



Janne Kontio

Reaaliaikaisesti renderöidyn 3D- hahmon ihon teksturointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Medianomi

Viestinnän tutkinto-ohjelma

Opinnäytetyö

25.4.2024

Tiivistelmä

Tekijä(t):	Janne Kontio
Otsikko:	Reaaliaikaisesti renderöidyn 3D-hahmon ihon teksturointi
Sivumäärä:	51 sivua + 1 liitettä
Aika:	25.4.2024
Tutkinto:	Medianomi
Tutkinto-ohjelma:	Viestinnän tutkinto-ohjelma
Suuntautumisvaihtoehto:	3D-animointi ja visualisointi
Ohjaaja(t):	Lehtori Jaro Lehtonen

Tässä opinnäytetyössä käsitellään 3D-hahmon ihon teksturointia, kun tarkoituksena on renderöidä hahmo reaaliaikaisesti pelimoottorissa. Opinnäytetyön tavoitteena oli saavuttaa kattava ymmärrys ihon ominaisuuksista, kuten sen värityksestä ja pinnan muodoista, ja soveltaa tietoa näistä ominaisuuksista käytännössä opinnäytetyön teososassa. Opinnäytetyössä perehdytään erilaisiin asiantuntijalähteisiin, kuten kirjallisuuteen, artikkeleihin, tutkimuksiin, blogikirjoituksiin ja videomateriaaleihin.

Opinnäytetyö on rakenteellisesti jaoteltu neljään sisältöluokkaan. Ensimmäisessä sisältöluvussa käydään läpi valikoitua alan sanastoa liittyen tässä opinnäytetyössä käsiteltäviin aiheisiin. Toisessa sisältöluvussa käydään läpi perusteita tietokonegrafiikasta teksturoinnin käsittelyn pohjustamiseksi. Kolmannessa sisältöluvussa käsitellään ihon fysiologiaa sekä lääketieteeseen että tietokonegrafiikkaan liittyvien lähteiden kautta, jotta saavutetaan kattavampi ymmärrys ihon eri ominaisuuksista.

Viimeinen sisältöluokka käsittelee teososan tuotantoa, jossa käydään läpi tekstuurien tuottamista 3D-hahmon päälle Zbrush- ja Substance 3D Painter -ohjelmilla. Esiin nostetaan erilaisia tapoja tuottaa korkeusdataa kappaleen pintaan sekä niiden hyödyntämistä käytännössä. Teksturoinnin jälkeen pää viedään renderöitäväksi Unreal Engine 4 -pelimoottoriin. Hahmon ihon sävyttämiseen rakennetaan myös Unreal Engine 4:ssä toiminto, jolla ihonsävyä voidaan vaihtaa dynaamisesti säätämällä kromoforien määrää.

Teososan lopputuloksena saatiin aikaiseksi realistinen, reaaliaikaisesti renderöitävä, dynaaminen ihosävytin Unreal Engine 4:ssä. Teoriaan perehtymisen jälkeen saavutettiin myös artistin näkökulmasta kattava ymmärrys ihon fysiologiasta ja valon käyttäytymisestä sen kerroksissa. Työstä käy ilmi, kuinka teknologian ja ohjelmistojen kehitys muuttavat teksturoinnin ja sävyttämisen rakentamisen työnkulkua sitä mukaa kun erilaisia työvaiheita saadaan automatisoitua.

Asiasanat: teksturointi, iho, fysiologia, Unreal Engine, Zbrush, Substance 3D Painter

Opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author(s): Janne Kontio
Title: Texturing the Skin for a Real-time Rendered 3D Character
Number of Pages: 51 pages + 1 appendices
Date: 25 May 2024

Degree: Bachelor of Culture and Arts
Degree Programme: Media
Specialisation option: 3D Animation and Visualization
Instructor(s): Jaro Lehtonen, Senior Lecturer

This thesis covers the texturing of skin for a 3D character, when the intended use is creating a real-time render of the character in a game engine. The objective of the thesis was to achieve a comprehensive understanding of the properties of skin, such as its colouring and surface shapes, and to apply knowledge of these properties in the practical part of the thesis. Various expert sources on the covered topics are examined, such as literature, articles, studies, blog posts and video material.

The thesis is structurally divided into four primary content chapters. In the first content chapter a selected vocabulary of the field, related to the topics discussed in this thesis, is covered. In the second chapter the basics of computer graphics are briefly discussed, to gain a basis for the texturing process. In the third chapter, the physiology of the skin is discussed through sources related to both medicine and computer graphics, to achieve a more comprehensive understanding of the different properties of the skin.

The last content chapter covers the production part of the work, where the production of textures for the head of a 3D character in Zbrush and Substance 3D Painter is covered. Different ways of producing height data on the surface of an object are highlighted, as well as their practical use. After texturing, the head is imported to the Unreal Engine 4 game engine for rendering. A function is also built into the character's skin shader in Unreal Engine 4, with which the skin tone can be changed dynamically, by adjusting the chromophore fraction.

The result of the practical part was a realistic, real-time rendered, dynamic skin shader in Unreal Engine 4. A comprehensive understanding of the physiology of the skin and the behavior of light in its layers was also achieved, from an artist's point of view. The project shows how the development of technology and software changes the workflow of texturing and building shaders, as different parts of the workflow can be automated.

Keywords: texturing, skin, physiology, Unreal Engine, Zbrush, Substance 3D Painter

This thesis has been checked using Turnitin Originality Check service.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sanasto	1
3	PBR-teksturointi	2
3.1	Lyhyt kertaus tietokonegrafiikasta	3
3.2	Valon heijastuminen ja taittuminen	4
3.3	PBR ja perinteinen teksturointi	6
4	Ihon fysiologia	8
4.1	Ihon rakenne	8
4.1.1	Ihon kerrokset	9
4.1.2	Ihohuokokset ja muut pinnan muodot	11
4.1.3	Ihon paikalliset kiiltävyyssvaihtelut	13
4.1.4	Karvoitus ihossa	15
4.2	Ihon väritys: kromoforit ja absorptio	15
4.2.1	Hemoglobiini	15
4.2.2	Melaniini	16
4.2.3	Kerrostenvälinen absorptio	17
4.2.4	Valon pinnanalainen hajonta	17
5	Projektiosuus: reaaliaikaisesti renderöidyn pään teksturointi	18
5.1	Tertiäariset yksityiskohdat: häilyvä raja veistosta teksturointiin	20
5.1.1	Leipominen high polystä low polyyn	20
5.1.2	Projisoiminen valokuvista tai skannatusta datasta	22
5.1.3	Veistettyjen yksityiskohtien tuonti korkeuskarttoina	23
5.1.4	Käytännön prosessi tässä projektissa	24
5.2	Pohjavärikartan teko hyödyntäen kromoforeja ja absorptiota	29
5.3	Verenkierto- ja melaniinikartat	35
5.4	Karkeus-/kiiltävyysskartta	36
5.5	Pinnanalainen hajonta eli subsurface scattering, SSS	37
5.6	Sävyttimen rakentaminen ja renderöinti Unreal Enginessä	37
6	Yhteenveto	46
	Lähteet	48
	Kuvalähteet	50
	Liitteet	52

1 Johdanto

Pääasiallinen syy tämän opinnäytetyön aihevalinnalle oli halu oppia enemmän ja syvemmin ihon teksturoinnista. Olin tyytymätön aikaisemman hahmoprojektini lopputulokseen, sillä erityisesti hahmon iho ei näyttänyt kovin uskottavalta. Läheltä tarkasteltuna ihossa on suuri kirjo erilaisia muotoja, kuvioita ja sävyvaihteluja, ja asetin tavoitteekseni oppia ymmärtämään, mistä kaikki nämä yksityiskohdat syntyvät ja miten luoda niitä uskottavasti 3D-hahmolle.

Tein teksturointiprojektin osana tätä opinnäytetyötä, jotta oppisin käytännössä soveltamaan kaikkea oppimaani ihon rakenteesta sekä valon siinä käyttäytymisestä. Aikaisempaa hahmoprojektia tehdessäni olin alkanut pohtia myös ihon värien valintaa tekstuureja maalatessa ja sitä, onko olemassa fysikaalisesti tarkkaa väripalettia, josta artisti voisi poimia ihonsävyjä valokuvista referoimisen ja arvailun sijaan.

Rakenteellisesti tässä opinnäytetyössä käydään ensin lyhyesti läpi tietokonegrafiikan ja teksturoinnin perusteet ja nykypäivän käytännöt, kuten PBR eli valoppiin perustuva renderöinti. Tämän jälkeen perehdytään ihon fysiologiaan, jotta saavutetaan riittävä ymmärrys ihon ominaisuuksista, rakenteesta ja värityksestä. Tavoitteena ei ollut saavuttaa täydellistä lääketieteellistä ymmärrystä ihon fysiologiasta, vaan tutkia sitä tekstuuriartistin näkökulmasta, erityisesti kun tarkoituksena on tuottaa reaaliaikaisesti renderöitävää 3D-grafiikkaa. Lopuksi käsitellään opinnäytetyön projektiosuutta, jossa sovelletaan käytännössä ihon fysiologiasta opittua tietoa pelimoottorin kontekstissa. Projektiosuudessa on tuotettu tekstuurit 3D-hahmon päälle, joka on sitten viety Unreal Engine 4 -pelimoottoriin renderöitäväksi, sekä rakennettu iholle dynaaminen sävytin, jolla voi vaihtaa pigmenttien määrää ihossa.

2 Sanasto

Tähän opinnäytetyöhön valikoituja 3D-alan termejä suomeksi selitettynä:

- **Kartta:** (engl. map) Kuvatiedosto, jota käytetään 3D-kappaleen pinnan kuvaamiseen.
- **Leipominen:** (engl. baking) Renderöimistekniikat, joissa virtuaalisia ominaisuuksia muutetaan kuviksi. Esimerkiksi kappaleen pintarakente voidaan leipoa normaalikartaksi. Joensuun (2016) ehdotus termin käännökselle on leipomisen sijaan beikkaaminen tai valokuvauksesta tuttu kehittäminen, mutta anekdoottisen kokemuksen perusteella leipominen on sanana beikkaamisen lisäksi yleisessä käytössä.
- **Low poly -malli:** (engl. low poly model) 3D-malli, jonka kolmiomäärä on pieni.
- **PBR:** (engl. PBR, Physically Based Rendering) valo-oppiin perustuva renderöinti.
- **Polygoni:** (engl. polygon) Tahko, vähintään kolmesta verteksistä koostuva monikulmio.
- **Renderöinti:** (engl rendering) Prosessi, joka muodostaa 3D-kappaleesta tai skenestä kuvan.
- **Skene:** (engl. scene) 3D-avaruus kappaleineen ja asetuksineen.
- **Sävytin:** (engl. shader) Pienoisohjelma tai suoritettavaa koodia, jonka avulla voidaan määrittää kappaleen pinnan ominaisuudet renderöintiä varten.
- **Verteksi:** (engl. vertex) 3D-avaruuden piste, joka määrittää 3D-mallin muotoa.

(Joensuu 2016.)

