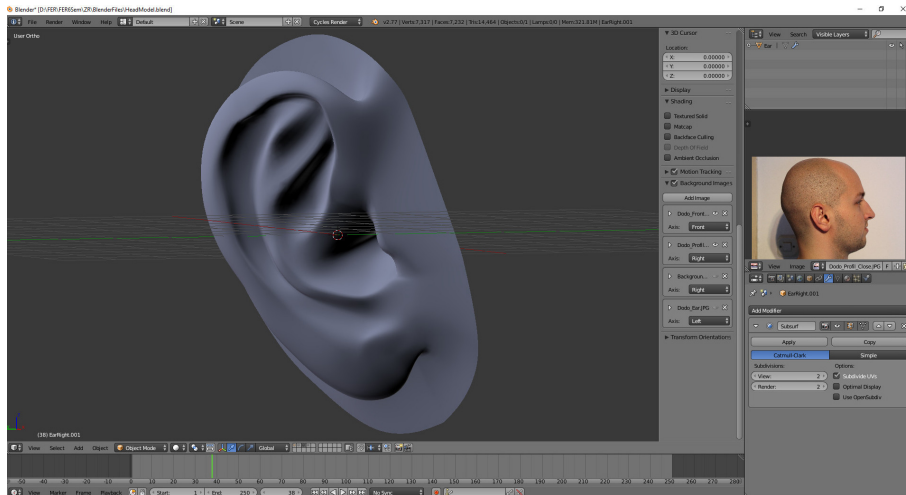


Slika 3.6: Predložak uha napravljen u programskom alatu GIMP 3.6a i referentna fotografija uha 3.6b

3.3.2. Modeliranje uha zasnovano na predlošku

Korištenjem prethodno izrađenog predloška postupak modeliranja postaje relativno jednostavan. Prvi korak je postavljanje ortografske projekcije na xy-ravninu. Zatim

stvaramo poligone tako da popunjavaju četverokute na predlošku, te naposljetku povećavamo z-koordinatu vrhova onih poligona koji se nalaze na izbočinama uha, a smanjujemo z-koordinatu onih vrhova koji se nalaze na udubinama uha. Označe li se svi vanjski vrhovi uha, tada izvlačenjem novih vrhova iz njih stvaramo stražnju površinu uha. Preostaje još samo podešavati vrhove dok se ne dobije željeni oblik, te upotrijebiti modifikator za razdjeljivanje poligona i glatko sjenčanje kako bi se površina zagladila. Slika 3.7 prikazuje finalni model uha.



Slika 3.7: Završni model uha

3.3.3. Spajanje modela uha i glave

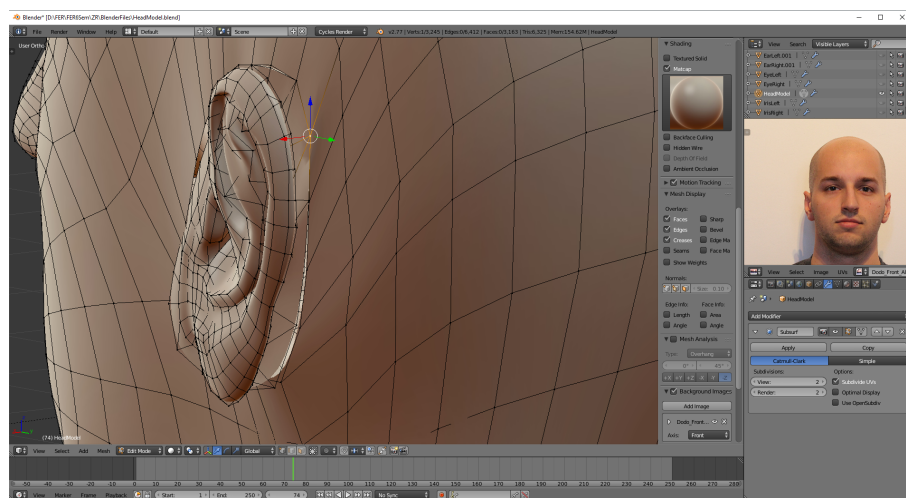
Nakon modeliranja uha i glave, preostaje ih spojiti u jedan model. Možda se taj postupak čini jednostavan, no zapravo je dosta kompleksan. Obrub uha pretpostavljen za spajanje s glavom ima različit broj vrhova nego što to ima obrub vrhova glave na području uha. Kako bi se poligoni glave i uha uspješno spojili u jedan model, potrebno je izjednačiti broj vrhova na prethodno spomenutim područjima, dodavanjem novih vrhova ili stapanjem više vrhova u jedan.

Ukoliko se koristi metoda dodavanja vrhova treba imati na umu da se ne mogu vrhovi samo stvoriti na bridovima, već se moraju četverokuti podijeliti na dva nova četverokuta kako bismo dobili jedan novi vrh. Postupak se ponavlja duž linije četverokuta kojeg smo prvotno podijelili na dva nova, stvarajući tako povećan broj nove geometrije. Taj postupak u praksi se naziva presijecanje petlje (engl. *loop cut*). Postupak je jednostavan ali stvara mnogo nove, nepotrebne geometrije.

Metoda stapanja više vrhova u jedan zasniva se na stapanju dvaju krajnjih vrhova susjednih četverokuta u zajednički vrh, mijenjajući pritom broj rubnih vrhova s tri na

jedan. Posljedica spajanja vrhova je nastanak trokuta umjesto prethodnih četverokuta što predstavlja problem jer narušava konzistentnost geometrije, te može izazvati čudne, nepredvidljive artefakte. Zbog toga potrebno je raditi dodatne preinake nad poligonima kako bi ponovno ostvarili konzistentnost četverokuta. Ovaj postupak je zbog brojnih ručnih promjena složeniji od metode dodavanja vrhova, ali je broj krajnjih poligona manji.

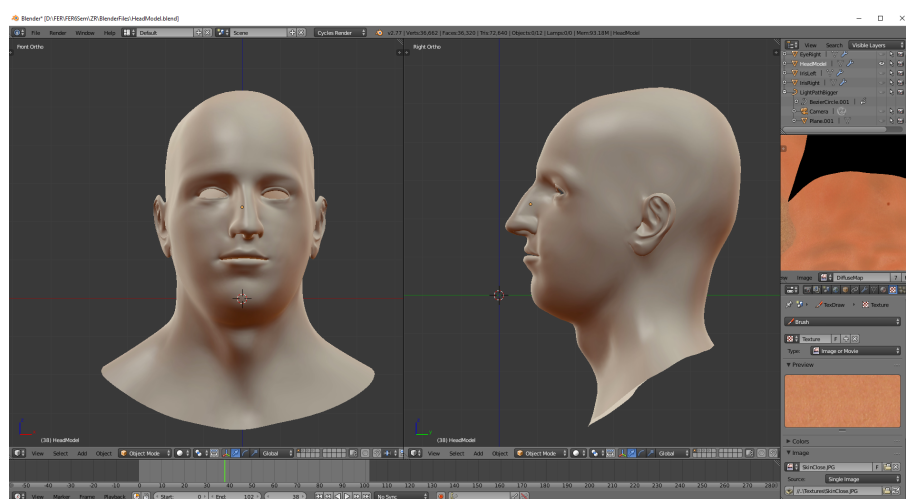
Prilikom spajanja modela uha i glave unutar ovog rada korištene su obje metode. Slika 3.8 prikazuje trenutak u postupku spajanja modela uha i glave.



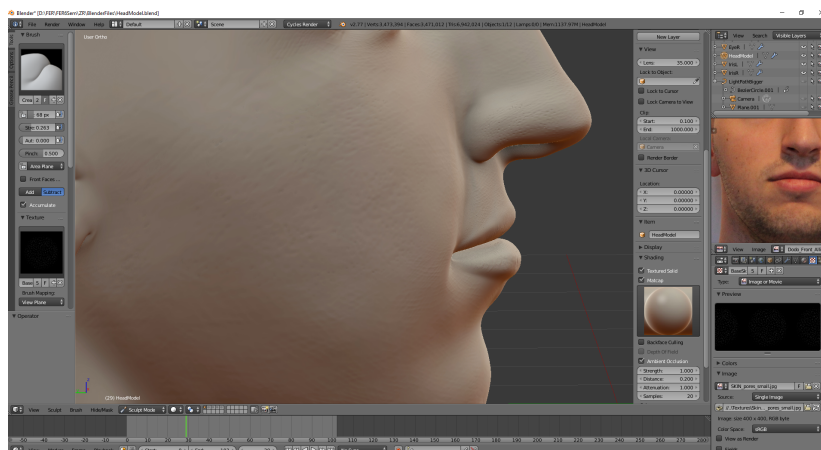
Slika 3.8: Spajanje modela uha i glave

3.4. Dodavanje detalja

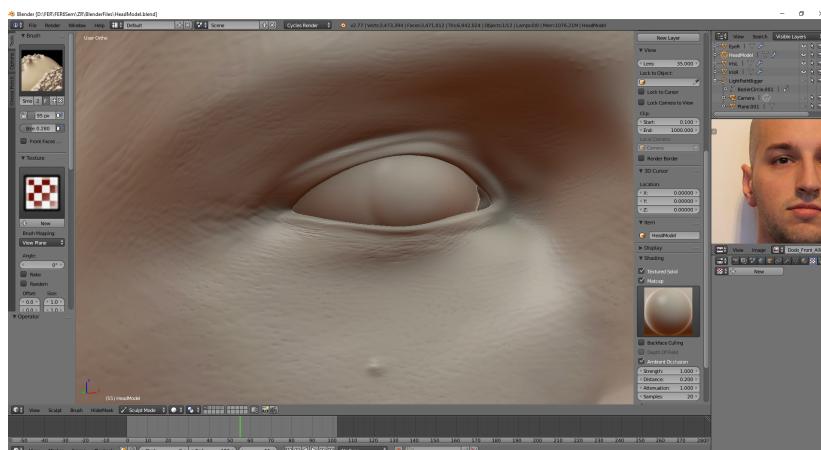
Postizanje realističnog izgleda modela glave i lica iziskuje stvaranje mnogo detalja, nabora, površinskih neravnina i sitnih nepravilnosti na modelu. Potrebne detalje moguće je ostvariti povećavanjem broja poligona uzastopnim dijeljenjem, te zatim ručnim dodavanjem detalja unutar kiparskog odjeljka (engl. *sculpt mode*) u Blenderu. Broj, detaljnost i kompleksnost detalja ovisi o kasnijoj upotrebi i prikazu modela. Slika 3.9 prikazuje završni izgled izrađenog 3D modela glave, dok slika 3.10 prikazuje detalje, koji predstavljaju sitne nabore kože, izrađene unutar kiparskog odjeljka u Blenderu.



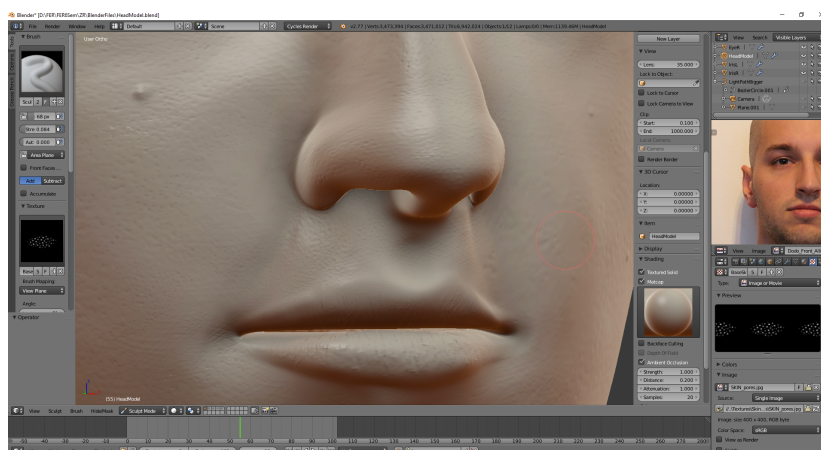
Slika 3.9: Završni izgled 3D modela glave



(a)



(b)



(c)

Slika 3.10: Detalji pora kože na obrazu 3.10a, nabori kože na kapku oka 3.10b i detalji građe usnica 3.10c

4. Modeliranje i teksturiranje oka

Izrada 3D modela ljudskog oka nije izravno vezana uz ovaj rad, ali je prijeko neophodna za realističan prikaz ljudskog lica. Usredotočimo li se samo na površinski prikaz ljudskog oka, ono se sastoji od šarenice, koja se nalazi unutar leće, i bjeloočnice koja obavlja cjelokupnu površinu oka. Kako se ne bi previše skretalo s teme rada, bit će prikazani samo završni izgled 3D modela oka napravljenog za potrebe ovog rada, te prikazi postavki sjenčara korištenog za ostvarivanje željenog izgleda bjeloočnice i šarenice.