Näiden yleisempien termien lisäksi tässä opinnäytetyössä esiintyy myös erikois-
tuneempia termejä, jotka on selitetty auki niiden käsittelyn yhteydessä. Erikois-
tuneemmat termit on vapaasti suomennettu, koska niille ei ole tämän työn kirjoit-
tushetkellä löytynyt vakiintuneita suomennoksia.

3 PBR-teksturointi

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti, mitä tietokonegrafiikka on ja mitkä työvai-
heet täytyy käydä läpi, jotta 3D-mallin voi teksturoida. Tämän lisäksi pohjuste-
taan valon käyttäytymistä erilaisilla materiaaleilla, koska realismiin pyrkivässä
tietokonegrafiikassa on loppujen lopuksi kyse valon käyttäytymisen mallintami-
sesta. Tämän vuoksi myös tekstuuriartistin on hyvä ymmärtää perusteet valon

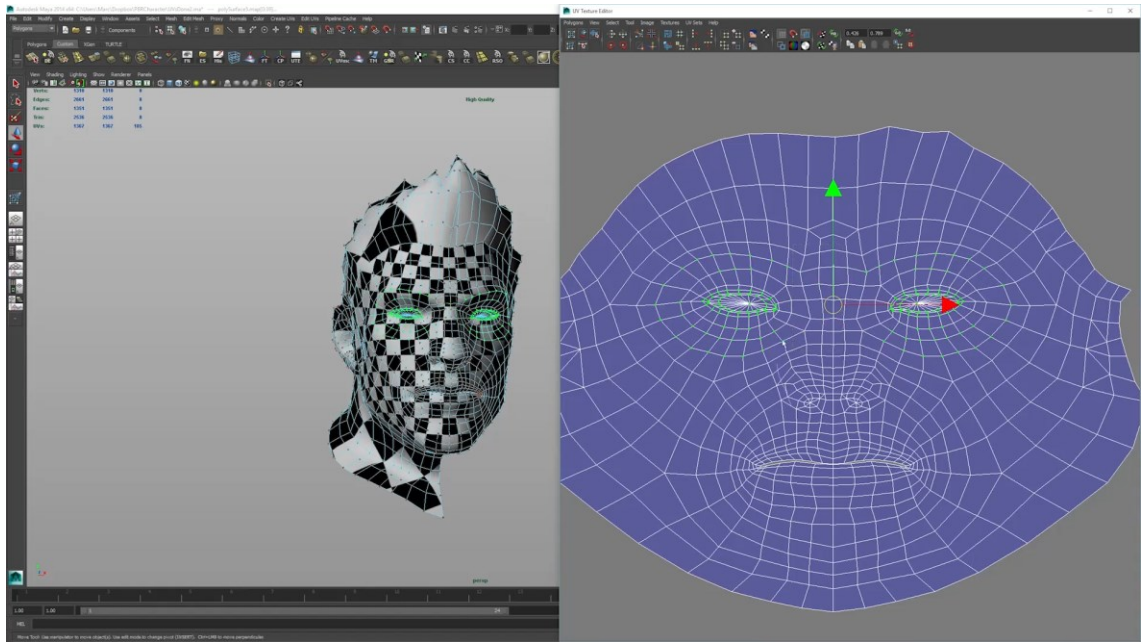
heijastumisesta sekä taitumisesta. Lopuksi kerrataan, mitä on PBR-teksturointi ja miten se poikkeaa perinteisestä teksturointitavasta.

3.1 Lyhyt kertaus tietokonegrafiikasta

Lyhyesti tiivistettynä tietokonegrafiikassa on kyse kuvaelementtien (*picture element* eli *pixel* eli suomeksi pikseli) värin ja valovoiman muokkaamisesta halutun kuvan muodostamiseksi. Rasterointi on prosessi, jolla määritetään sopivat pikselit edustamaan grafiikkaa, liikkuvia kuvia tai graafisia objekteja. (Kumar 2020, 13–14.)

Jotta 3D-malli voidaan piirtää pikseleinä kuvaksi näytölle, on ensin käytävä läpi monta työvaihetta. Ensimmäinen vaihe on mallinnus, jossa 3D-malli voidaan joko veistää, jolloin puhutaan high poly -mallinnuksesta, tai mallintaa suoraan niin sanotuksi low poly -malliksi. Näillä termeillä viitataan siihen, kuinka tiheää 3D-mallin muodostava polygoniverkko on.

Mallintamisen jälkeen on 3D-mallille tehtävä teksturointia varten UV-kartoitus, joka on esitetty kuvassa 1. 3D-mallin pinta levitetään auki litteäksi pinnaksi, sillä tekstuurit ovat kaksiulotteisia kuvia. U ja V viittaavat 2D-kuvan koordinaatiston vaaka- ja pystyakseleihin, sillä X ja Y viittaavat jo 3D-avaruuden vaaka- ja pystyakseleihin. Tekstuurien tarkkuudesta puhuttaessa oleellinen käsite on teksteli-resoluutio (engl. *texture element* eli *texel*.) Tekstuurikuvatiedoston pikselien koko on vakio, mutta riippuen siitä, minkä kokoiseksi alueiksi mallin pinta on levitetty auki, vaihtelee pikselien suhteellinen koko mallin pinnassa. UV-kartoitusta tehdessä käytetään mallin pinnassa usein tilapäistä tekstuuria, joka auttaa hahmottamaan eri alueiden teksteli-resoluution tiheyden. (Verma 2021.)



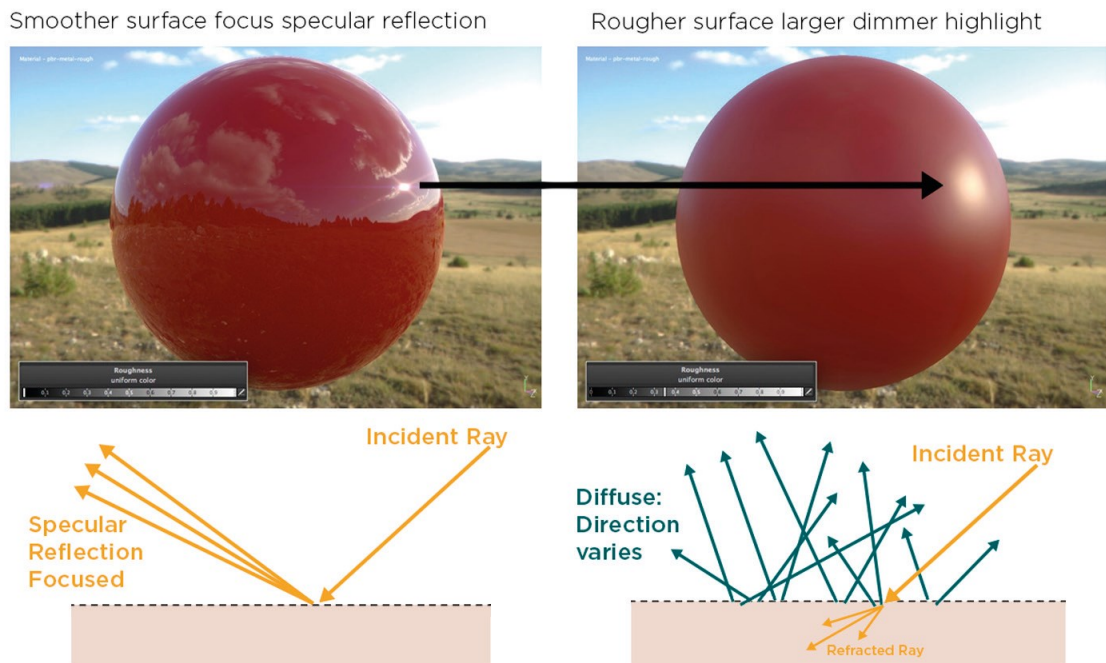
Kuva 1. Hahmon kasvot levitettyinä auki UV-kartaksi. Shakkiruudukkokuva 3D-mallin pinnassa auttaa hahmottamaan auki levitetyn pinnan koon suhteessa tekstuurikartan kokoon sekä suhteessa muiden auki levitettyjen pintojen tekseliresoluutioon. (Brunet 2016, video 4, 54:34.)

Matalaresoluutioiseen eli low poly -malliin yleensä leivotaan korkearesoluutiosta versiosta pinnan pienet yksityiskohdat, joiden muodostamiseen verkon tiheys ei low poly -mallissa riitä. (Russell 2014.) Yksityiskohdat leivotaan erilaisiin karttoihin, joita ovat esimerkiksi pinnan muotoja sisältävä normaalikartta (normal map), lähellä toisiaan olevia pintoja kuvaava ambient occlusion- tai AO-kartta ja mallin osien paksuutta kuvaava korkeuskartta (height map). (McDermott 2018.)

3.2 Valon heijastuminen ja taittuminen

Spekulaarinen heijastuminen viittaa valoon, joka on heijastunut pinnalta ja kulkee toiseen suuntaan. Se noudattaa heijastuksen lakia, jonka mukaan täysin taiseilla pinnalla heijastuksen kulma on yhtä suuri kuin tulokulma. Useimmat pinnat ovat kuitenkin epäsäännöllisiä, jolloin heijastuksen suunta vaihtelee satunnaisesti riippuen pinnan karkeudesta. Tämä muuttaa valon suuntaa, mutta sen voimakkuus pysyy samana. Karkeammilla pinnoilla huippuvaloheijastukset ovat suurempia, mutta näyttävät himmeämmiltä. Sileämmillä pinnoilla puoles-

taan nämä spekulaaariset heijastukset pysyvät tarkempina ja näyttävät kirkkaam-
milta. Molemmissa tapauksissa heijastuneen valon määrä on kuitenkin sama.
Kuvassa 2 havainnollistetaan tätä ilmiötä. (McDermott 2018, 22.)



Kuva 2. Spekulaarinen heijastus sileällä ja karkealla pinnalla. Karkean pinnan huippuvalo näyttää suuremmalta mutta himmeämmältä. Molemmissa tapauksissa heijastuneen valon määrä on kuitenkin sama. (McDermott 2018, 22.)

Taittuminen eli refraktio tarkoittaa muutosta valonsäteen suunnassa. Siirtyessä yhdestä välittäjäaineesta toiseen säteen nopeus ja suunta muuttuvat. Taittumisen indeksi (engl. *index of refraction*) eli IOR on mittayksikkö, jolla kuvataan sitä, kuinka paljon valonsäde muuttaa suuntaa kulkiessaan yhdestä välittäjäaineesta toiseen. Esimerkiksi vedellä IOR-arvo on 1,33, kun taas lasilla se on 1,52. (McDermott 2018, 23.)

Diffuusiheijastukset ovat valoa, joka on taittunut. Valonsäde kulkee yhdestä välittäjäaineesta toiseen ja hajoaa monta kertaa sen sisällä. Lopulta se taittuu uudestaan ja tulee ulos suunnilleen samasta kohdasta, josta se tuli sisään. Diffuusimateriaalit absorboivat valoa, ja jos valonsäde kulkee liian kauan materiaa-

lin sisällä, tulee se kokonaan absorboiduksi. Materiaalit, joissa on sekä suuri valon hajonta että vähäinen absorbointi, ovat läpikuultavia. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi savu, maito, iho, jade ja marmori. Materiaalien väri syntyy niistä valon aaltopituuksista, jotka pääsevät heijastumaan pois sen pinnasta. Materiaaliin tulevat aaltopituudet absorboituvat ja taittavat ja heijastuvat sekä spekulaaarisesti että diffuusion kautta. Jäljelle jäävät heijastuneet aaltopituudet ovat näkemämme väri. (McDermott 2018, 24–28.)