4.1. Sjenčari bjeloočnice i šarenice

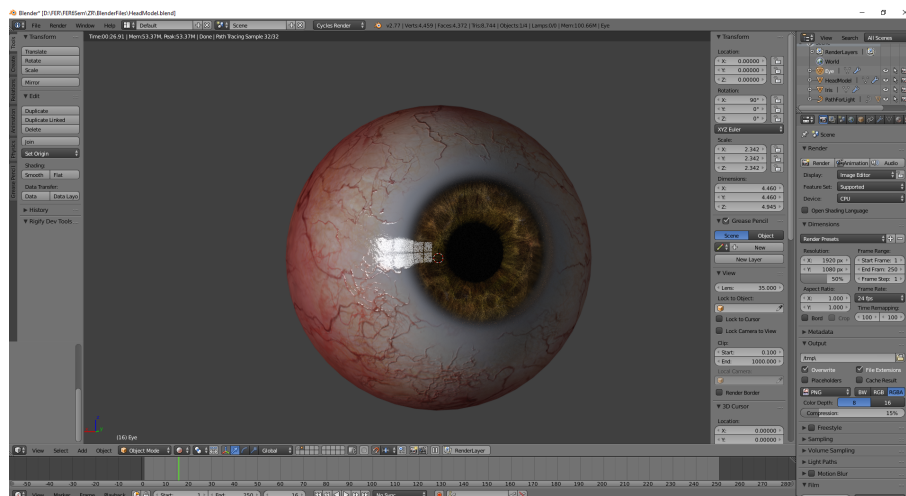
Stanemo li ispred zrcala, te uperimo neki izvor svjetla, tako da zrake svjetlosti direktno i pod veoma malim kutom dolaze na površinu oka, primijetit će se veoma snažni zrcalni odsjaji i gotovo staklasta građa bjeloočnice oka. Također, može se primijetiti kako šarenica oka nije na samoj površini, već se nalazi ispod veoma prozirnog, refraktivnog materijala leće, koji lomi i propušta veliku količinu zraka svjetlosti, te stvara prividnu vidljivost šarenice na površini oka. Kako bi simulirali realističan prikaz oka, zasebno su modelirani bjeloočnica oka, koja predstavlja oblik oka, te leća koja sadržava šarenicu. Također, korištena su dva sjenčara, jedan za realistično simuliranje izgleda bjeloočnice, te drugi za prikaz šarenice oka.

Sjenčar šarenice oka sastoji se od difuzne komponente odsjaja boje predstavljene tro-kanalnom rgb teksturom šarenice, te od crno-bijele teksture šarenice, koja predstavlja nabore i dodaje dodatan osjećaj trodimenzionalnosti šarenice simulirajući malene neravnine i udubine. Zbog činjenice kako gledajući direktno u šarenicu oka ne možemo vidjeti unutrašnjost oka, te zbog jednostavnosti prikaza, refraktivne zrake potpuno su zanemarene.

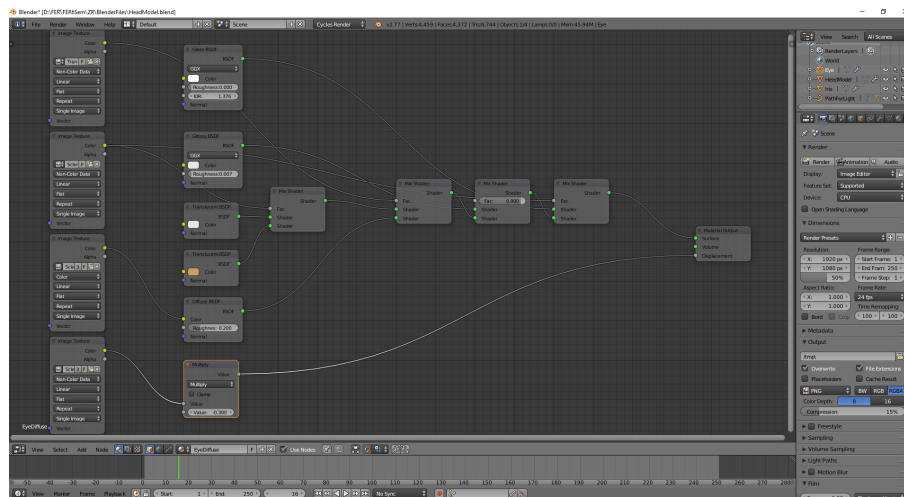
Sjenčar bjeloočnice oka nešto je kompleksnije građe od sjenčara šarenice zbog potrebnog prikaza difuzne i zrcalne komponente, te staklastog, veoma reflektivnog odsjaja bjeloočnice, uz prikaz prozirnog i refraktivnog materijala leće. Tro-kanalna

rgb tekstura, koja predstavlja izgled bjeloočnice i žilica oka, koristi se pri računanju difuzne komponente osvjetljenja bjeloočnice, uz predstavljanje nabora i dodatnih detalja dvo-kanalnom crno-bijelom teksturom, te se njezin utjecaj kombinira sa zrcalnom komponentom i staklastim odsjajem bjeloočnice. Refraktivnost i prozirnost leće simuliraju se sjenčarom prozirnosti (engl. *translucent shader*) koji izražava utjecaj refraktivnih zraka svjetlosti, te omogućava prodornost zraka svjetlosti do šarenice oka. Dodatna crno-bijela tekstura koristi se za označavanje koji dijelovi oka će reagirati više na refraktivni i prozirni utjecaj leće, a koji dijelovi će više reagirati na difuznu i zrcalnu komponentu sjenčara bjeloočnice. Neki od prethodno navedenih Blenderovih sjenčara bit će detaljnije objašnjeni u nastavku rada, dok je ostale moguće istražiti na stranicama programskog alata Blender [2]. Također, pojmovi difuznog i zrcalnog odbijanja zraka svjetlosti, te pojmovi reflektivnih i refraktivnih zraka objašnjeni su kasnije unutar poglavlja 7.

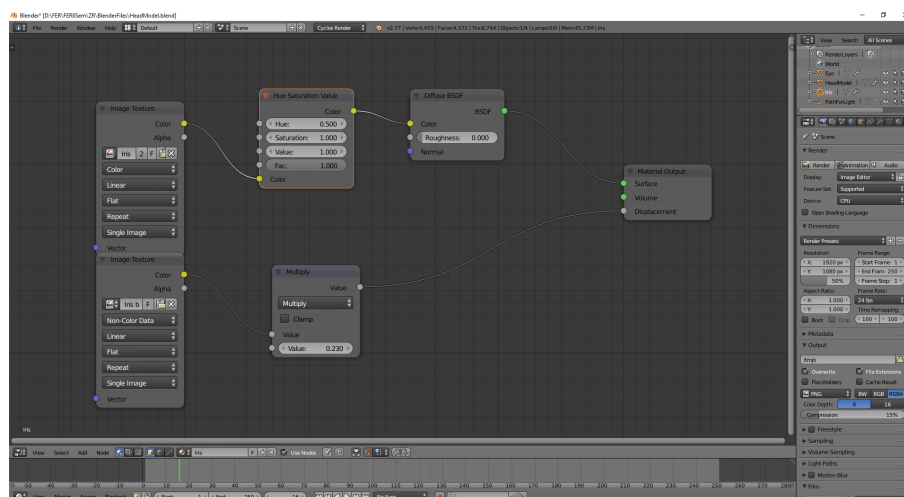
Slika 4.1 prikazuje završni izgled 3D modela oka iscrtanog unutar programskog alata Blender, slika 4.2 prikazuje postavke sjenčara korištenog pri iscrtavanju bjeloočnice i leće, dok slika 4.3 prikazuje postavke sjenčara korištenog pri iscrtavanju šarenice oka.



Slika 4.1: Završni izgled 3D modela oka



Slika 4.2: Postavke sjenčara bjeloočnice i leće



Slika 4.3: Postavke sjenčara šarenice

5. Ljudska koža

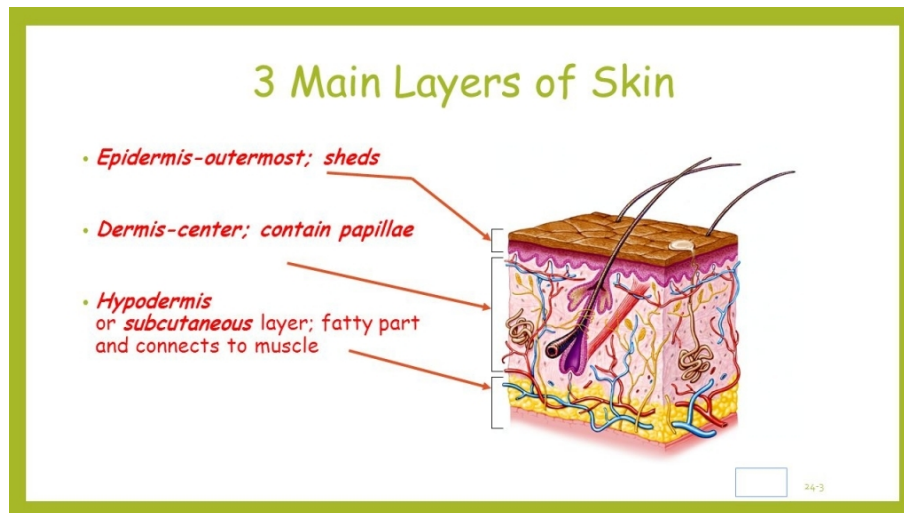
Nakon uspješno izrađenog 3D modela ljudskog lica, nakon modeliranja, izrade tekstura i sjenčanja oka, sve što nedostaje realističnom prikazu ljudskog lica, zanemarimo li prikaz kose, obrva i trepavica, jest realistična koža. Kako bi simulirali kvalitetan prikaz kože na računalu, zbog njezine veoma kompleksne i slojevite građe, potrebno je proučiti od kojih se točno slojeva ona sastoji, te kako određeni slojevi kože reagiraju na utjecaj svjetla.

5.1. Građa kože

Gledano sa medicinske strane, koža se sastoji od sedam slojeva ektodermalnog tkiva (engl. *ectodermal tissue*) koji štite ligamente, kosti, unutarnje organe i mišiće. No, za potrebe realističnog površinskog prikaza kože, možemo reducirati njezinu građu na samo 3 sloja: epidermu (engl. *epidermis*), dermu (engl. *dermis*) i hipodermu (engl. *hypodermis*). Svaki od prethodno navedenih slojeva doprinosit će krajnjem prikazu kože refleksijom, refrakcijom i apsorpcijom zraka svjetlosti. Slika 5.1 prikazuje reduciranu građu kože.

Epiderma jest voodootporni, zaštitni vanjski sloj kože koji štiti tijelo od infektivnih tvari vanjskog svijeta. Građe ju stanice keratinocita (engl. *keratinocytes*) i melanocita (engl. *melanocytes*), te ne sadrži krvne žile. Centralni sloj ljudske kože je derma, koja se sastoji od epitelnog tkiva (engl. *epithelial tissue*) i glavna joj je svrha ublažavanje vanjskih sila i udaraca. Unutar derme nalaze se znojne žlijezde, korijeni dlaka i krvne žile. Najdublji sloj kože jest hipoderma, koji tehnički ne spada u slojeve same kože, već sloj ispod kože, čija je zadaća povezivanje kože s mišićima i kostima. Najveći udio hipoderme čine masnoće koje pružaju izolacijski utjecaj tijelu.

Možda se na prvi pogled čini čudno obrađivati sastav i dijelove kože, no građa i svojstva svakog sloja veoma su bitni kako bismo u potpunosti razumjeli zašto koža izgleda tako kako izgleda u stvarnosti, te koristeći stečena znanja o njezinom sastavu, naposljetku, i što realističnije ju prikazali na računalu.