3.3 PBR ja perinteinen teksturointi

Perinteiseen teksturointitapaan kuuluu valojen ja varjojen maalaaminen samaan karttaan objektin värin kanssa, jolloin puhutaan diffuusiokartasta. Koska tieto valoista ja varjoista on jo leivottu sisään karttaan, täytyy se räätälöidä sopivaksi tiettyyn valaisu ympäristöön, minkä vuoksi objekti saattaa muissa valaisutilanteissa näyttää liian tummalta tai vaalealta. Sen lisäksi heijastuksia perinteisissä työskentelytavoissa ilmaistaan heijastus- eli spekulaaarikartalla. Heijastukset on määritetty silmämääräisesti, koska spekulaaarikartta ei perustu valon fyysikaalisen käyttäytymisen mallinnukseen. (Wilson 2015.)

PBR eli Physically Based Rendering eli valo-oppiin perustuva renderöinti tarkoittaa sävyttämistä ja renderöimistä tavalla, joka tarkemmin kuvaa sitä, miten valo käyttäytyy pinnoilla. Pinnalta heijastuvan valon määrä ei voi olla suurempi kuin sille saapuvan valon määrä, eli energian määrä on vakio. PBR hyödyttää artisteja esimerkiksi siten, että se poistaa arvailun pinnan ominaisuuksien kuten spekulaaaristen heijastusten luomisessa. Kuvassa 3 näkyy ero spekulaaaristen heijastusten tarkkuudessa. 3D-mallien pinnat näyttävät myös oikeanlaisilta kaikissa valaisutilanteissa, ja PBR tarjoaa työskentelytavan yhteneväisten teosten tekemiseen useamman artistin välillä. (McDermott 2018.)



Kuva 3. Perinteinen sävytin ja PBR-sävytin rinnakkain. Oikeanpuoleinen kuva näyttää realistisemmalta, koska valo käyttäytyy fysikaalisesti oikein PBR-materiaaleilla. (Wilson 2015.)

PBR-työskentely voidaan jakaa pääasiassa kahteen eri lähestymistapaan käytettyjen tekstuurikarttojen mukaan, jotka molemmat noudattavan samoja fysikaalisia periaatteita, mutta vaihtelevat hienoisesti lopputuloksen suhteen: metallisuus/karkeus-työnkulkuun (metal/roughness) ja spekulaisuus/kiiltoisuus-työnkulkuun (specular/glossiness). Näissä työnkuluissa samat valon heijastumisen ominaisuudet on ilmaistu nimiensä mukaisilla erilaisilla tavoilla. Kumpikin tapa käyttää näiden karttojen lisäksi myös normaali-, AO- sekä korkeuskarttoja. Metallisuus/karkeus-työnkulku voi olla artistille intuitiivisempi tekstuurien työstämisessä, ja se käyttää myös vähemmän tekstuurimuistia, sillä metallisuus ja karkeus ovat molemmat harmaasävykarttoja. (McDermott 2018.)

Erilaisten karttojen hyödyntäminen eri renderöintimoottoreissa voi artistin näkökulmasta olla välillä hankalaa eri nimeämiskäytäntöjen vuoksi. Esimerkiksi karkeus- ja kiiltoisuuskartat kuvaavat samaa pinnan ominaisuutta mutta vain käänteisesti, ja riippuen siitä, käyttääkö renderöintimoottori ohjelmointirajapintana OpenGL:ää vai DirectX:ää, saattaa normaalikartan vihreä värikanava olla käänteinen. Kaikki renderöintimoottorit eivät myöskään käytä täsmälleen samanlaisia karttoja, joita metallisuus/karkeus- tai spekulaisuus/kiiltoisuus-työnkuluissa tuotetaan, vaan karttoja saatetaan joutua konvertoimaan moottorin käyttämään formaattiin (McDermott 2018, 85–86).

4 Ihon fysiologia

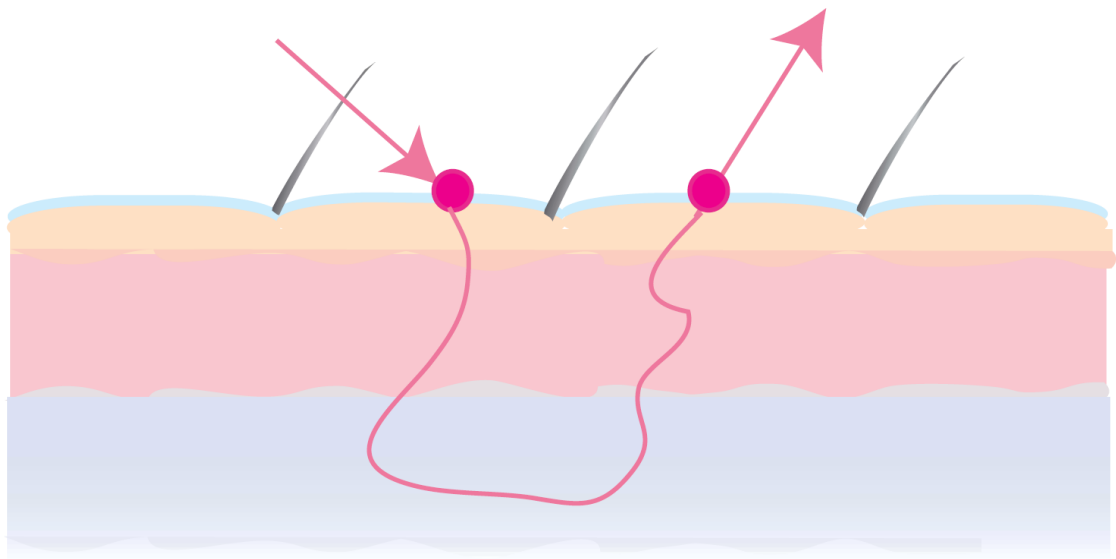
Tässä luvussa käsitellään ihon fysiologisia ominaisuuksia tekstuuriartistin näkökulmasta, erityisesti liittyen ihon kerrosten muodostamiin pieniin pinnanmuotojen vaihteluihin sekä siihen, miten ihon kerroksissa olevat kromoforit eli väriä antavat molekyylit muodostavat pinnan värityksen. Anatomiaa ja fysiologiaa käydään läpi, jotta saavutetaan riittävä ymmärrys teksturoinnin pohjaksi ihon ulkonäköön vaikuttavista tekijöistä käyttötarkoituksen ollessa 3D-mallin vieminen pelimootoriin. Myös eroavaisuuksia yksilöiden ja etnisten ryhmien välillä sivutaan, sikäli kuin ne ovat relevantteja tekstuuriartistille. Tämän syvemmälle fysiologiaan ei tässä opinnäytetyössä perehdytä.

4.1 Ihon rakenne

Iholla on hyvin monimutkainen rakenne, joka koostuu useista eri osasista. Solut, kuidut ja muut komponentit muodostavat eri kerroksia, jotka luovat ihon monikerroksisen rakenteen. Verisuonet, hiusverisuonet ja hermot muodostavat suuren verkoston tämän rakenteen sisällä. Tämän lisäksi ihosta kasvaa ohuen ohuita karvoja, jotka peittävät suurta osaa ihon pinta-alasta. Ihon pääasiallinen funktio on suojata kehoa ihon ulkopuoliselta ympäristöltä, kuten kitkalta ja iskuilta, joustavuudellaan ja kestävyydellään. Iho suojaa elimistöä haitallisilta kemikaaleilta, bakteereilta sekä ultraviolettivalolta. Se myös estää vettä haihtumasta elimistöstä sekä säätelee kehon lämpötilaa verenkierron ja hikoilun avulla. Näiden toiminnallisten erojen syynä ovat useimmiten fysiologiset vaihtelevuudet, jotka johtavat ihon ulkonäön monimuotoisuuteen. Tästä syystä on tärkeää ymmärtää ihon fysiologiaa ja anatomiaa, jotta ymmärtää miten ihon ulkonäkö muodostuu. (Igarashi, Nishino & Nayar 2007, 6.)

Ihon toiminnot vaihtelevat riippuen iästä, rodusta, sukupuolesta ja yksilöstä. Esimerkiksi vanhetessaan iholla on tapana menettää joustavuuttaan ja kestävyytään, koska ihon rakenne rappeutuu hitaasti ihmisen vanhetessa. Kyky suojata valolta vaihtelee eri rotujen välillä, johtuen vaihtelusta ihossa esiintyvän melaninin määrässä. (Igarashi ym. 2007, 7–8.)

Igarashi ym. (2007, 8–12) erittelevät ihon rakenteen kolmeen eri skaalaan, joiden kautta sitä voidaan tarkastella: mikroskaala, mesoskaala ja makroskaala. Mikroskaalaan kuuluvat ihon solurakenteet ja kerrokset, ja sen ilmiöitä ovat solutason ja kerrosten optiikka, valon heijastuminen ja taittuminen. Mesoskaalan elementtejä ovat ihon kerrosten lisäksi esimerkiksi pinnalla olevat lipidit, karvat ja rypyt. Tämän tason ilmiöitä ovat muun muassa kuvassa 4 esitetty valon pinnanalainen hajonta (tietokonegrafiikasta puhuttaessa *bidirectional scattering surface reflectance distribution function* eli BSSRDF) sekä ihon pinnan karkeuden ja kiiltävyyden mallinnus tietokonegrafiikassa. Makroskaala puolestaan käsittelee kehon eri alueet ja ruumiinosat, ja tämän opinnäytetyön kannalta oleellinen tämän tason ilmiö on eri alueiden väliset eroavaisuudet esimerkiksi pinnan karkeudessa ja kiiltävyydessä. Nämä kolme tasoa voidaan jakaa hierarkkisesti omiin, pienempiin alatasoihinsa.

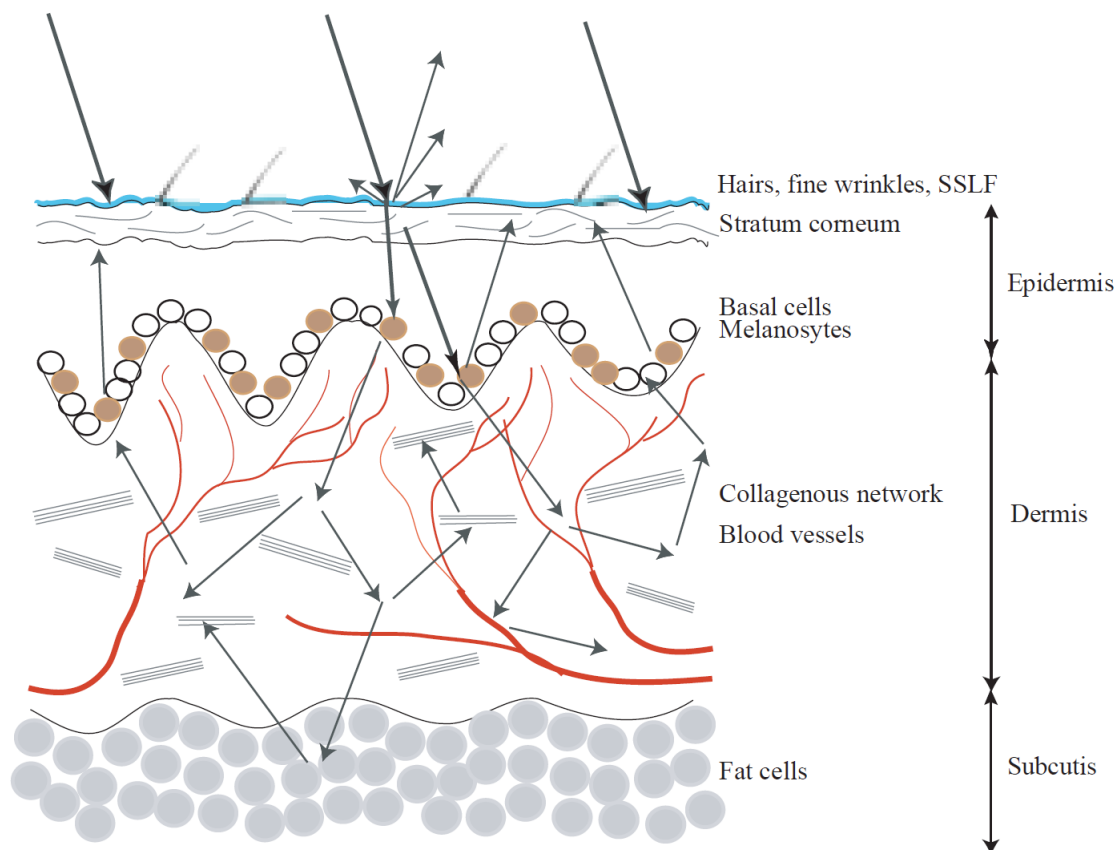


Kuva 4. Valon pinnanalainen hajonta kerrosten välillä BSSRDF-mallissa (Igarashi ym. 2007, 63).

4.1.1 Ihon kerrokset

Ihon kerroksia ovat pinnalta sisäänpäin lueteltuna orvaskesi eli epidermis, verinahka eli dermis ja ihonalaiskerros eli subkutis. Näiden kerrosten koostumus ja

solurakenne eroavat toisistaan, minkä takia valo myös käyttäytyy eri tavoin kulkiessaan niiden läpi, kuten on havainnollistettu kuvassa 5. (Igarashi ym. 2007, 19.)



Kuva 5. Optiset vaihtelut ihon eri kerroksissa. Nuolet kuvaavat valonsäteiden suuntaa. Orvaskedessä valonsäteet hajoavat harvoin, verinahassa ne taas hajoavat moneen kertaan kollageenikuiduissa. (Igarashi ym. 2007, 39.)

Orvaskesi on ihon uloin kerros, jonka tehtävä on suojata elimistöä, eikä siinä ole lainkaan verisuonia tai hiussuonia. Se on keskimäärin noin 0,2 mm paksu, ja sen paksuus vaihtelee riippuen sijainnista kehossa sekä sen sisältämän veden määrästä. Orvaskeden voi jakaa paksuuden mukaan kahteen ryhmään, joista paksumpaa esiintyy kämmenissä ja jalkapohjissa, ja siinä on paljon hikirauhasia eikä ollenkaan karvoitusta. Ohuempaa orvaskettä puolestaan esiintyy kaikkialla muualla kehossa, ja siinä on vähemmän hikirauhasia, mutta se on kauttaaltaan karvoituksen peitossa. Merkittävä poikkeus on myös huulten iho, jossa ei ole lainkaan karvoitusta, eikä myöskään hikirauhasia. Orvaskesi koostuu viidestä

pienemmästä kerroksesta, joilla jokaisella on erilainen solurakenne ja oma funktionsa. Pinnalta sisäänpäin lueteltuna ne ovat marraskesi, kirkassolukerros, jyväiskerros, okasolukerros ja tyvisolukerros. Uudet solut syntyvät tyvisolukerroksessa, josta ne nousevat kerros kerrokselta ylöspäin kohti ihon pintaa. Kuolleet ihon pinnalla olevat keratiinisolut muodostavat marraskeden eli sarveiskerroksen, joka suojaa ihoa kuivumiselta ja on ulkonäöltään läpinäkyvä ja jolta kuolleet solut hilseilevät pois. Tyvisolukerroksessa sijaitsevat myös melanosyytit eli pigmenttisolut, jotka tuottavat ihon väriin vaikuttavaa melaniinia. (Igarashi ym. 2007, 20–21; Arda, Göksügür & Tüzün. 2014, 3–4.)

Verinahka eli dermis on huomattavasti orvaskettä paksumpi, noin 1–4 mm. Se koostuu pääasiassa kollageeni- ja elastaanikuiduista. Verinahalla on kaksi alatasoa: nystykerros sekä verkkokerros. Nystykerroksessa on suuri määrä hermoja, hiussuonia, vettä ja soluja. Nystykerroksen verisuonten takia verinahassa esiintyy myös punaista pigmenttiä, eli hemoglobiinia. Verkkokerroksessa puolestaan on tiheämpi ja paksumpi verkosto kuin nystykerroksessa, jossa kollageenikuidut muodostavat tiheitä kimppuja, eikä siinä ole hiussuonia. (Igarashi ym 2007, 21.)

Ihonalaiskerrosta ei Igarashin ym. (2007, 22) mukaan kategorisoida ihon kerrokseksi, vaikka se onkin seuraava kerros alaspäin verinahasta. Ihonalaiskerros koostuu pääasiassa rasvakudoksesta ja sidekudoksesta, joiden funktio on suojata verisuonia ja hermopäätteitä sekä toimia iskunvaimentimena.

4.1.2 Ihohuokokset ja muut pinnan muodot

Ihon sisäisten kerrosten lisäksi myös ihon pinnalla esiintyy paljon erilaisia muotoja, jotka vaikuttavat merkittävästi ihon ulkonäköön. Igarashi ym. (2007, 27) luettelevat viisi tyypillisintä paljaalle silmälle erottuvaa ihotyyppiä: rypyt, huokokset, pisamat, läikät ja luomet. Näistä rypyt ja huokokset ovat kolmiulotteisia rakenteita, kun taas pisamat ja läikät ovat enemmän tai vähemmän kaksiulotteisia vä-

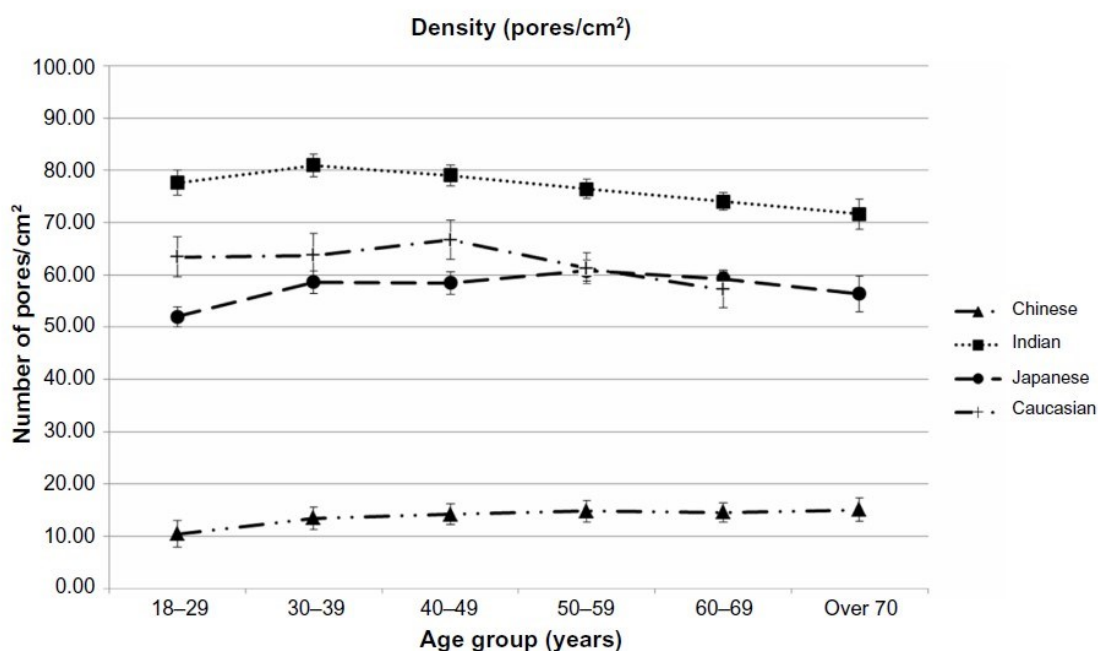
rivariaatioita iholla. Gallagher puolestaan (i.a.a., 14:00–37:30) erittelee laajemmin kaksitoista yleisintä pientä pinnan muotoa, joita ihoa teksturoidessa kannattaa huomioida:

- arvet
- luomet
- huokoset
- rypyt
- finnit
- aknen aiheuttamat arvet
- milia eli luufinit
- keratosis pilaris eli sarveistapit
- Voronoi-mallin mukaisesti syntyneet rypyt
- visuaalinen kohina tuotettuna erilaisilla malleilla, esim. Fractal Brownian Motion
- mustapäät
- verisuonet.

Monien näiden muotojen esiintyminen riippuu paljon ihmisen iästä, ja esimerkiksi rypyjen muodot, suunnat ja niiden muodostamat kuviot vaihtelevat riippuen sijainnista kehossa. Tämän takia on teksturoidessa aina hyvä referoida valokuvia ja lähdemateriaalia. Näiden lisäksi saattaa hahmolla olla konseptista riippuen erilaisia ihosairauksia, jotka muuttavat pintaa eri tavoin. (Gallagher i.a.a; Igarashi ym. 2007, 30–32.)

Ihohuokoset ovat arkikielessä vakiintuneet tarkoittamaan kaikkia kasvoissa esiintyviä pieniä koloja. Huokonen sanana tarkoittaa mitä tahansa pientä aukkoa, jonka tehtävänä on päästää läpi kaasua tai nestettä, joko kudoksesta ulos tai siihen sisään. Ihmisen ihossa tällaisia aukkoja ovat vain pienet tali- ja hikirauhasten aukot. Hikirauhasten huokosia esiintyy melko tasaisesti kasvojen iholla päänahkaa lukuun ottamatta, ja ne vaihtelevat kooltaan 40–80 ja 5–10 mikrometrin välillä. Näin pienet etäisyydet eivät erotu paljaalle silmälle; 250–500 mikrometrin kokoiset paljaalle silmälle erottuvat kolot eivät siis ole varsinaisesti

huokosia, mutta ne itsessään sisältävät silmälle näkymättömiä hiki- ja talirauhasten huokosia. Koska varsinaiset huokokset eivät erotu ilman mikroskooppia, on kuitenkin käytännöllistä jatkaa näiden suurempien kolojen nimittämistä ihohuokosiksi. Ihohuokosten määrä ja koko vaihtelee hieman ihmisen iän mukaan, mutta huomattavan suuria eroavaisuuksia huokosten koossa ja määrässä voidaan havaita eri etnisyyksien välillä, kuten käy ilmi kuvasta 6. (Flament, Francois, Qiu, Ye, Ha-naya, Batisse, Cointereau-Chardon, Seixas, Dal Belo & Bazin 2015, 85–90.)