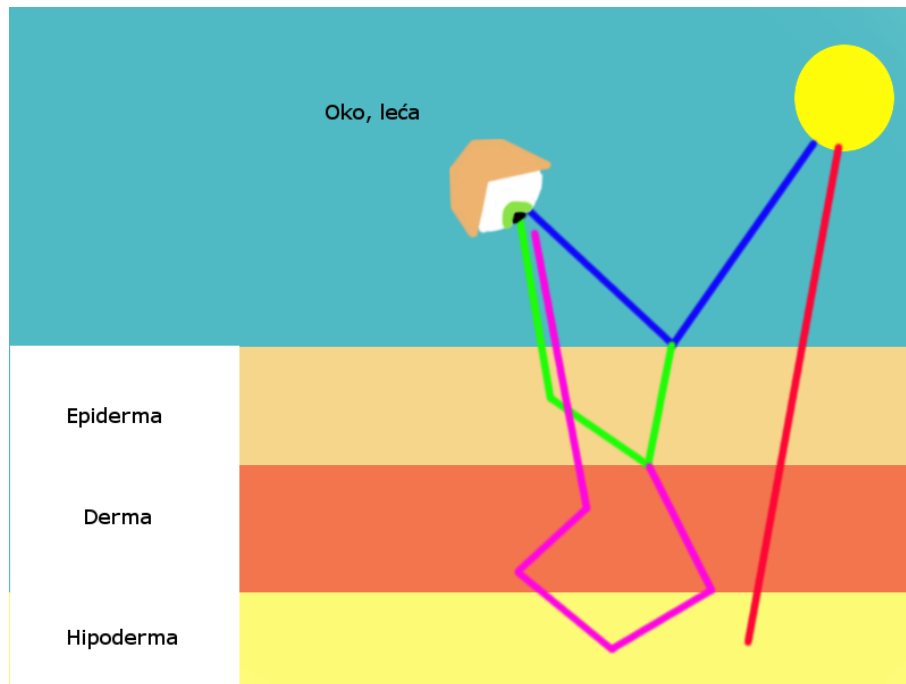


Slika 5.1: Reducirani prikaz slojeva kože

5.2. Utjecaj svjetlosti na površinu kože

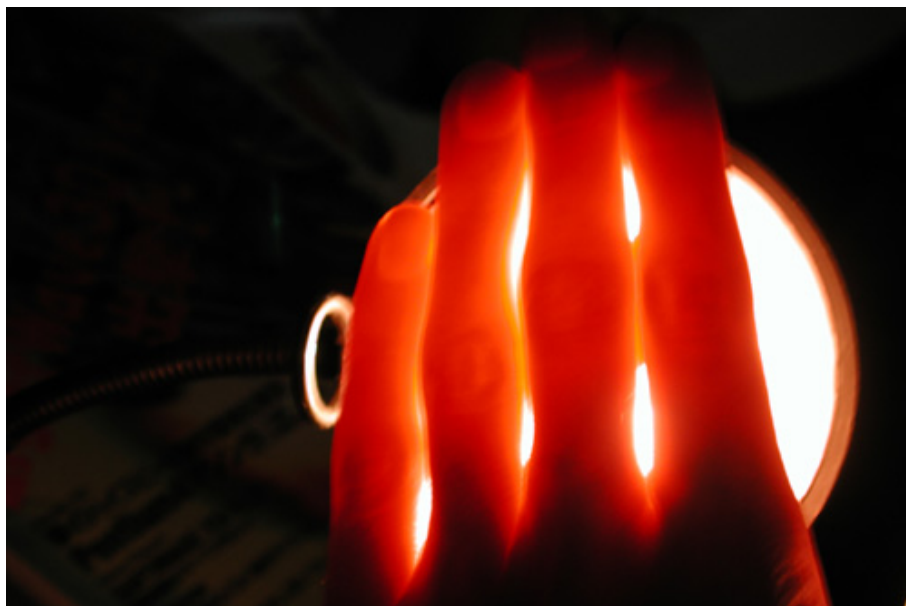
Zamislamo da se unutar neke sobe, bez prozora i vrata, te uz zidove koji u potpunosti apsorbiraju svjetlost, nalazi izvor svjetla koji obasjava ljudsku kožu. Promotrimo li određenu zraku svjetlosti, koja iz izvora svjetlosti dolazi prema početnom sloju kože, epidermi, vidjet ćemo da se zraka odbija od kože, odnosno zraka svjetlosti se reflektira (engl. *reflect*), no, također se i lomi i prolazi prema dubljim slojevima kože, odnosno refraktira (engl. *refract*). Na putu prema dubljim slojevima kože, zbog višeslojne građe epiderme, dio intenziteta zrake svjetlosti se gubi, odnosno apsorbira (engl. *absorb*), tako da svjetlost nešto manjeg intenziteta dolazi na spoj epiderme i derme. Na tom spoju, svjetlost se ponovno reflektira i refraktira. Tako dobivamo nove dvije zrake, reflektiranu koja ponovno putuje kroz epidermu kako bi izašla iz kože, te refraktiranu koja putuje prema hipodermi. Isto tako, zbog složene višeslojne i guste građe derme, dio intenziteta zrake koja se refraktirala na spoju epiderme i derme se apsorbirao, te sada refraktirana zraka nešto slabijeg intenziteta dolazi na spoj derme i hipoderme, gdje se postupak ponavlja. Također zbog višeslojne građe svakog od glavnih dijelova kože, zraka se može reflektirati i refraktirati unutar svakog sloja. Tako dobivamo zrake koje dolaze do promatrača bez da su uopće penetrirale početni sloj kože, ili zrake koje su većinu vremena provele unutar sloja epiderme, derme, ili hipoderme. Također, neke zrake uopće ne izađu iz kože, već se u potpunosti apsorbiraju. Prethodno opisani postupak refleksije, refrakcije i apsorpcije svjetlosti naziva se podpovršinsko raspršivanje svjetlosti (engl. *subsurface scattering*). Slika 5.2 prikazuje neke od mogućih puteva zrake svijetlosti od izvora svjetlosti do ljudskog oka, prolazeći kroz slojeve kože, i

tako dajući promatraču prikaz kože.



Slika 5.2: Prikaz mogućih puteva zraka svjetlosti kroz kožu

Tijekom putovanja zrake kroz slojeve kože, zraka upija rgb vrijednosti tvari koje čine svaki sloj. Tako će zraka, koja je putovala vremenski duže unutar sloja derme, biti crvenkastije boje, zbog utjecaja krvnih žila koje sačinjavaju dermu, od zrake koja je putovala vremenski duže unutar sloja hipoderme, koja će biti žućkaste boje zbog sloja masnog tkiva koji sačinjava hipodermu. Također, moguća je situacija kada je izvor svjetlosti smješten s druge strane tijela, te zrake svjetlosti u potpunosti prolaze kroz sve slojeve kože na putu do promatrača. Tada su na koži vidljivi efekti pozadinskog raspršenja svjetlosti (engl. *backscattering*). Slika 5.3 prikazuje efekte pozadinskog i podpovršinskog raspršenja svjetlosti.



Slika 5.3: Prikaz pozadinskog raspršenja svjetlosti

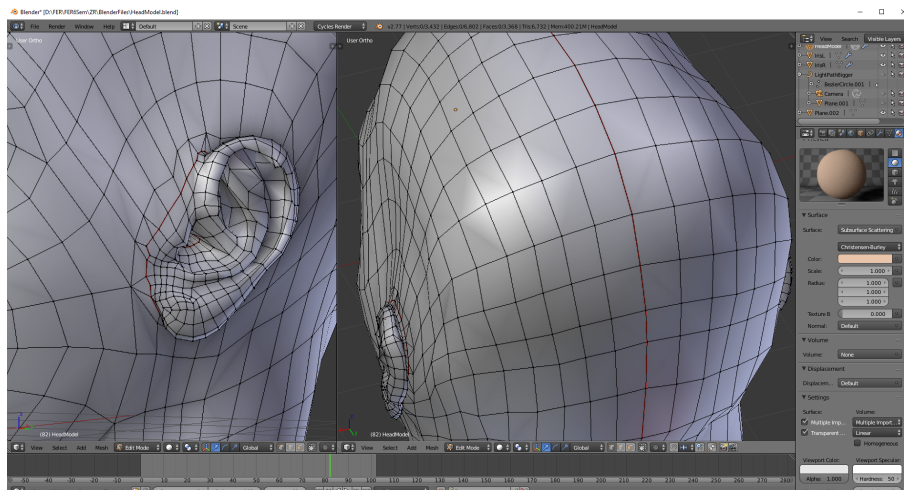
6. Izrada tekstura

Prije izrade sjenčara koji će obuhvatiti sve aspekte utjecaja svijetla i ljudske kože, potrebno je izraditi texture koje ćemo koristiti kako bi model poprimio dodatnu komponentu realističnosti. Tijekom ovog poglavlja bit će ukratko opisani postupci izgradnje tekstura modela koje će biti korištene pri izradi sjenčara kože unutar poglavlja 7. Za izradu tekstura unutar ovog rada korišten je Blender-ov unutarnji alat za izradu tekstura, te grafički alat GIMP koji je korišten pri ispravljanju nepravilnosti na teksturama i za dodavanje dodatnih detalja.

6.1. Priprema za izradu tekstura

Ukoliko želimo izraditi teksturu za naš model, prvo ćemo morati preslikati naš trodimenzionalni model na dvodimenzionalnu površinu, odnosno morat ćemo svakom vrhu našeg modela pridijeliti u i v koordinatu, koje su raspona između 0 i 1, te predstavljaju dio texture iz koje će određeni vrh crpiti informacije. Navedeni postupak unutar Blendera naziva se raspoređivanje UV koordinata (engl. *UV layout*). Da bismo preslikali naš trodimenzionalni model na dvodimenzionalnu površinu, Blenderu moramo dati do znanja gdje smije napraviti rez unutar našeg modela, kako bi mogao prikazati poligone modela na dvodimenzionalnoj ravnini. To ćemo napraviti označavanjem bridova poligona nad kojim želimo napraviti rez, te odabirom naredbe označi šav (engl. *mark seam*) reći Blenderu da na označenom bridu napravi rez kojim će odvojiti poligone modela, te ih prikazati odvojene na dvodimenzionalnoj površini, dok će u trodimenzionalnom prikazu i dalje biti spojeni. Pri određivanju bridova koji će predstavljati šavove treba biti oprezan jer će se na tim bridovima pojavljivati nepravilnosti texture, ukoliko dijelovi texture na kojima se nalaze poligoni s obje strane brida nisu jednaki. Uobičajeno šavovi na modelu glave su bridovi oko ušiju, te bridovi koji prolaze zatiljkom glave i rubom čela te čine tkzv. T zonu. Slika 6.1 prikazuje označene bridove crvenom bojom koji predstavljaju šavove na modelu glave.

Nakon odabira bridova poligona koji će predstavljati šavove, potrebno je stvoriti

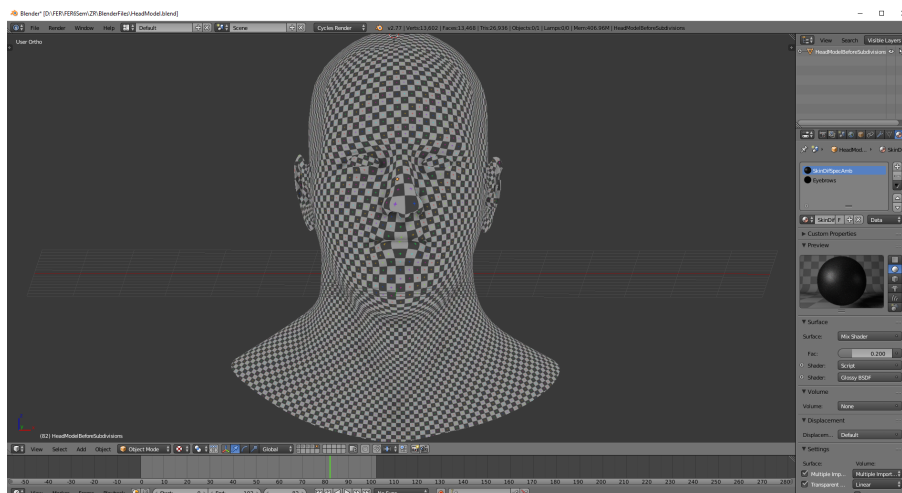


Slika 6.1: Prikaz označenih bridova koji predstavljaju šavove za raspoređivanje uv koordinata teksture

novu sliku odabranih dimenzija koja će predstavljati teksturu. Unutar ovog rada, zbog želje za što realističnijim prikazom detalja kože, odabrana je slika veoma visoke rezolucije 4096x4096 piksela. Zatim je potrebno označiti sve vrhove modela i odabrati naredbu odmotaj (engl. *unwrap*) koja pokreće proces razmotavanja površine modela na dvodimenzionalnu ravninu. Nakon uspješnog odmotavanja površine modela potrebno je razmještati vrhove unutar prikaza teksture kako bi se smanjilo razvlačenje teksture, koje je nastalo kao posljedica odmotavanja trodimenzionalnog modela na dvodimenzionalnu površinu, na pojedinim dijelovima modela. Također, radi lakše predodžbe gdje je nastalo razvlačenje teksture, Blender nudi opciju prikaza mreže uv koordinata označenu malenim kvadratima jednakih veličina, čijom promjenom veličine na trodimenzionalnom prikazu modela možemo primijetiti mjesto razvlačenja. Slika 6.2 prikazuje trodimenzionalni model obavijen mrežom kvadrata kako bi se prikazala mjesta razvlačenja tekstura. U ovom slučaju vidljiva su blaga razvlačenja teksture na područjima nosa i ušiju, no unutar tolerantnih vrijednosti.