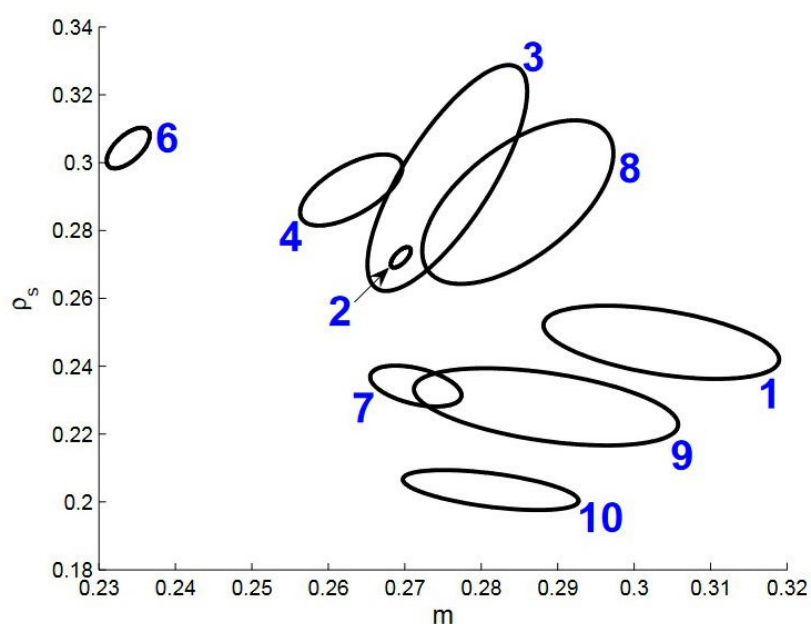
Kuva 6. Ihohuokosten tiheyden vaihtelu poskissa riippuen iästä ja etnisyydestä. Huomattavan suuri ero on havaittavissa kiinalaisten ihossa verrattuna tutkimuksen kolmeen muuhun etniseen ryhmään. Määrän lisäksi myös huokosten koossa ja niiden peittämässä pinta-alassa on suuria vaihteluita etnisyyksien välillä. (Flament ym. 2015, 89.)

4.1.3 Ihon paikalliset kiiltävyysvaihtelut

Ihon kiiltävyyden vaihtelut syntyvät pääasiassa kahdesta elementistä: öljystä ihon pinnalla sekä pinnan mikrotason karkeudesta. Öljyn määrä ja pinnan karkeus vaihtelevat paikallisesti ja synnyttävät selkeästi havaittavia alueita, jotka

ovat muuta pintaa kiiltävämpiä tai himmeämpiä. Esimerkiksi nenän iho on siileämpää kuin muualla kasvoissa ja sen pintaan kertyy huomattavasti enemmän öljyä, minkä vuoksi nenä näyttää yleensä hyvin kiiltävältä verrattuna muuhun ihoon. (Weyrich, Matusik, Pfister, Bickel, Donner, Tu, McAndless, Lee, Ngan, Jensen & Gross 2006, 9–10.)

Kuvassa 7 Weyrich ym. (2006, 9) esittelevät mittauksiin perustuvan kuvaajan kasvojen eri alueiden valon heijastavuudesta. Kuvaajan ovaalien alueiden kaltevuuden perusteella erottuu kaksi selkeästi erilaista ryhmää, joista kaltevammat ovaalit ovat kiiltävämmät alueet. Muita alueita kiiltävämpiä ovat nenä, silmäluomet, kulmakarvojen alue ja otsa. Suurempi arvojen vaihtelu esimerkiksi leuassa ja poskissa selittyy osin karvoituksella, sillä miehillä parta saa ihon leuassa näyttämään karkeammalta. Arvot eivät ole suoraan käytettävissä 3D-ohjelman sävyttimessä, mutta antavat suuntaa eri alueiden kiiltävyysvaihteluista suhteessa toisiinsa.



Kuva 7. Kuvaaja, jossa on esitetty mittaustulokset kasvojen eri alueiden heijastavuudesta. Vaaka-akseli kuvaa pinnan karkeutta, pystyakseli spekuularisen heijastuksen määrää. (Weyrich ym. 2006, 9.)

4.1.4 Karvoitus ihossa

Ihon ulkonäköön vaikuttaa myös karvoitus. Karvatupet ovat karvojen juuria ympäröiviä osia ihosta, jotka sijaitsevat orvaskedessä (epidermis), tunkeutuvat syvälle verinahkaan (dermis) ja joista karvat kasvavat. Karvatyyppejä on erilaisia, mutta ihon ulkonäöstä puhuttaessa oleellisia ovat velluskarvat. Velluskarvat ovat lyhyitä, pehmeitä ja kalpeita karvoja, jotka peittävät suurinta osaa esimerkiksi kasvoista, ja ne ovat hädin tuskin nähtävissä paljaalla silmällä. (Arda ym. 2014, 10). Vaikka velluskarvat ovat itsessään hädin tuskin havaittavissa, vaikuttavat ne makroskaalassa valon taittumiseen ikään kuin fresnel-efektin tavoin ja tämän takia ovat oleellisia myös 3D-artistille (Gallagher i.a.d).

4.2 Ihon väritys: kromoforit ja absorptio

Ihon väritys muodostuu pääasiassa kahdesta kromoforista eli väriä antavasta molekyylistä: hemoglobiinista ja melaniinista. Näiden lisäksi väritykseen vaikuttaa myös valon pinnanalainen hajonta sekä kerrostenvälinen absorptio, joka johtuu esimerkiksi verisuonista ja karvoituksesta. Melaniinin ja hemoglobiinin lisäksi verinahassa esiintyy myös kaksi muuta verenkierron kautta leviävää kromoforia: bilirubiini ja beetakaroteeni, ja ne osaltaan antavat iholle kellertävää tai oliivinvruskeaa sävyä. Beetakaroteenia voi esiintyä myös orvaskedessä sekä marraskedessä eli sarveiskerroksessa. (Krishnaswamy & Baranoski 2004, 333.) Bilirubiinin ja beetakaroteenin vaikutus ihon väritykseen on kuitenkin niin pieni ja tapauskohtainen, että niiden tarkempi käsittely on jätetty tämän opinnäytetyön aiheajauksen ulkopuolelle.

4.2.1 Hemoglobiini

Hemoglobiini on punainen kromofori, jota esiintyy veren punasoluissa eli erytrosyyteissä. Hemoglobiinin tehtävä on sitoa happea ja kuljettaa sitä verisuonia ja kapillaareja pitkin kaikkialle kehoon. Happea sisältävää hemoglobiinia kutsutaan hapettuneeksi hemoglobiiniksi. Hemoglobiini, jossa ei ole happea, on puoles-

taan hapettumatonta. Yleisesti suonessa olevasta hemoglobiinista yli 47 prosenttia on hapettunutta. Hapettunut hemoglobiini on väriltään kirkkaamman punaista kuin hapettumaton. (Igarashi ym. 2007, 19.)

Hemoglobiinin määrä ihossa vaihtelee paikallisesti, riippuen esimerkiksi ihmisen tunnetilasta, alkoholin määrästä veressä tai liikunnan harjoittamisesta. Myös paine voi tilapäisesti heikentää verenkiertoa ja näin vähentää hemoglobiinin määrää, kuten kämmenessä sormien puristuessa nyrkkiin. (Jimenez, Scully, Barbosa, Donner, Alvarez, Vieira, Matts, Orvalho, Gutierrez & Weyrich 2010; Donner, Weyrich, d'Eon, Ramamoorthi & Rusinkiewicz 2009, 8.)

4.2.2 Melaniini

Melaniini on orvaskeden solurakenteessa ja esimerkiksi karvoissa esiintyvä kromofori. Melaniini syntyy melanosyyteiksi kutsutuissa orvaskeden soluissa, joista se nousee ylöspäin kohti ihon pintaa denaturoituessaan muuttuen tämän prosessin aikana tummasta valkoiseksi. Melaniini jaotellaan kahteen tyyppiin: eumelaniiniin ja feomelaniiniin. Eumelaniini on tumman ruskeaa tai mustaa, ja sitä esiintyy yleensä tummissa hiuksissa ja silmissä. Feomelaniini on keltaista tai punaruskeaa, ja sitä puolestaan esiintyy paljon esimerkiksi punaisissa hiuksissa. Yleensä ihossa esiintyy kumpaakin melaniinia, mutta eri sekoitussuhteissa riippuen etnisyydestä. Melaniinin funktio on suojata ihoa ultraviolettilta, ja sen tuotannon määrä melanosyyteissä kasvaa ihon altistuessa auringon valolle aiheuttaen ruskettumista. (Igarashi ym. 2007, 18–19.)

Hemoglobiinin tavoin myös melaniinin määrä ihossa vaihtelee paikallisesti. Kämmenten sisäpuolen ja jalkapohjien paksussa ihossa melaniinia ei esiinny etnisyydestä riippumatta, ja kasvoissa myös huulten ihossa sitä esiintyy huomattavasti vähemmän. Tämän vuoksi huulten läpi näkyy voimakkaammin verinahan hemoglobiini saaden huulet näyttämään muuta ihoa punaisemmilta. Koska melaniinin määrä kasvaa riippuen altistumisesta auringon valolle, on paljon ulkona aikaa viettävillä ihmisillä esimerkiksi kasvoissa silmäkulmien alapuoli yleisesti

hieman otsaa vaaleampi, sillä auringonvaloa osuu otsaan paljon enemmän kuin silmäkulmien alle. (Gallagher i.a.c.)

4.2.3 Kerrostenvälinen absorptio

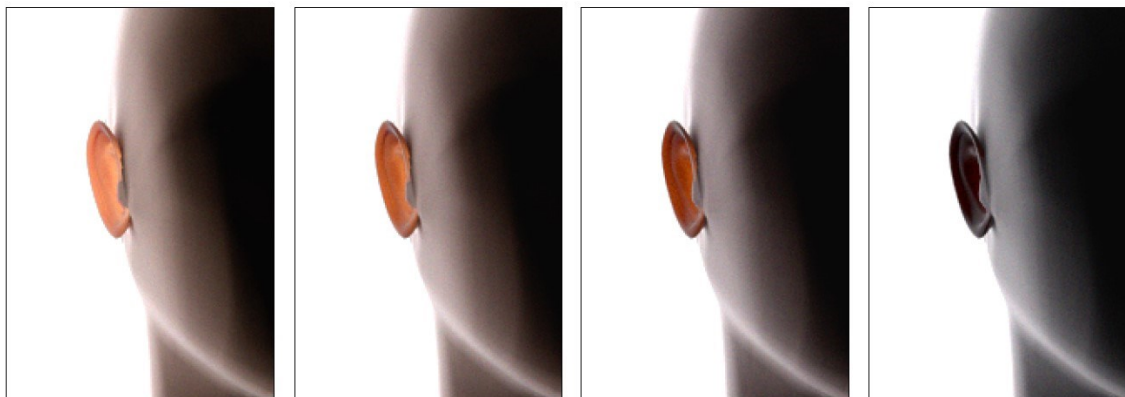
Osan ihon värityksestä muodostaa kerrostenvälinen absorptio. Verinahassa olevat verisuonet sekä orvaskedessä sijaitsevat ihokarvojen juuret absorboivat sisään tulevasta valosta punaiset taajuudet. Tämän vuoksi verisuonet ja esimerkiksi sängeksi ajeltu karvoitus näyttävät ihon pinnassa sinivihreiltä. (Donner ym. 2009; Gallagher i.a.c.)

Tatuoinnit ovat myös yksi esimerkki kerrostenvälisestä absorptiosta: parannuttuaan tatuoinnit alkavat näyttää sinertäviltä verrattuna musteen alkuperäiseen sävyyn. Koska tatuointien muste pistetään neulalla orvaskeden lävitse verinahan pintaan, on teksturiartistin myös hyvä pitää mielessä, että muste sijaitsee silloin hemoglobiinikerroksen päällä, mutta melaniinikerroksen alla. Tämän vuoksi absorption lisäksi myös melaniinin määrä vaikuttaa siihen miltä tatuointin muste näyttää ihon pinnalta katsottuna. Tätä luonnollista tasorakennetta on teksturointiartistin helppo imitoida hyödyntämällä teksturointiohjelman, kuten esimerkiksi Substance 3D Painterin, tasoja. (Donner ym. 2009, 8; Gallagher i.a.c 0:30-0:36.)

4.2.4 Valon pinnanalainen hajonta

Kromoforien lisäksi ihon väritykseen vaikuttaa myös valon pinnanalainen hajonta, englanniksi subsurface scattering eli yleisesti lyhennettynä SSS. Kun valo kulkee ei-homogeenisen välittäjäaineen tai läpinäkyvän materiaalin läpi, voi se joko absorboitua tai hajota. Valon absorboituessa sen voimakkuus heikkenee ja valo muuttuu johonkin toiseen energian muotoon, yleensä lämmöksi. Valon väri muuttuu riippuen absorboiduista aaltopituuksista, mutta sen suunta pysyy samana. Valon hajotessa säteiden suunta taas muuttuu satunnaisesti, ja muutoksen määrä riippuu materiaalista. Hajonta muuttaa valon suuntaa, mutta ei sen voimakkuutta. Hyvä esimerkki tästä ilmiöstä on korva, kuten nähdään kuvasta

8. Korva on ohut, joten absorptiota ei tapahdu paljon, jolloin korvan takaa säteilevän valon hajonta näkyy selkeästi etupuolella punertavana hohtona. (McDermott 2018, 19–20.)



Kuva 8. Pinnanalainen hajonta esitettynä 3D-hahmolla. Hahmon takaa tuleva valo hajoaa pinnan alla ja näkyy punertavana hohtena korvassa. Melaniinin määrä vaikuttaa valon absorboitumiseen ja pinnanalaisen hajonnan määrään. (Krishnaswamy & Baranoski 2004, 339.)

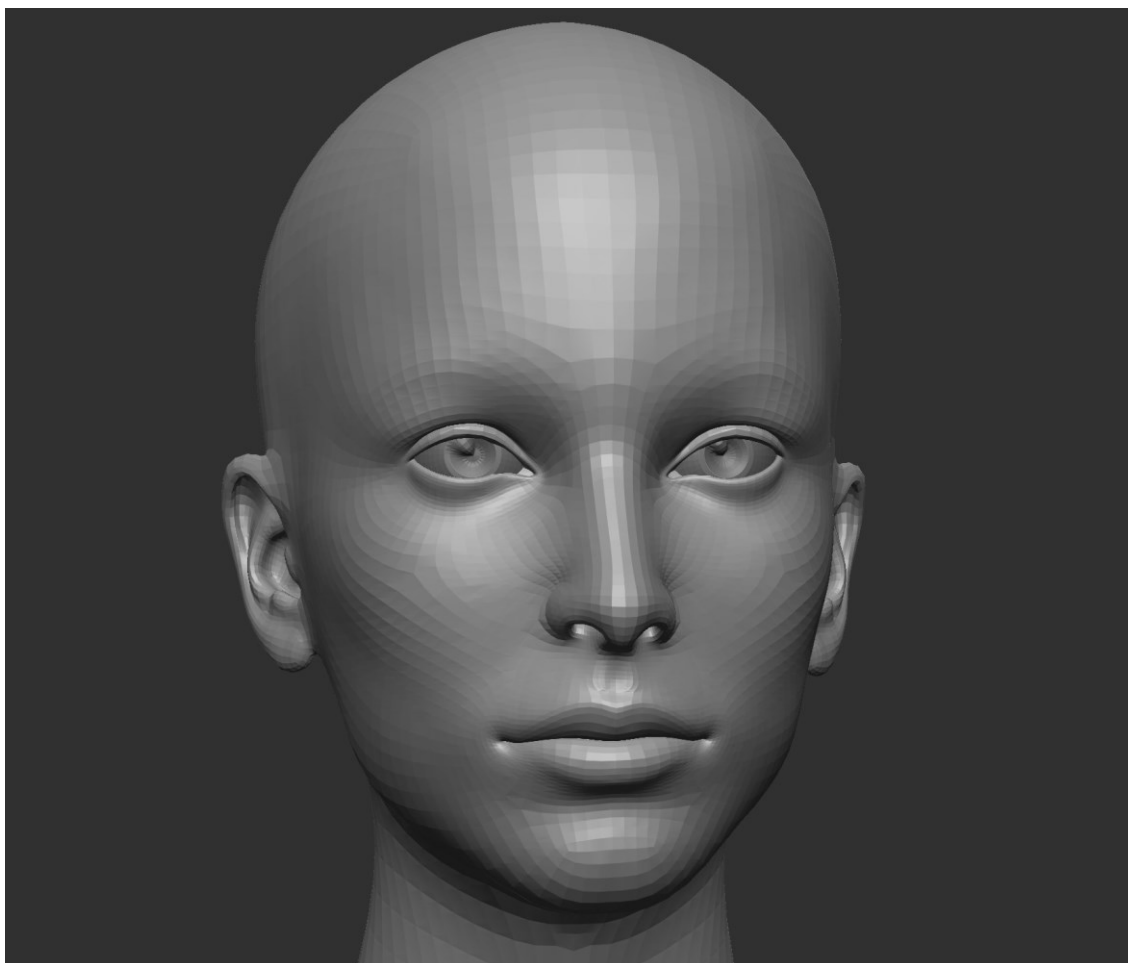
Osa iholle tulevasta valosta heijastuu pois jo pinnalla marraskeden muodoista, osa absorboituu kromoforeihin ja eri ihokerroksiin. Loput valosta kulkeutuu kudoksiin, joissa se heijastuu ja taittuu soluseinämissä sekä ihon kerroksissa ja lopulta kulkee ulos ihosta eri kohdasta kuin se tuli sisään. Marraskedessä ja orvaskedessä valon hajonnan suunta on eteenpäin johtuen kerrosten fysiologiasta. Verinahassa sen sijaan valo hajoaa moneen kertaan erilaisten hajontamallien mukaisesti, ennen kuin se joko absorboituu tai kulkeutuu seuraavalle kerrokselle. Tämän vuoksi verinahassa valon alueellisesta jakautumisesta tulee hyvin hajanaista. (Krishnaswamy & Baranoski 2004, 333.)

5 Projektiosuus: reaaliaikaisesti renderöidyn pään teksturointi

Tässä luvussa käsittelen tämän opinnäytetyön projektiosuuden toteutusta. Tavoitteenani oli teksturoida ihmishahmon pää hyödyntäen kaikkea oppimaani teoriaosuuden tutkimusvaiheen jälkeen. Halusin luoda pelikäyttöön soveltuvan ihosävyttimen, joka nojaa mahdollisimman paljon oikean ihon fysiologiaan,

mutta pelimoottorin rajoitteet huomioon ottaen. Tavoitteenani oli myös tehdä ihon värityksestä dynaaminen, sillä oikean ihon väritys ei ole staattista: verenkierto lisääntyy ja vähenee eri tunnetilojen mukaan muuttaen hemoglobiinin määrää eri alueilla. Myös melaniinin määrä vaihtelee riippuen auringonvalolle altistumisesta, mutta sen muutokset tapahtuvat paljon pidemmällä aikavälillä.

Koska projektin fokus oli teksturoinnissa, en veistänyt päätä alusta asti itse, vaan käytin pohjana Zbrushin mukana tulevaa DemoHeadFemale-mallia, jossa on riittävän hyvä topologia pinnan jakamista varten. Kuvassa 9 näkyvä DemoHeadFemale ei sellaisenaan kelpaisi pelikäyttöön, jota tällä projektilla yritin muokata, joten muokkasin hieman mallin topologiaa, jotta se koostuisi siististä neliöverkosta ja tärkeimmät polygonisilmukat kiertyvät tasaisesti deformaatiota eli animaatiossa tapahtuvaa muotojen muuttumista varten. Rikoin myös aavistuksen kasvojen symmetriaa ja lopuksi tein mallille UV-kartoituksen Mayassa teksturointia varten.



Kuva 9. Pohjana projektiosuudelle oli Zbrushin mukana tuleva DemoHead-Female-pohjamalli. Siinä oli riittävän paljon yksityiskohtia, jotta polygonverkon muutamaaan kertaan jakamalla lopputulos oli uskottava teksturointia varten. (Kontio 2024.)

Tämän luvun kuvituksissa on eri konseptien havainnollistamiseksi mukana myös vaiheita aikaisemmasta hahmoprojektistani. Niissä esiin nostetut aiheet eivät olleet osa tämän projektin tekemistä, mutta ovat silti tärkeitä ymmärtää perusteina tämän projektin työskentelytapojen valitsemiselle.

5.1 Tertiäriset yksityiskohdat: häilyvä raja veistosta teksturointiin

Veistämisen yhteydessä puhutaan usein kolmesta eri yksityiskohtien tasosta: primääriset, sekundääriset ja tertiäriset muodot. Primäärillä tarkoitetaan kappaleen suurimpia massoja, joista kappaleen perusmuodot koostuvat. Sekundääriset muodot ovat pienempiä ja vaikuttavat kappaleen siluettiin, kuten lihaskisto ja lihasmassan taitokset tai laskostumiset. Tertiäriset muodot puolestaan ovat kaikkein pienimpiä yksityiskohtia, kuten esimerkiksi ryppyjä, ihohuokosia tai suomuja. (Spencer 2011, 119.)