6.2. Izrada teksture boje

Tekstura čiji utjecaj je najzapaženiji pri pogledu na model, zasigurno je tekstura boje, koja prikazuje osnovnu površinsku boju kože, uz brojne detalje neravnina tkiva, žilica i površinskih karakteristika kože. Zbog značajne uloge za završni izgled modela preporučljivo je posvetiti najveću količinu vremena na njenu izradu. Teksturu boje moguće je izraditi ručno koristeći paletu boja i različite kistove koje Blender nudi,

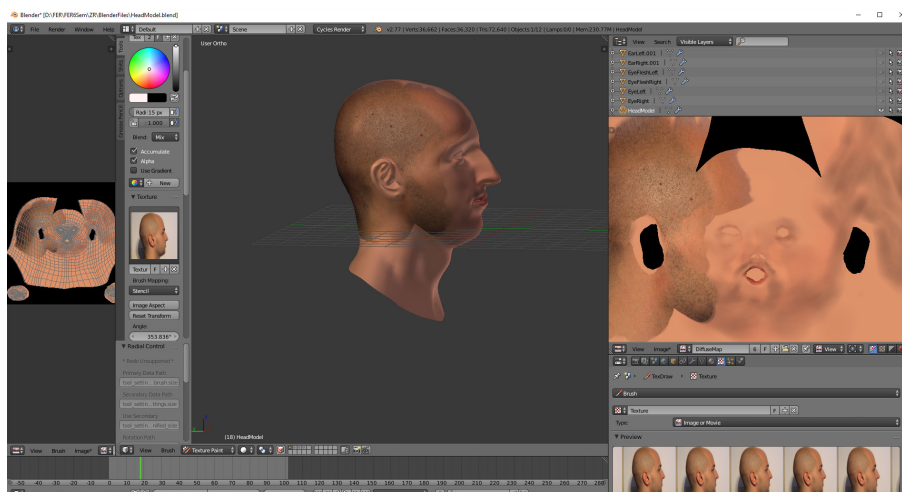


Slika 6.2: Prikaz modela obavljenog teksturom za kontrolu razvlačenja

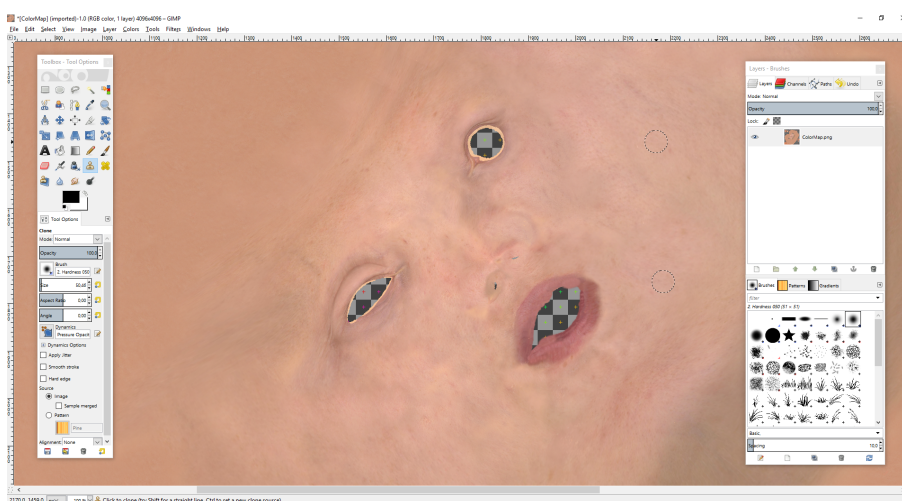
projekcijskim preslikavanjem texture s referentnih fotografija na model ili ručnim oslikavanjem i kombiniranjem različitih tekstura radi dobivanja željenog izgleda. Unutar ovog rada korištene su sve prethodno navedene metode kako bi se dobio željeni izgled texture boje.

Prva metoda korištena pri stvaranju texture boje unutar ovog rada jest metoda projekcijskog preslikavanja texture s referentne fotografije ili slike na model. Koristeći razne kistove koje Blender nudi, te odabirom dijela referentne fotografije koji se želi preslikati na model, potezima kistom se oslikava željeni dio fotografije na površinu modela. Nažalost, zbog snažno vidljivih zrcalnih odsjaja na referentnim fotografijama, te nejednakog osvjetljenja referentnih fotografija uzetih iz različitih pozicija, bio sam prisiljen koristiti kombinaciju dijelova referentnih fotografija koje sam pronašao na internetu kako bih stvorio bazu texture boje. Slika 6.3 prikazuje tehniku projekcijskog preslikavanja referentnih fotografija na model, no ponavljam da se tekstura prikazana na slici nije koristila pri završnom iscrtavanju modela.

Nakon postavljanja osnove texture boje projekcijskim preslikavanjem, korištene su metode ručnog oslikavanja modela i kombiniranje različitih tekstura kože kako bi se ostvarili neprimjetni prijelazi, dodatni detalji, te ispravile nepravilnosti napravljene projekcijskim preslikavanjem. Zatim, tekstura jest izvezena (engl. *export*) iz Blendera u alat za uređivanje fotografija GIMP, radi dodatnog popravljavanja nepravilnosti i dodavanja detalja, kojih nije moguće ostvariti unutar Blendera. Ispravljanje nepravilnosti zahtijeva podosta vremena i strpljenja, no jedno je od ključnih koraka pri izradi kvalitetnih tekstura. Slika 6.4 prikazuje teksturu unutar alata za uređivanje slika GIMP, te vidljive nepravilnosti u području očiju koje su putem istog alata i ispravljene.



Slika 6.3: Prikaz metode projekcijskog preslikavanja referentnih fotografija na model

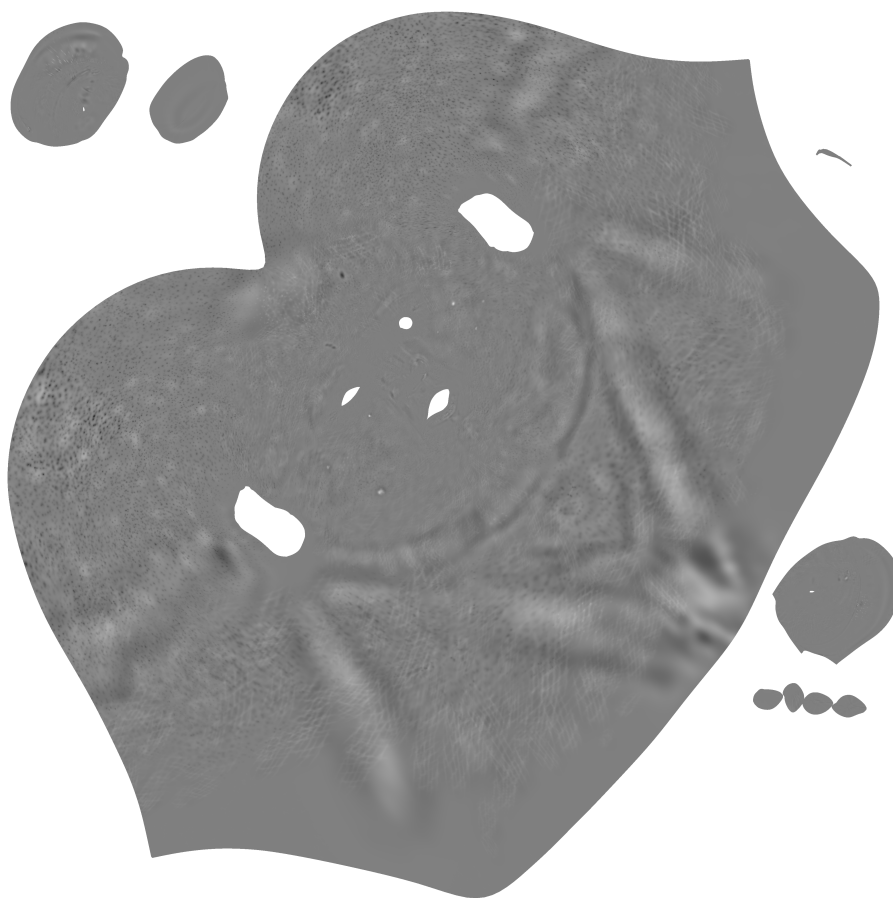


Slika 6.4: Prikaz nepravilnosti na teksturi boje

6.3. Izrada texture neravnina

Kako bismo mogli kontrolirati izraženost i vidljivost površinskih detalja kože unutar sjenčara pri iscrtavanju modela, potrebno je izraditi teksturu neravnina (engl. *displacement map*). Tekstura neravnina je crno bijela tekstura koja crnom bojom označava udubljenja na modelu, bijelom bojom označava izbočenja, te gradijentom boja između crne i bijele površinske neravnine modela. Teksturu neravnina možemo automatski izgraditi iz modela kojem smo dodali detalje, opisane unutar poglavlja 3.4, koristeći Blenderovu opciju izrade texture neravnina iz modela, te izvozom iste. Nakon što smo teksturu izvezli iz programskog alata Blender, možemo ju urediti unutar alata za uređivanje slike GIMP, te naglasiti neravnine koje želimo, a utjecaj drugih smanjiti. Također, tekstura neravnina može se kontrolirati unutar sjenčara tako da joj vrijednosti

množimo određenim faktorom, te tako smanjujemo ili povećavamo vidljiv utjecaj površinskih neravnina. Slika 6.5 prikazuje teksturu neravnina korištenu unutar ovog rada.

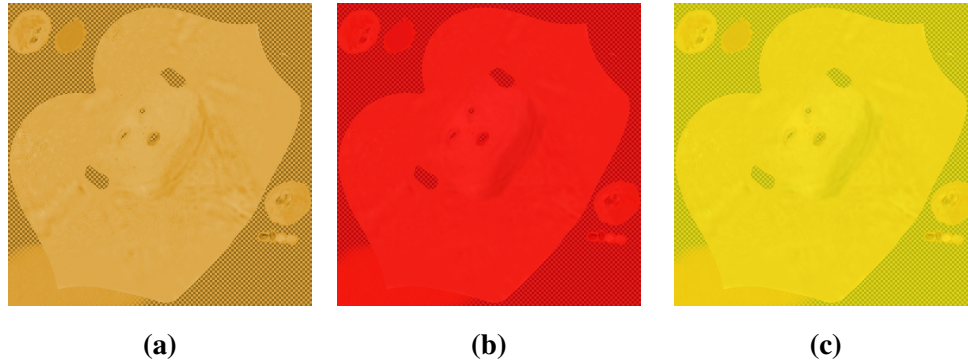


Slika 6.5: Prikaz teksture neravnina

6.4. Izrada tekstura podpovršinskog raspršenja

Teksture podpovršinskog raspršenja svjetlosti zapravo su varijacije teksture boje napravljene unutar poglavlja 6.2. Svaka od triju tekstura podpovršinskog raspršenja predstavlja karakterističnu boju jednog sloja kože, ovisno o građi tog sloja, kao što je opisano unutar poglavlja 5.2. Tako će tekstura podpovršinskog raspršenja svjetlosti epiderme imati tamnožuto-smeđu boju izraženiju zbog pigmenata kože, dok će tekstura podpovršinskog raspršenja svjetlosti derme imati naglašeniji utjecaj crvene boje zbog brojnih kapilara i žilica koje se nalaze u tom sloju, te tekstura podpovršinskog raspršenja svjetlosti hipoderme imati izražene svijetlo-žute boje zbog masnog tkiva koje sačinjava sloj hipoderme. Ovdje je posebno vidljiva korisnost alata za uređivanje slika GIMP, unutar kojeg je moguće pojačavati ili smanjivati određene utjecaje boja

na fotografiji, te tako veoma jednostavnim postupkom zamijeniti sate rada potrebnih da se unutar Blendera naprave dodatne tri teksture boje za svaki sloj kože. Slika 6.6 prikazuje teksture podpovršinskog raspršenja svakog sloja.

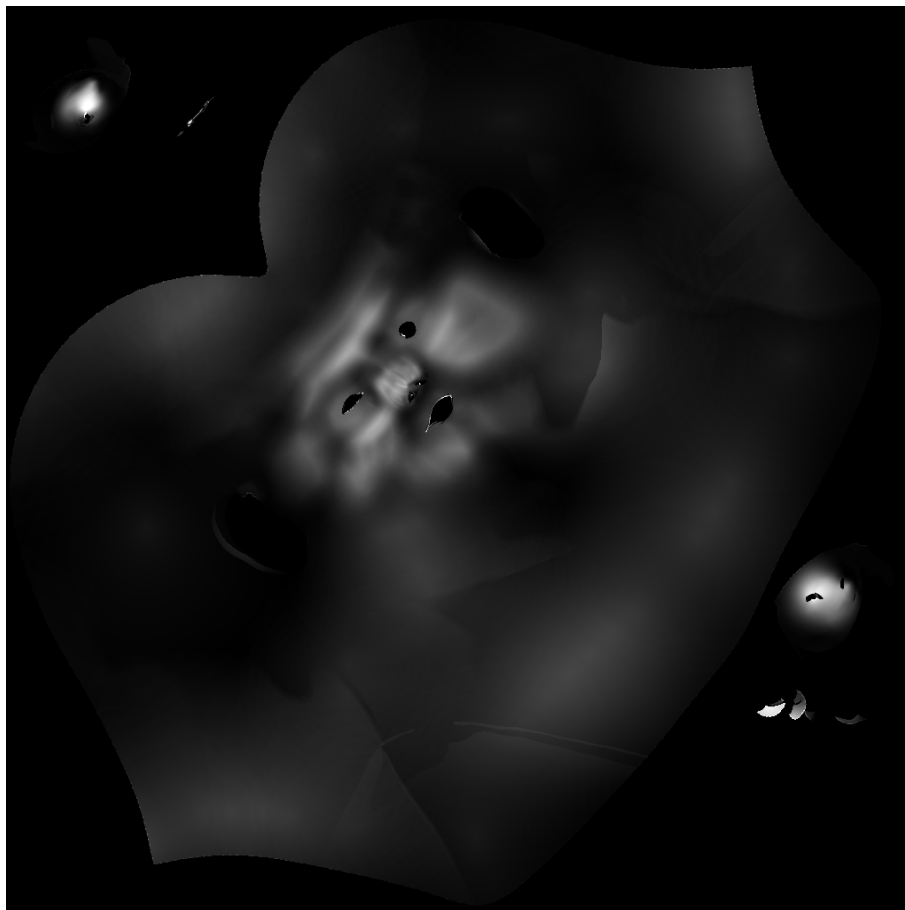


Slika 6.6: Prikaz tekstura podpovršinskog raspršenja svjetlosti epiderme 6.6a, derme 6.6b, i hipoderme 6.6c

6.5. Izrada teksture utjecaja zrcalnih i difuznih odsjaja

Posljednja tekstura koja će nam biti potrebna za realistično prikazivanje kože unutar ovog rada jest crno bijela tekstura utjecaja zrcalne i difuzne komponente odbijanja svjetlosti koja predstavlja odnos difuzne i zrcalne komponente sjenčara na površini modela. Bijela boja će predstavljati potpun utjecaj zrcalne komponente, dok će u potpunosti crna boja teksture prikazivati potpun utjecaj difuzne komponente. Svi ostali spektri sive boje unutar granica bijele i crne boje predstavljat će miješani utjecaj obje komponente. Postupak izgradnje prethodno spomenute teksture poprilično je jednostavan. Unutar Blendera potrebno je stvoriti novu teksturu rezolucije 1024x1024 piksela, koja se automatski postavlja na apsolutno crnu boju, te na njoj pokretima kista označavati područja na modelu koja će imati izraženiju zrcalnu komponentu sjenčara od difuzne komponente. Pri izradi teksture valja uzeti u obzir kako su nos i gornji dijelovi obraza, uz čelo, područja na licu na kojima se najviše primjećuje zrcalna komponenta osvjetljenja, pa sukladno tom činjenicom treba i urediti teksturu. Također, teksturu treba oslikavati za mogućnosti pozicije svijetla bilo gdje unutar scene, a ne se fokusirati samo na određenu poziciju svijetla unutar scene, za koji bismo dobili bolje rezultate, ali bismo ograničili prikaz realističnosti samo na tu poziciju svijetla, što nikako nije cilj ovog rada u kojem se teži što realističnijem generalnom prikazu kože. Ne treba se brinuti što je rezolucija teksture 1024x1024 piksela, dok su sve ostale teksture rezolucije 4096x4096 piksela, jer nakon što je postupak uređivanja teksture unutar Blendera

završen, teksturu treba izvesti iz Blendera, te otvoriti unutar alata za uređivanje slika GIMP, te ju skalirati na željenu veličinu. Slika 6.7 prikazuje završni izgled teksture utjecaja zrcalno-difuzne komponente.



Slika 6.7: Prikaz teksture utjecaja zrcalnih i difuznih odsjaja

7. Sjenčar kože

Posljednji korak na putu prema realističnom prikazu kože jest izgradnja sjenčara koji će provesti u djelo činjenice koje smo naučili unutar poglavlja 5.2. Pošto ljudska koža nije jednostavne građe, sjenčar koji bi je realistično prikazao, također mora biti nešto kompleksniji, te će se sastojati od više jednostavnijih sjenčara, koji će posloženi u jednu strukturno složenu cjelinu davati realističan i uvjerljiv završni izgled kože. Unutar ovog poglavlja bit će opisan postupak kompletne izgradnje sjenčara korak po korak, krenuvši od najosnovnijeg sjenčara difuznog efekta odbijanja svjetlosti, sve do završnog kompleksnog sjenčara kože.

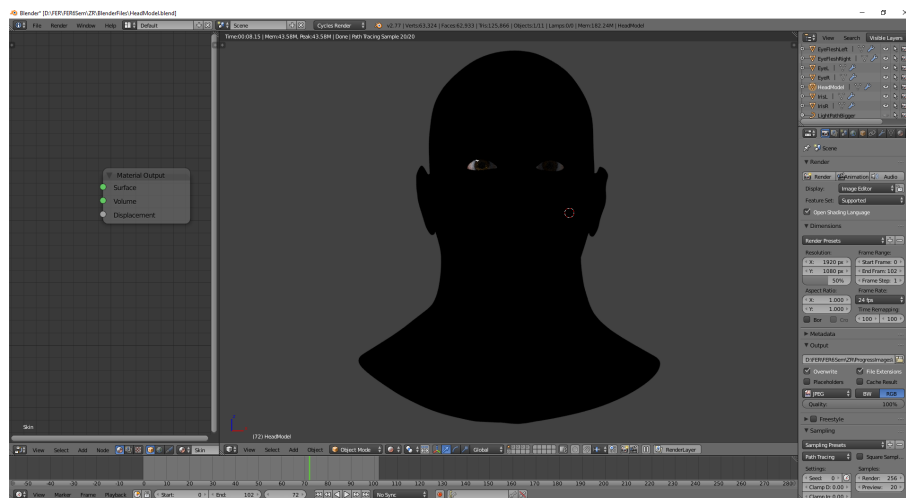
7.1. Pisanje sjenčara unutar Blendera

Jezik za pisanje sjenčara unutar Blendera naziva se otvoreni jezik za sjenčanje (engl. *open shading language* – OSL). Kako bismo napisali program za sjenčanje koji je prepoznatljiv Blenderu, moramo datoteku označiti ekstenzijom .osl. Tekstualna datoteka s ekstenzijom .osl može se stvoriti unutar bilo kojeg alata za pisanje teksta, ili unutar samog Blender-a koji nudi vlastiti alat za pisanje tekstualnih datoteka. OSL tekstualna datoteka može sadržavati funkcije identične građe funkcijama programskog jezika C, kao i pretprocesorske direktive, no stvarni programski kod sjenčara započinje ključnom riječi *shader*, nakon koje slijedi ime sjenčara. Ime sjenčara jest proizvoljno, no ograničeni smo na pisanje samo jednog sjenčara unutar jedne .osl datoteke. Nakon imena sjenčara, te između otvorenih i zatvorenih zagrada, navode se ulazne i izlazne varijable sjenčara. Ulazne varijable sjenčara označene su ključnom riječi *input*, dok su izlazne varijable označene ključnom riječi *output*. Svaka varijabla deklarirana je tipom, imenom i standardnom (engl. *default*) vrijednošću. Standardna vrijednost varijable koristi se kada niti jedan ulazni podatak nije zadan. Svaki OSL sjenčar mora imati najmanje jednu varijablu označenu ključnom riječi *output*, inače se njegove funkcije neće moći koristiti. Nakon popisa ulaznih i izlaznih varijabli slijedi tijelo sjenčara unutar kojeg se nalazi osnovna funkcionalnost koju sjenčar mora obavljati. Dodatne pojedinosti i

upute kako pisati sjenčare unutar Blendera mogu se pronaći na Gritz [4].

7.2. Ambijentna komponenta sjenčara

Smjestimo li 3D model glave, koju smo prethodno izmodelirali, unutar virtualne scene, te dodamo li jedan izvor svjetla koji će obasjavati model i pokrenemo iscrtavanje scene, bez da smo modelu pridijelili sjenčar koji bi opisivao njegove karakteristike pri iscrtavanju, dobit ćemo sljedeći rezultat prikazan slikom 7.1.



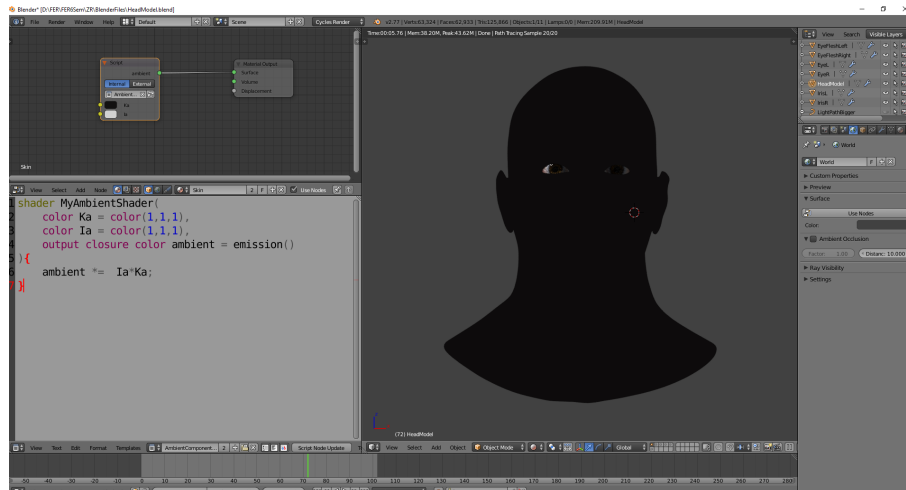
Slika 7.1: Prikaz ambijentne komponente osvjetljenja modela

Primjećujemo da je model veoma tamne crne boje, no u mogućnosti smo ga razlikovati od pozadine scene. Također primjećujemo kako su se oči ispravno iscrtale, no to je posljedica toga što su oči posebni objekt, odvojen od 3D modela glave, te koriste vlastite sjenčare opisane unutar poglavlja 4. Ovim prikazom Blender zapravo automatski simulira ambijentnu komponentu osvjetljenja, odnosno aproksimira globalno osvjetljenje. Ukoliko bismo željeli napraviti vlastiti izračun ambijentne komponente osvjetljenja, sve što je potrebno jest pomnožiti intenzitet ambijentne komponente svijetlosti s koeficijentom intenziteta reflektirane ambijentne svijetlosti materijala. Intenzitet ambijentne komponente svijetlosti te ambijentni koeficijent materijala zapravo su vektori boje koji se sastoje od triju komponenata R, G, B – odnosno crvene, zelene, i plave komponente. Izrada vlastitog sjenčara ambijentne komponente osvjetljenja daje nam veću kontrolu nad ambijentnim koeficijentom materijala i intenzitetom ambijentnog svjetla unutar scene, te će iz tog razloga biti prikazana njegova izrada, dok će pri daljnjoj izradi završnog sjenčara kože biti korištena Blenderova inačica istog.