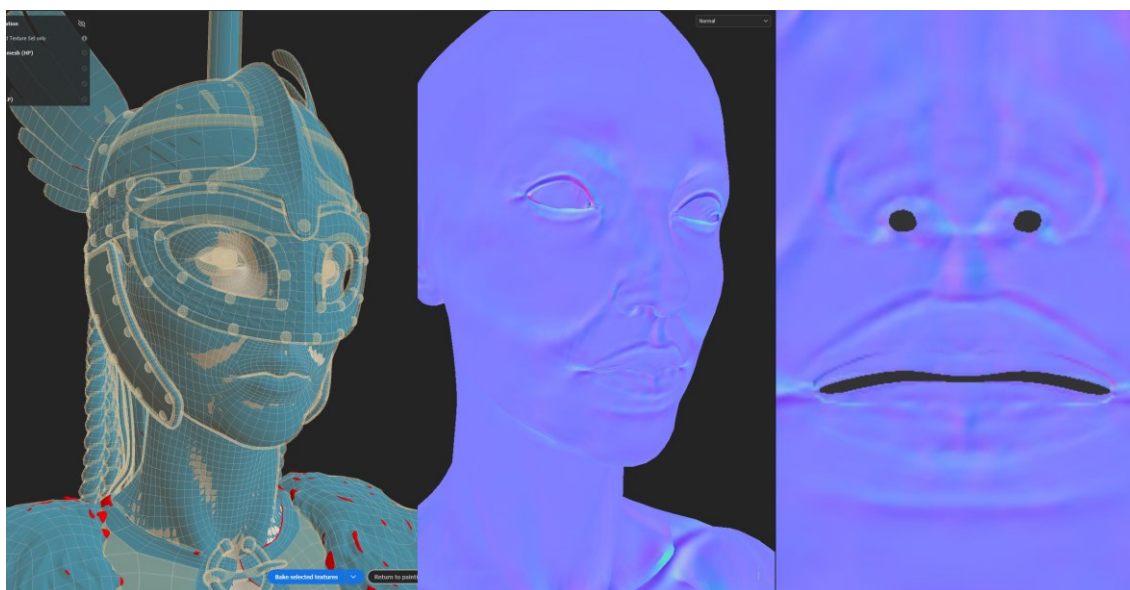
Tertiäristen yksityiskohtien luomiselle löytyy useita eri ratkaisuja, joilla kaikilla on omia vahvuuksiaan ja heikkouksiaan. Yksityiskohtia voi luoda kokonaan veisto-ohjelmassa, kokonaan teksturointiohjelmassa tai eri tavoin hyödyntäen molempia. Tämän takia raja veistämisen ja teksturoinnin välillä käy hieman häilyväksi, ja sivuan myös hieman veistämistä. Projektia työstäessäni harkitsin kaikkia seuraavaksi käsiteltäviä tapoja, kunnes lopulta päädyin veistämään tertiäriset yksityiskohdat hyödyntäen Zbrushin layer-ominaisuutta.

5.1.1 Leipominen high polystä low polyyn

Suoraviivaisin tapa lienee perinteinen high poly -mallista leipominen, jossa malli veistetään valmiiksi pienimpiäkin yksityiskohtia myöten ja tämän jälkeen haluttu teksturointiohjelmassa yksityiskohdat leivotaan low poly -malliin normaalkartoiksi. Koska veistoprosessi pysyy hyvin suoraviivaisena eikä ole välttämä-

töntä esimerkiksi välissä viedä mallia toiseen 3D-ohjelmaan UV-kartoitusta varten ja sen jälkeen tuoda sitä takaisin veisto-ohjelmaan, on tämä työnkulun puolesta yksinkertainen tapa tuottaa normaalikartat.

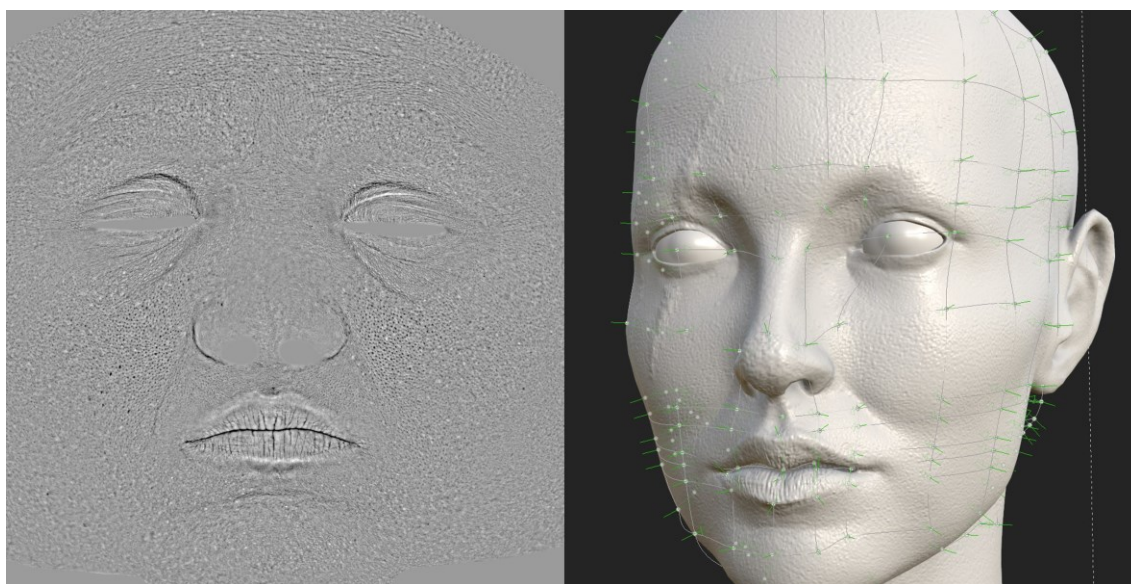
Heikkoutena tässä tavassa ovat erilaiset ongelmat, joita leipomisprosessissa syntyy. Esimerkiksi liian lähellä toisiaan olevat pinnat voivat ikään kuin vuotaa toisiinsa normaalikartoissa. Tällaisia kohtia, joissa pinnat ovat lähekkäin tai jopa lävistävät toisensa, ovat hahmoissa yleisesti esimerkiksi huulet, sormet ja silmäluomet. Lämpimenoja voi yrittää ehkäistä säätämällä leipomisvaiheessa mallin ympärillä olevan häkin (engl. *cage*) kokoa. Häkki on se alue mallin ympärillä, johon asti pinnasta lähtevät säteet yltyvät, ja säteiden osuessa high poly -malliin projisoidaan sen pinnan normaalit low poly -malliin. Esimerkiksi Substance 3D Painterissa käyttäjä näkee visualisoituna häkin koon, ja tämä auttaa näkemään mahdolliset pintojen läpimeno- ja jo ennen leipomista, mutta on erittäin hankalaa täysin välttyä läpimenoilta ihmishahmojen kartoja leipoessa, kuten näkyy kuvasta 10. Näiden läpimenojen korjaaminen vaatii lopulta käsityötä kuvanmuokausohjelmassa. Vaikka seuraavaksi käsiteltävissä tavoissa myös leivotaan high poly -mallin normaalit low poly -malliin, on normaalikarttojen läpimenojen korjaaminen helpompaa, kun mukana ei ole pinnan pienimpiä yksityiskohtia, eikä niiden säilyttämisestä tarvitse huolehtia korjausvaiheessa.



Kuva 10. Pintojen vuotaminen leivottaessa. Vasemmalla on Substance 3D Painterin leipomisenäkymä. Turkoosi malli on hahmon low poly -malli, keltainen läpi-kuultava malli sen ympärillä on leipomiseen käytettävä häkki. Keskimmaisessä kuvassa hahmoon on leivottu normaalikartta high poly -mallista, ja oikealla normaalikartassa erottuu huulissa terävä raja, jossa huulet ovat vuotaneet toisiinsa. (Kontio 2024.)

5.1.2 Projisoiminen valokuvista tai skannatusta datasta

Veistettyjen muotojen leipomista vastaavaan lopputulokseen voi päästä myös ilman veistämistä projisoimalla yksityiskohdat korkeuskartoista, kuten kuvassa 11 näkyvälle mallille on tehty. Koska kartat ovat kaksiulotteisia mustavalkokuvia, voi niitä tuottaa itse maalaamalla, eri kuvia muokkaamalla tai ihon tapauksessa esimerkiksi käyttämällä riittävän korkearesoluutioisista valokuvista muokattuja korkeuskarttoja. Tämä keino parhaimmillaan nopeuttaa pinnan muotojen tuottamista huomattavasti, jos käytössä on valmiita korkeuskarttoja.



Kuva 11. Pinnan muotojen projisointi korkeuskartasta malliin. Vasemmalla on valokuvasta tuotettu korkeuskartta, jonka kontrastia on nostettu selkeyden vuoksi, ja oikealla kyseinen kartta on projisoitu hahmon kasvoihin. Kuva aikaisemmasta hahmoprojektista. (Kontio 2024.)

Kääntöpuolena on kuitenkin se, että on työlästä alkaa muokata projisoituja yksityiskohtia teksturointivaiheessa, ja riippuen hahmon tärkeydestä käyttötarkoituk-

sessaan saattaa se olla välttämätöntä. Jos mallin tekseliresoluutio ei ole riittävän tiheä, voi ongelmaksi tulla myös teksturointiohjelman työskentelynäkymän resoluutio. Esimerkiksi Substance 3D Painter ei tätä kirjoittaessa näytä työskentelynäkymässään suurempia kuin 4K-resoluutioisia tekstuureja, jolloin esimerkiksi 8K-resoluution tekstuureja tuottaessa todellinen lopputulos jää arvailuksi ennen kuin ne tarkistetaan toisessa ohjelmassa, kuten Marmoset Toolbagissä, tai pelimoottorissa, kuten esimerkiksi Unreal Enginessä.

5.1.3 Veistettyjen yksityiskohtien tuonti korkeuskarttoina

Kolmas tapa, ja se johon päädyin tässä projektissa, on yksityiskohtien veisto eri tasoille (engl. *layer*) Zbrushissa ja sieltä jokaisen tason datan ulosvienti siirtokarttoina (engl. *displacement map*, mustavalkotekstuuri, jota voidaan käyttää pinnan verteksien nostamiseen tai laskemiseen). Esimerkiksi poskien ihoHUUKOset voivat kuvan tavoin olla veistettynä yhdellä tasolla ja nenässä olevat mustapäät toisella. Eri muotojen kontrastia voi vielä veistovaiheessa säätää taso kerrallaan, mutta koska ne viedään myös ulos Zbrushista ja tuodaan teksturointiohjelmaan yksittäisinä koskeuskarttoina, pysyy artistilla säätövara pinnanmuotojen voimakkuuteen teksturointiprosessin loppuun asti.



Kuva 12. Pinnan muodot on tuotettu omille tasoilleen, joita voi tarvittaessa säätää yksi kerrallaan. Kuvassa on esimerkkinä näkyvissä vain poskien huokosten taso. (Kontio 2024.)

Miinuspuolena tässä lähestymistavassa on se, että 3D-mallille täytyy tehdä UV-kartoitus kesken veistoprosessin, jotta pintaan luodut tasot voi viedä kuvatie-dostoina ulos. Tämän takia myöskään suurempien muutosten tekeminen malliin ei ole enää mahdollista, sillä ne vääristävät UV-kartoitusta, ja erityisen ongel-mallisia ovat erilaiset veistosiveltimet jotka ”nivistävät” pintaa, kuten esimerkiksi Dam Standard -sivellin Zbrushissa.