Otvorimo Blenderov vlastiti alat za pisanje teksta, te stvorimo novu tekstualnu da-

totoku koju ćemo nazvati `MyAmbientShader.osl`, unutar koje ćemo napisati vlastiti sjenčar koji će simulirati ambijentnu komponentu osvjetljenja modela. Na ulazu u sjenčar trebat će nam vektori boje koji će predstavljati intenzitet ambijentne komponente svijetlosti, i ambijentni koeficijent materijala, dok će nam na izlazu sjenčara trebati vektor boje koji će predstavljati ambijentno osvjetljenje. Izlazni vektor boje mora dodatno biti deklariran posebnim tipom `closure`, dijelom koda koji opisuje kako texture i boje materijala reagiraju pod utjecajem svjetla. Radi jednostavnosti iskoristit ćemo već definiran tip unutar Blendera, `emission`, koji će nam davati jednoliku boju cijelim modelom, što nam zapravo i treba. Sve što je potrebno napraviti unutar tijela sjenčara jest pomnožiti dva ulazna vektora boje i proslijediti na izlazni vektor. Sljedeći isječak koda predstavlja završni izgled sjenčara ambijentne komponente osvjetljenja, dok slika 7.2 predstavlja iscrtan model, koristeći prethodno opisani sjenčar.

```
shader MyAmbientShader(
    color Ka = color(1,1,1),
    color Ia = color(1,1,1),
    output closure color ambient = emission()
){
    ambient *= Ia*Ka;
}
```



Slika 7.2: Prikaz iscrtanog modela koristeći vlastiti sjenčar ambijentnog osvjetljenja

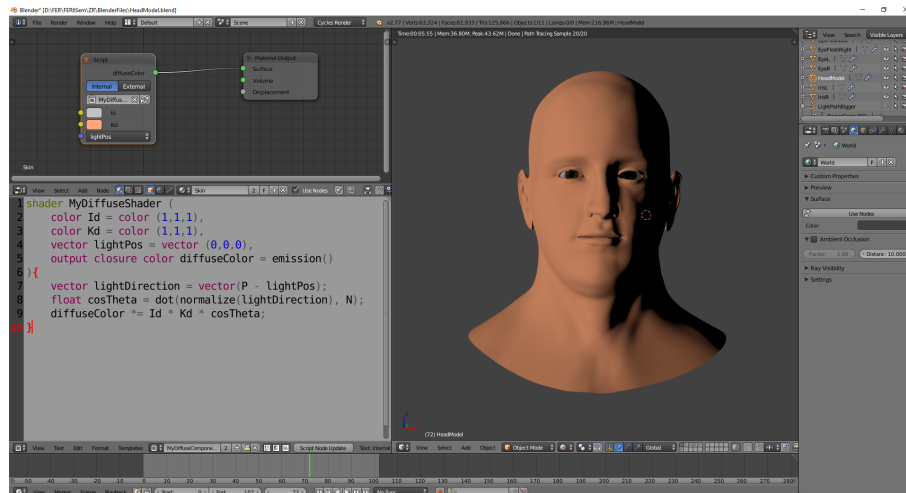
7.3. Difuzna komponenta sjenčara

Sljedeći korak pri stvaranju kvalitetnog sjenčara kože jest dodavanje difuzne komponente osvjetljenja, koja vjerno opisuje Lambert-ov zakon difuznog odbijanja svjetla na predmetu. Difuzno osvjetljenje ovisi o kutu između normaliziranog vektora od točke na predmetu, prema izvoru svjetlosti, i vektora normale u točki predmeta. Što je kut između ta dva vektora manji, to je osvjetljenje u toj točki snažnije. Difuznom komponentom osvjetljenja dobivamo dojam pozicije svijetla unutar scene, njegovog intenziteta, te osnovnu boju materijala od kojeg je sačinjen objekt. Ukoliko bismo željeli napraviti vlastiti izračun difuzne komponente osvjetljenja, bit će nam potreban intenzitet izvora osvjetljenja, koeficijent difuzne refleksije materijala, pozicija izvora svjetlosti, vektor normale na točku površine i pozicija točke na površini objekta. Ukupan izračun bit će umnožak intenziteta točkastog izvora svjetlosti s koeficijentom difuzne refleksije materijala i kosinusom kuta što ga zatvaraju normala na točku površine i vektor od točke površine prema izvoru svjetlosti.

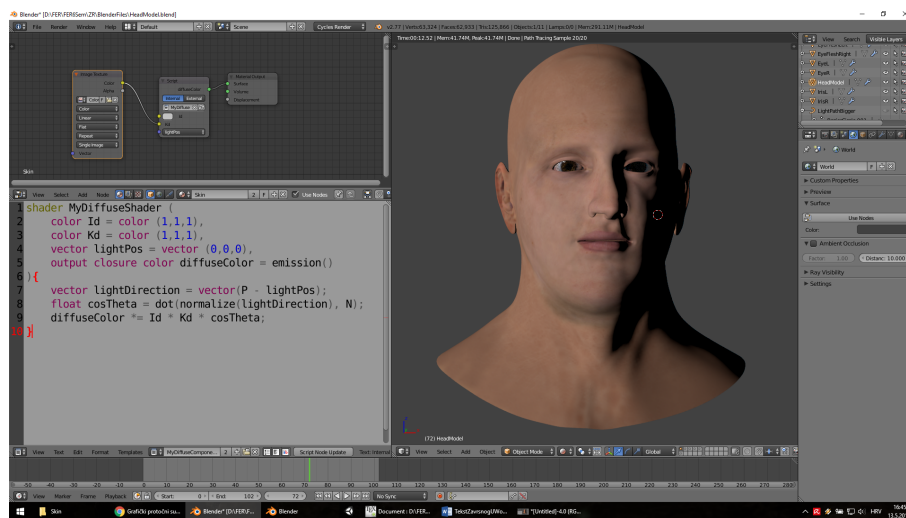
Otvorimo ponovno Blenderov alat za pisanje teksta, te stvorimo tekstualnu datoteku naziva `MyDiffuseShader.osl`, unutar koje ćemo smjestiti sjenčar difuzne komponente osvjetljenja, prema prethodno opisanoj formuli. Na ulazu u sjenčar bit će nam potrebni vektori boje intenziteta svjetlosnog izvora i koeficijenta difuzne refleksije materijala, te pozicija svijetla unutar scene. Izlaz iz sjenčara bit će vektor boje, koji će predstavljati difuzno osvjetljenje. Ponovno ga moramo označiti deklaratorom `closure`. Sljedeći isječak koda prikazuje završni izgled sjenčara difuzne komponente osvjetljenja, a slika 7.3 predstavlja iscrtan model, koristeći sjenčar difuznog osvjetljenja.

```
shader MyDiffuseShader (
    color Id = color (1,1,1),
    color Kd = color (1,1,1),
    vector lightPos = vector (0,0,0),
    output closure color diffuseColor = emission()
){
    vector lightDirection = vector(P - lightPos);
    float cosTheta = dot(normalize(lightDirection), N);
    diffuseColor *= Id * Kd * cosTheta;
}
```

Također, umjesto unosa konstante kao difuznog koeficijenta materijala, možemo unijeti teksturu, koju smo napravili unutar poglavlja 6. Slika 7.4 prikazuje dobiveni rezultat.



Slika 7.3: Prikaz iscrtanog modela koristeći vlastiti sjenčar difuznog osvjetljenja



Slika 7.4: Prikaz iscrtanog modela koristeći vlastiti sjenčar difuznog osvjetljenja i teksturu boje

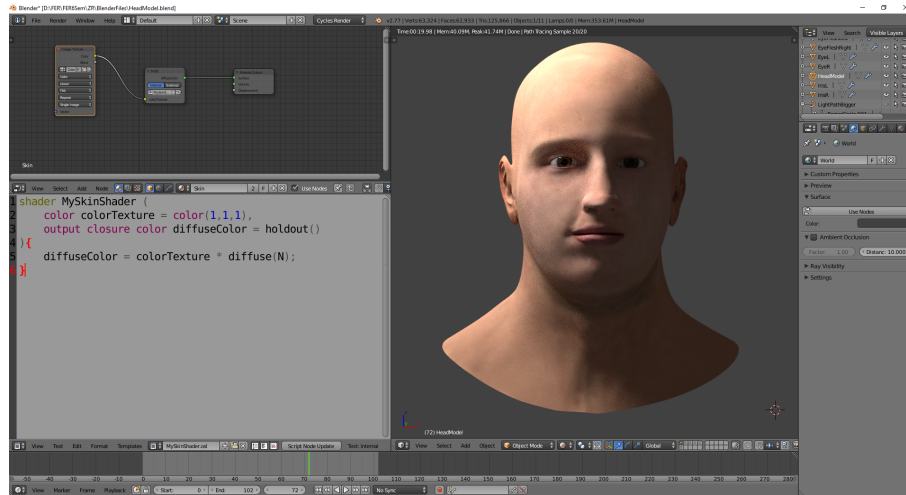
U nastavku rada kao sjenčar difuzne i ambijentne komponente bit će korišten Blenderov difuzni sjenčar (engl. *diffuse shader*), koji kombinira prethodno objašnjene utjecaje difuzne i ambijentne komponente osvjetljenja, jer nam omogućava fleksibilno pomicanje višestrukih izvora svijetla unutar same scene, dok bi iste morali dodavati ručno unutar skripte sjenčara svaki puta kada bismo željeli unutar scene dodati novi izvor svijetla, ili pomaknuti jedan od prethodno dodanih izvora svijetla. Sljedeći kod prikazuje sjenčar ambijentne i difuzne komponente osvjetljenja koristeći Blenderov difuzni sjenčar, a slika 7.5 prikazuje iscrtani model koristeći prethodno spomenuti sjenčar.

```
shader MySkinShader (
    color colorTexture = color(1,1,1),
```

```

    output closure color skinColor = holdout()
){
    skinColor = colorTexture * diffuse(N);
}

```



Slika 7.5: Prikaz iscrtanog modela koristeći sjenčar difuznog i ambijentnog osvjetljenja

7.4. Zrcalna komponenta sjenčara

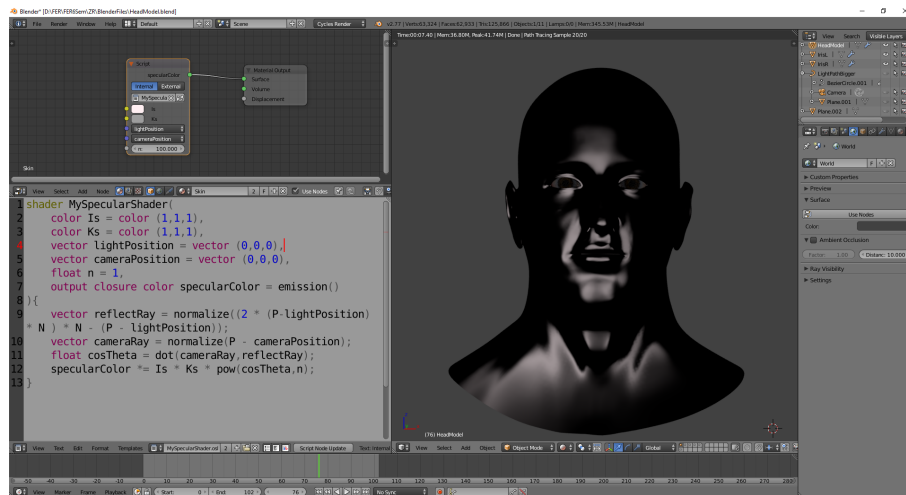
Uspješno smo prikazali difuznu i ambijentnu komponentu osvjetljenja kože, te naš model polako počinje poprimati polu-realističan izgled. No, promatrajući reakciju kože na utjecaj svijetla, jasno je vidljivo da nedostaju snažni, svijetli obrisi koji su posebno vidljivi kada je koža mokra i vlažna. Upravo je zrcalna (engl. *specular*) komponenta ta koja prikazuje prethodno navedene obrise. Zrcalna komponenta osvjetljenja ovisi iz koje pozicije promatramo objekt, te iz koje pozicije upadaju zrake svjetlosti na objekt, također ovisi o intenzitetu svjetlosti i koeficijentu zrcalne refleksije materijala.

Zrcalnu komponentu osvjetljenja ostvarit ćemo umnoškom intenziteta izvora svjetlosti, koeficijenta zrcalnosti materijala objekta i kosinusom kuta reflektirane zrake svjetlosti i vektora iz točke na površini objekta prema promatraču, podignutim na n-tu potenciju, gdje je n konstanta materijala koja određuje prostornu razdiobu zrcalne komponente. Što je n veći to je prostorna razdioba manja, i materijal predmeta ostavlja dojam glatke površine. Reflektirana zraka dobiva se prema sljedećoj formuli, u kojoj L predstavlja vektor od točke na površini prema izvoru svijetla, dok N predstavlja normalu u točki na površini :

$$R = ((2 * L * N) * N - L)$$

Sljedeći isječak koda prikazuje sjenčar koji ostvaruje prikaz zrcalne komponente osvjjetljenja, dok slika 7.6 prikazuje iscrtani model uz sjenčanje sjenčarom za prikaz zrcalne komponente, kada se izvor svijetla nalazi ispred i ispod modela.

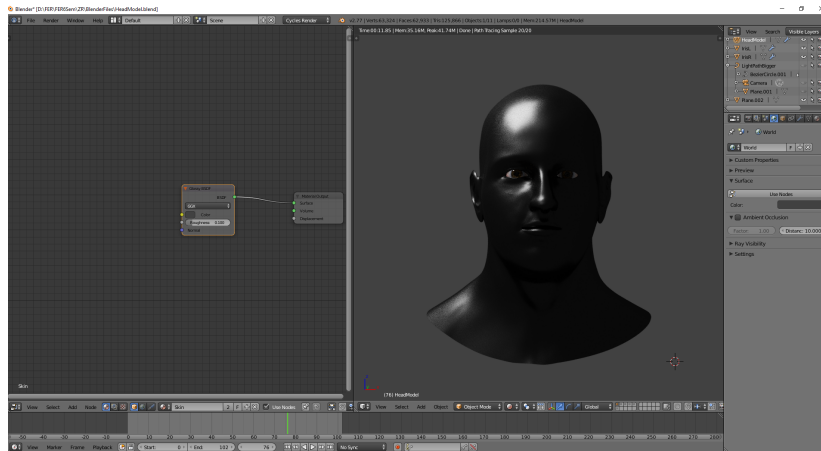
```
shader MySpecularShader(
    color Is = color (1,1,1),
    color Ks = color (1,1,1),
    vector lightPosition = vector (0,0,0),
    vector cameraPosition = vector (0,0,0),
    float n = 1,
    output closure color specularColor = emission()
){
    vector reflectRay = normalize((2*(P-lightPosition)*N)
        *N-(P-lightPosition));
    vector cameraRay = normalize(P - cameraPosition);
    float cosTheta = dot(cameraRay, reflectRay);
    specularColor *= Is * Ks * pow(cosTheta, n);
}
```



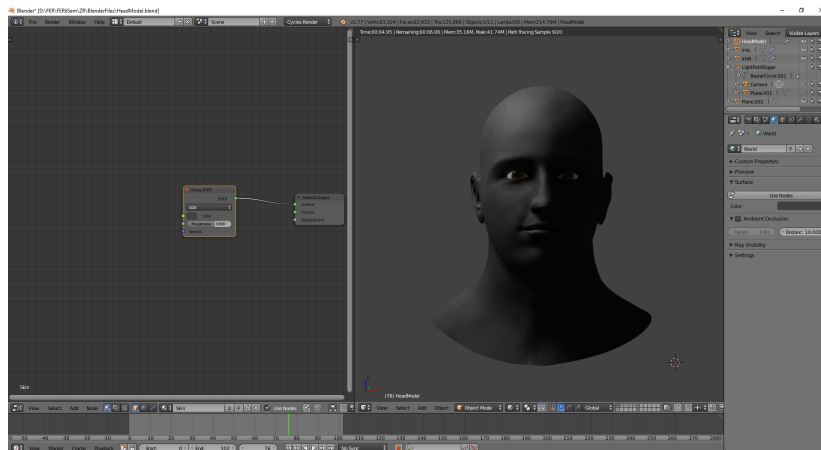
Slika 7.6: Prikaz iscrtanog modela koristeći sjenčar zrcalnog osvjetljenja

Ponovno, radi jednostavnosti uporabe i mijenjanja parametara svijetla unutar scene, koristit će se Blenderov sjenčar za zrcalno osvjetljenje, također Blenderov sjenčar nam dodatno omogućuje upravljanje s hrapavošću (engl. *roughness*) površine objekta, što je hrapavost manja to površina modela više djeluje metalno, dok uz veliku hrapavost površina gotovo da ni nema zrcalnih odsjaja. Ta varijabla zapravo predstavlja konstantu materijala koja određuje prostornu razdiobu zrcalnog odsjaja unutar našeg sjenčara.

Slika 7.7 prikazuje utjecaj parametra hrapavosti površine pri prikazu zrcalne komponente osvjetljenja.



(a)



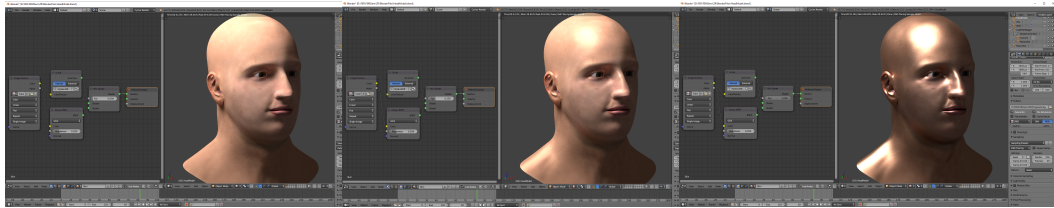
(b)

Slika 7.7: Prikaz male hrapavosti materijala modela 7.7a i nešto veće hrapavosti 7.7b

7.5. Povezivanje zrcalne, difuzne i ambijentne komponente

Nakon što smo uspješno ostvarili zasebne prikaze ambijentne, difuzne i zrcalne komponente osvjetljenja, povežimo ih sve u jedan zajednički sjenčar koji će sadržavati sve 3 komponente unutar jedne funkcionalne cjeline. Da bismo to ostvarili, iskoristit ćemo Blender-ov sjenčar za miješanje utjecaja dvaju sjenčara ovisno o vrijednosti varijable *faculty*, koja se zadaje unutar granica nula i jedan. Spojimo na prvi ulaz sjenčara za miješanje dvaju sjenčara naš difuzni sjenčar, a na drugi ulaz sjenčar za zrcalnu kompo-

mentu. Ukoliko je varijabla *faculty* vrijednosti nula, tada sjenčar na izlaz u potpunosti propušta sjenčar difuzne komponente, dok u slučaju kada je varijabla *faculty* jednaka jedan propušta u potpunosti sjenčar zrcalne komponente. Blender-ov sjenčar za miješanje utjecaja dvaju sjenčara zapravo radi linearnu interpolaciju sjenčara. Slika 7.8 prikazuje različito iscrtan model ovisno o doprinosu prvog ili drugog sjenčara. Također, na slici valja primijetiti kako dijelovi modela koji su u potpunosti u sjeni, nisu crne boje već sadrže dio globalnog osvjetljenja, odnosno primjećujemo utjecaj ambijentne komponente sjenčara koju smo obradili unutar poglavlja 7.2.



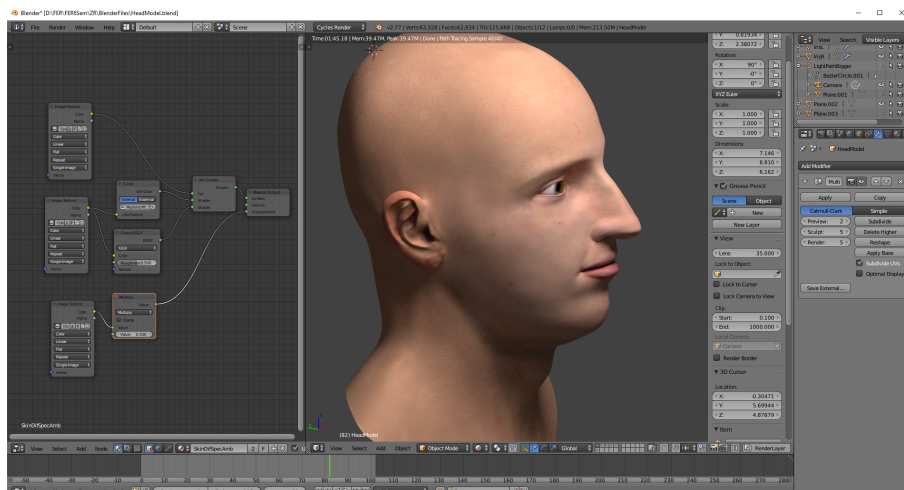
(a) Prikaz uz vrijednost varijable *faculty* 0 (b) Prikaz uz vrijednost varijable *faculty* 0.2 (c) Prikaz uz vrijednost varijable *faculty* 1

Slika 7.8: Prikaz doprinosa sjenčara ovisno o vrijednosti varijable *faculty*

Dodatno, koristeći teksturu koju smo izradili unutar poglavlja 6.5, koja upravlja odnosima difuzne i zrcalne komponente sjenčara, možemo postići kvalitetniji izgled modela fokusirajući dijelove kože na kojima se više primijeti zrcalna komponenta, od onih nad kojima se više primjećuje difuzna komponenta sjenčara. Potrebno je jednostavno čvor koji predstavlja teksturu spojiti u sjenčar za miješanje utjecaja dvaju sjenčara umjesto varijable *faculty*, čime smo automatski Blenderu dojavili kako će utjecaji boje na teksturi određivati koji sjenčar će više utjecati na kojem dijelu modela. Slika 7.9 prikazuje iscrtani model uz korištenu teksturu za kontroliranje utjecaja sjenčara. Valja primijetiti kako su na dijelovima nosa, čela i obraza izraženiji zrcalni odsjaji nego što su to na ostalim dijelovima modela, upravo kako smo to i željeli pri stvaranju texture unutar poglavlja 6.5.

7.6. Sjenčar dubine

Pošto ćemo se unutar sljedećeg poglavlja baviti izradom sjenčara za prikazivanje podpovršinskog raspršenja svjetlosti, objašnjenog unutar poglavlja 5.2, trebat će nam neki način da odredimo koji dijelovi modela će više reagirati na efekte podpovršinskog raspršenja svjetlosti od drugih. Jedan od načina je izrada crno-bijele texture čije će vrijednosti boje određivati utjecaj podpovršinskog raspršenja, na sličan način kao što



Slika 7.9: Prikaz iscrtanog modela koristeći teksturu kao upravljački faktor miješanja sjenčara difuzne i zrcalne komponente

je objašnjeno unutar poglavlja 6.5. Drugi način jest izradom sjenčara koji će kombinacijom dviju boja, određivati koji dijelovi modela reagiraju više na koju komponentu sjenčara, ali će nam dati dodatnu kontrolu i mogućnost promjena područja u stvarnom vremenu. Dodatna kontrola svakako će nam olakšati i ubrzati kvalitetno određivanje idealnih parametara sjenčara podpovršinskog raspršenja svjetlosti.

Prije nego se upustimo u izradu sjenčara za određivanje područja koja će više reagirati na podpovršinsko raspršenje svjetlosti od drugih, treba objasniti kako se ta područja uopće mogu odrediti. Promatrajući ljudsku glavu pod utjecajem svjetlosti iz različitih kutova, dolazi se do zaključka kako tanka područja glave i područja glave ispod kojih se direktno ne nalaze kosti, već mekano tkivo, snažnije reagiraju na efekte podpovršinskog raspršenja svjetlosti od drugih. Ponajviše se taj utjecaj ističe na području očiju, usta, ušiju i nosnica nosa. Ideja na kojoj ćemo bazirati sjenčar i koja aproksimira taj zaključak je sljedeća: iz svake točke poligona modela, ispucavat ćemo zraku u smjeru, koji je približno jednak suprotnom smjeru normale, uz dodanu malu nepravilnost radi realističnijih rezultata, te provjeravati gdje ta zraka siječe tijelo. Zatim, ako sjecište postoji, izračunat ćemo udaljenost sjecišta i točke iz koje smo zraku poslali, te u odnosu na neku graničnu vrijednost, koju možemo mijenjati direktno unutar Blendera, na izlaz sjenčara propuštati boju koja će predstavljati količinu utjecaja podpovršinskog raspršenja.

Unutar tijela funkcije sjenčara, pozivat će se metoda *lambertRandom* koja će vraćati smjer s malom varijacijom u odnosu na predani smjer kao argument, no njena izvedba nije toliko bitna za izgradnju ovog sjenčara, pa sama funkcija neće biti obrađena

unutar ovog rada, već će naglasak biti na sjenčaru. Također bit će korištena funkcija *myClampFunction* koja će ulazni argument ograničiti na interval $[0,1]$. Na ulazu sjenčara bit će nam potrebna dva vektora boje koji će prikazivati krajnje vrijednosti boje koje sjenčar može poslati na izlaz, u našem slučaju to će biti crna i bijela boja. Također, bit će nam potrebna varijabla koja će predstavljati graničnu vrijednost dubine tkiva za koji se ostvaruje efekt podpovršinskog raspršenja, na način da se sva područja s vrijednosti udaljenosti veće od te granične vrijednosti označavati crnom bojom, odnosno ta područja neće imati efekt podpovršinskog raspršenja, dok će sva ostala područja s udaljenosti manjom od granične vrijednosti biti skalirana na raspon $[0,1]$, te će imati u nekoj mjeri izražen utjecaj podpovršinskog raspršenja. Zatim ćemo iskoristiti varijablu dubine, skaliranu na raspon $[0,1]$, kao parametar t unutar formule linearne interpolacije između dvije boje, te završnu boju poslati na izlaz sjenčara. Sljedeći isječak koda prikazuje tijelo sjenčara dubine, dok slika 7.10 prikazuje ishod sjenčara ovisno o graničnoj vrijednosti za dubinu.

```

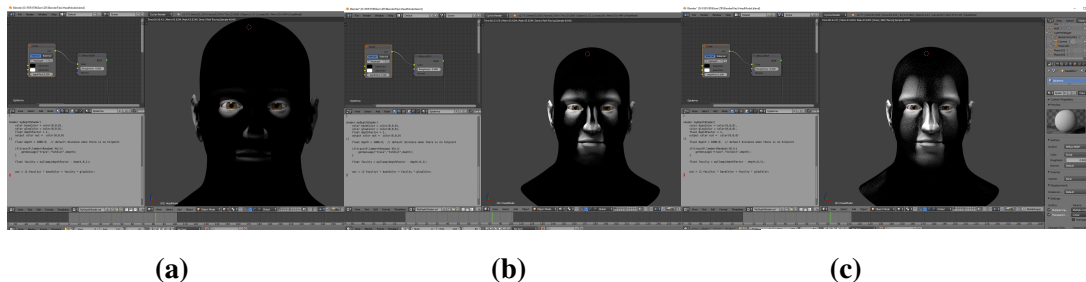
shader myDepthShader(
    color baseColor = color(0,0,0),
    color glowColor = color(0,0,0),
    float depthFactor = 1,
    output color out = color(0,0,0)
){
    float depth = 1000.0; // standardna vrijednost kada
                          // ne postoji sijeciste zrake i tijela

    if( trace(P, lambertRandom(-N))) {
        getmessage("trace", "hitdist", depth);
    }

    float faculty = myClamp(depthFactor - depth, 0, 1);

    out = (1-faculty) * baseColor + faculty * glowColor;
}

```



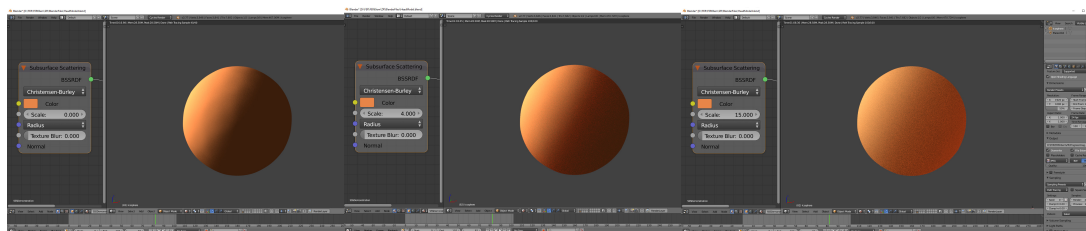
Slika 7.10: Prikaz sjenčara dubine uz granične vrijednosti dubine 0.5 7.10a, 1.5 7.10b i 3.0 7.10c

7.7. Sjenčar podpovršinskog raspršenja svjetlosti

Završni korak pri izgradnji realističnog sjenčara kože jest sjenčar podpovršinskog raspršenja svjetlosti na koži. Sjenčar se sastoji od tri komponente međusobno povezane u jednu funkcionalnu cjelinu koja simulira cjelokupni efekt podpovršinskog raspršenja svjetlosti svih slojeva kože.

Prva komponenta sjenčara predstavlja podpovršinsko raspršenje svjetlosti u području sloja epiderme, kao prvog sloja kože koje zraka svjetlosti susreće pri prodoru kože. Sastoji se od teksture izrađene unutar poglavlja 6.4 dovedene na Blenderov sjenčar podpovršinskog raspršenja, koji simulira podpovršinsko raspršenje propuštajući zrake izvora svijetla dublje kroz tijelo, ovisno u parametru mjere (engl. *scale*) raspršenja. Što je mjera veća to će svjetlost dublje prodirati u tijelo, te će sjene tijela biti mekše. Slika 7.11 prikazuje djelovanje podpovršinskog raspršenja ovisno o vrijednosti mjere na primjeru kugle koja je obasjana samo s jedne strane. Jasno je vidljivo kako povećanjem mjere prolaznosti zrake svijetla, izravno neobasjani dijelovi tijela dobivaju osvjetljenje. Također moguće je podešavati vektor boje radijus (engl. *radius*) koji upravlja rgb komponentama zrake svjetlosti, ukoliko želimo omogućiti da više prolazi crvena komponenta svjetlosti od zelene ili plave, no unutar ovog rada već su izgrađene teksture koje će upravljati tim dijelom, tako da varijabla radijus neće biti mijenjana.

Na jednak način izgrađeni su sjenčari podpovršinskog raspršenja slojeva derme i hipoderme, uz ručno namještanje varijable mjere radi postizanja željenog efekta. Nakon izgradnje svih triju komponenti sjenčara podpovršinskog raspršenja svjetlosti, sjenčari su povezani u funkcionalan sjenčar podpovršinskog raspršenja koristeći sjenčare za miješanje utjecaja dvaju sjenčara. Pri povezivanju sjenčara, sjenčari epiderme i hipoderme zastupljeni su u podjednakim količinama, dok je utjecaj sjenčara derme pojačan, jer je derma najveći od triju slojeva kože, te je njezin crvenkasti sjaj najupečatljiviji.



(a)

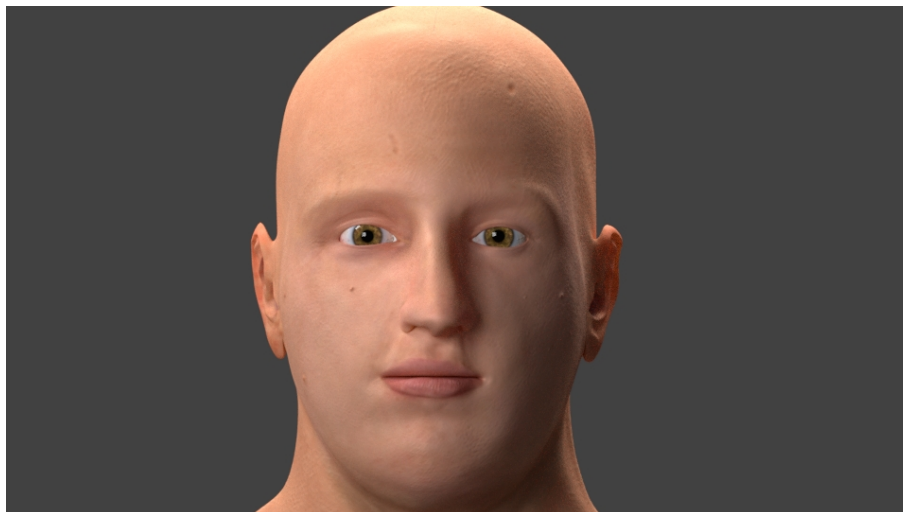
(b)

(c)

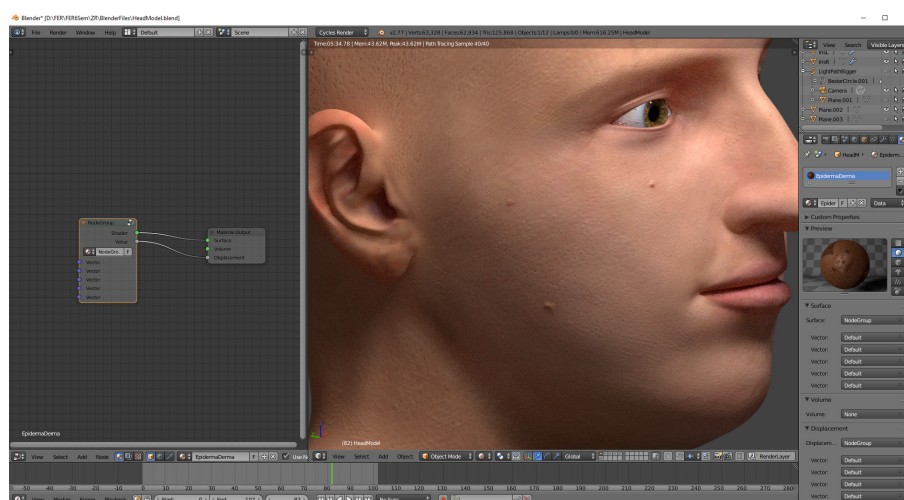
Slika 7.11: Prikaz sjenčara podpovršinskog raspršenja uz vrijednosti mjere raspršenja 0 7.11a, 4 7.11b i 15 7.11c

7.8. Završni prikaz kože

Nakon uspješne izrade najbitnijih komponenata koje su potrebne za izradu realističnog sjenčara kože, sve što preostaje jest spojiti sve komponente u jedan funkcionalni sjenčar i pogledati rezultate. Sljedeće slike 7.12 i 7.13 prikazuju završni izgled kože modela osjenčane sjenčarom koji smo izgradili unutar ovog poglavlja. Slike su iscrtane na prijenosnom računalu Asus na intel-ovom procesoru i7 i NVIDIA 940M grafičkoj kartici, uz sakupljanje (engl. *sampling*) 500 uzoraka po svakom pikselu. Završni model izrađen unutar ovog rada, uz sve detalje, neravnine i nabore kože, sastoji se od 3 459 168 vrhova, 3 456 870 poligona i 6 913 740 trokuta, što je točno dvostruko više trokuta nego poligona, te pokazuje kako je uspješno sačuvano nepisano pravilo izrade modela samo od četverokuta kako Blender ne bi morao samostalno raditi preinake na modelu da bi pretvorio četverokute u trokute pogodne za sklopovsku obradu, što može dovesti do stvaranja neželjenih artifakta. Za izradu modela utrošeno je 30-tak sati rada, što zbog postizanja željene razine kvalitete, što zbog neiskustva i napravljenih grešaka, na čiji ispravak je potrošeno dosta vremena. Sve izrađene texture veličine su 4096x4096 slikovnih elemenata, zbog želje za prikazom sitnih žilica, madeža i drugih detalja koji izgledu kože daju dodatnu razinu realističnosti.



Slika 7.12: Završni prikaz modela



Slika 7.13: Završni detaljniji prikaz modela

8. Zaključak

Zbog neprestane potrebe korištenja 3D modela čovjeka unutar animacija, medicinskih prikaza, te video igara, teži se njihovom što realističnijem prikazu. No, treba imati na umu kako složenost izgradnje modela proporcionalno raste realističnosti prikaza. Kompletно ručna izrada visoko kvalitetnog 3D modela ljudskog lica, odnosno glave, dosta je vremenski zahtjevan i kompleksan proces koji iziskuje dobro uočavanje i izradu detalja, proporcionalnosti i bitnih karakteristika koje daju ljudskom licu prepoznatljiv izgled. Ukoliko je većina modela izuzetno visoke kvalitete, no jedan element modela ne zadovoljava njegove proporcije, korisnik će gotovo na prvi pogled moći primijetiti kako tu nešto nije kako treba. Izrađen 3D model, tek je polovica potrebnog posla pri postizanju realističnog završnog izgleda. Izrada kvalitetnih tekstura i sjenčara jednako su važni kao izrada kvalitetnog 3D modela, te je završni dojam realističnosti koji model ostavlja postignut spojem kvalitetnog modela i sjenčara.

Sjenčar koji će realistično prikazati ljudsku kožu, uz simulaciju svih elemenata osvjetljenja i reagiranja kože na utjecaj svjetla veoma je kompleksne građe, te je unutar ovog rada izrađen sjenčar nešto jednostavnije građe, uz održanu razinu realističnosti prikaza kože. Također, treba imati na umu za što se 3D model koristi, te je li potrebno njegovo iscrtavanje u stvarnom vremenu, pri čemu bi se trebali koristiti razni trikovi kako bi se zadržala razina realističnosti.

Model izrađen unutar ovog rada pokušava na što realističniji način prikazati ljudsko lice, no na prvi pogled jasno je vidljiva razlika između modela i stvarnih fotografija, što pokazuje kako su obrađene metode, pri izradi kvalitetnog prikaza ljudskog lica i kože unutar ovog rada, zapravo samo malen dio kompleksnog postupka izrade realističnog prikaza 3D modela ljudskog tijela.

LITERATURA

- [1] Joshua Alger. *Merging the ear and the head*. URL https://www.youtube.com/watch?v=86JiuZpbi_w&t=2s.
- [2] Blender. *Blender 2.78 Manual*. URL https://docs.blender.org/manual/en/dev/render/blender_render/materials/index.html.
- [3] E.Catmull. Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer-Aided Design*, 10(6):350–355, 1978.
- [4] Larrz Gritz. *Open Shading Language 1.8 - Language Specification*, 2017. URL <https://github.com/imageworks/OpenShadingLanguage/blob/master/src/doc/osl-languagespec.pdf>.

Modeliranje i prikaz ljudske kože

Sažetak

Ovaj rad obrađuje razne metode izrade 3D modela ljudskog lica, te komponente pri izradi sjenčara koji simulira realistično reagiranje kože na utjecaj svjetla. Prvi dio rada sadrži detaljan pregled postupaka korištenih pri izradi 3D modela unutar programskog alata Blender, uz izradu modela i sjenčara oka, neophodnog za realistično prikazivanje ljudskog lica. Također, prikazani su postupci izrade tekstura, kasnije korištenih pri izradi sjenčara, unutar programskog alata Blender i alata za uređivanje slika GIMP. Drugi dio rada objašnjava građu kože, te kako koža reagira na nadolazeću zraku svjetlosti. Završni dio rada obuhvaća izradu komponenata sjenčara koji simulira realistično reagiranje kože na utjecaj svjetlosti, te završni prikaz modela napravljenog unutar ovog rada.

Ključne riječi: model ljudskog lica, Blender, građa kože, sjenčar realističnog osvjetljenja kože

Modelling and representation of human skin

Abstract

This paper processes various methods of making 3D model of human face, and components used to make shader that will, in a realistic way, simulate how the skin reacts upon the impact of light. First part of this paper contains detailed review of procedures used for making the 3D model inside programming tool Blender, as well as making model and shader of the eye, which is required for making realistic appearance of human face. Also, it was shown how to make textures, later used in developing shader, inside programming tool Blender and image editing tool GIMP. Second part of this paper explains the composition of the skin and how it reacts with incoming light ray. The final part of this paper encapsulates development of components used in shader that simulates realistic skin behaviour upon light impact, as well as final render of model made inside this paper.

Keywords: model of human face, Blender, skin composition, realistic skin shader