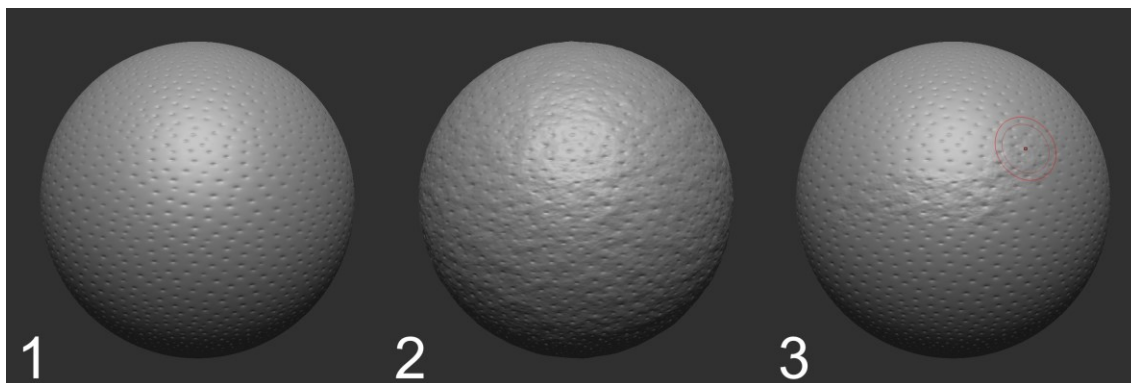
5.1.4 Käytännön prosessi tässä projektissa

Aloitin veistoprosessin etsimällä ensin riittävän korkearesoluutioisia valokuvia kasvojen ihosta, joista katsoa mallia eri pinnan muodoille. Tämän jälkeen seura-sin Gallagherin (i.a.a.) esimerkkiä ja tein mustavalkoisen tekstuurin, jossa on mustalla taustalla valkoisia täpliä. Vein tämän tekstuurin Zbrushin noise-edito-riin, jolla voi tuottaa erilaisin keinoin visuaalista kohinaa mallin pintaan. Varmis-tamalla ensin, että täplikäs mustavalkotekstuuri toistuu oikein (engl. *tiling*, neliön muotoisen tekstuurin toistuvuus sivu- ja pystysuunnassa laatoittamisen tapaan), pystyin käyttämään sitä korkeuskarttana noise-editorille. Lopputulos näkyy ku-vassa 13. Tällä tavoin oli nopeaa tuottaa erilaisia huokosia tai kääntämällä kor-keuskartan suunnan erilaisia pieniä kohoumia, kuten mustapäitä ja luomia ihon pintaan.



Kuva 13. Zbrushin noise-editorilla saa nopeasti täytettyä koko mallin pinnan visuaalisella kohinalla tai kuvioilla. Vasemmassa alareunassa näkyvällä mustavalkokotekstuurilla on tuotettu koko mallin peittävä, appelsiinin kuorta muistuttava iho- huokoskuviointi. (Kontio 2024.)

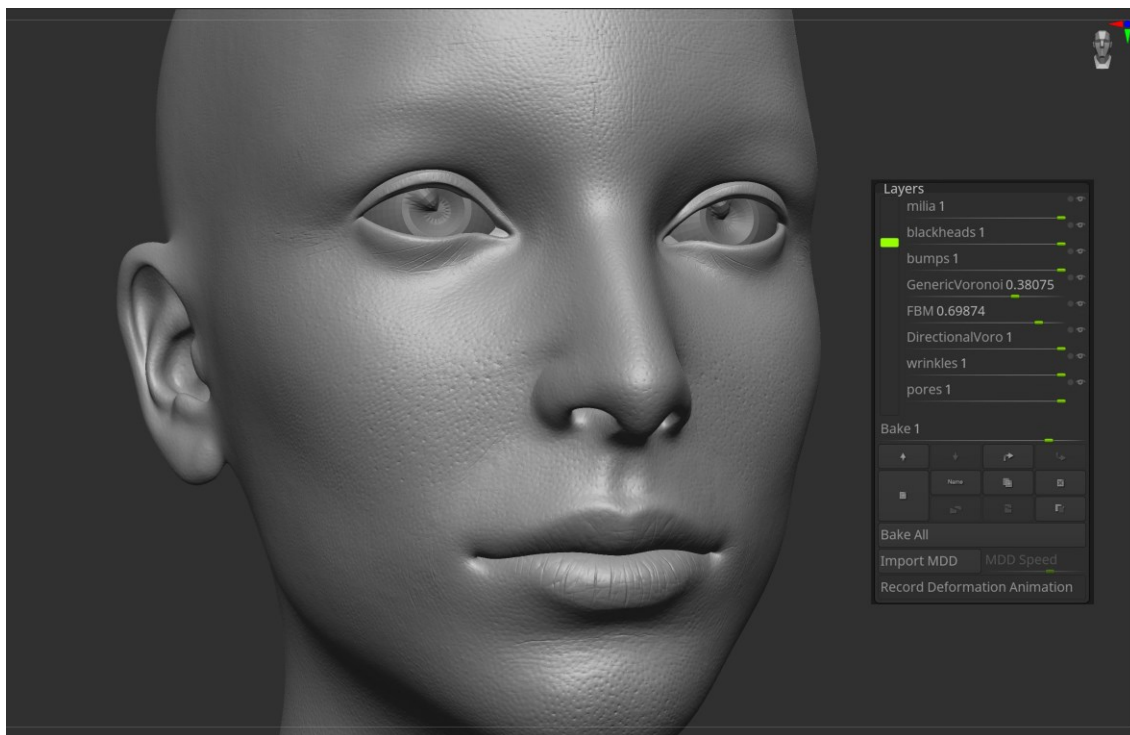
Koska useimmat iholla toistuvat muodot ovat paikallisia eivätkä kata koko pinta- alaa, täytyi niitä rajata vain tietyille alueille. Tämä onnistui hyödyntämällä Zbrushin työkaluja Morph target sekä Morph brush. Morph targetilla voi tallentaa mallin kaikkien verteksen senhetkisen sijainnin avaruudessa. Kun pintaan te- kee muutoksia Morph targetin tallentamisen jälkeen, voi Morph brushilla maalata tehtyjen muutosten kohdalta verteksejä takaisin tallennettuun asentoonsa. Näin voi käsin maalaamalla poistaa esimerkiksi noise-editorilla tuotettua koho- naa haluamiltaan alueilta, kunhan on ennen kohinan tuottamista muistanut tal- lentaa Morph targetin. Jos tavoitteena ei ole peittää kuviolla isompaa pintaa voi Morph targetin myös kääntää nurinpäin työkalun asetuksissa, jolloin Morph brushilla voi sen sijaan maalata Morph targetiin tallentunutta kohinaa tai iho- huokoskuviota näkyviin haluamalleen alueelle. Nämä vaiheet on havainnollis- tettu kuvassa 14.



Kuva 14. Morph brushin hyödyntäminen ihoa työstäessä. Vaiheessa 1 on kappaleen pintaan tuotettu ihohuokoskuviota. Tämä tallennetaan Morph targetiksi, jonka jälkeen vaiheessa 2 tuotetaan huokosten päälle satunnaista kohinaa. Morph targetin asetuksissa vaihdetaan tallennettu geometria Switch-painikkeella, jolloin vaiheessa 3 voidaan Morph brushilla maalata tallennettua kohinaa halutulle alueelle. (Kontio 2024.)

Erilaisia rypyjä oli myös mahdollista tuottaa hyödyntämällä noise-editorin proseduraalisia ominaisuuksia eli työkaluja, joilla tehdyt muutokset eivät ole heti pysyviä ja joita voi vielä dynaamisesti muokata. Voronoi-kohinaa skaalaamalla pystysuunnassa sain nopeasti tuotettua rypyjä huuliin, ja sivusuunnassa skaalaten sai aikaiseksi vaakasuuntaisia rypyjä muun muassa otsaan ja silmäpieliin. Rypylliset alueet täytyi aina tasakohtaisesti maalata Morph Brush -työkalua hyödyntäen vain niille alueille joihin rypyjä oli tarkoitus tulla, muutoin kohina täyttää koko mallin pinnan.

Proseduraalisilla keinoilla pääsi jo hyvin pitkälle veistovaiheessa, mutta lopulta etenkin rypyjä oli pakko veistää käsityönä tavallisilla veistotyökaluilla. Lopputulos näkyy kuvassa 15. Jos tarkoituksena olisi ollut noudattaa tarkasti esimerkiksi pohjana ollutta konseptitaidetta tietystä hahmosta tai tuottaa näköiskuvaa jostakin henkilöstä, olisi käsityötä täytynyt tehdä vielä enemmän.



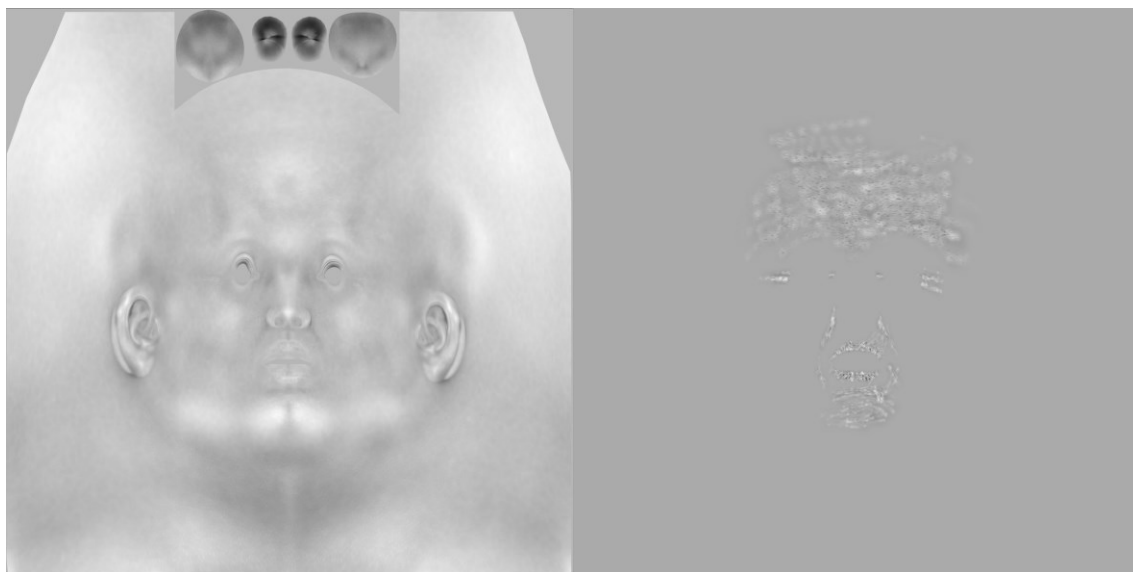
Kuva 15. Tertiääristen yksityiskohtien lopputulos veistovaiheessa, kun kaikki eri tasot ovat päällä. (Kontio 2024.)

FlippedNormals (2023) esittelee videollaan työnkulun, jossa on hyvin samankaltaisia työvaiheita, mutta joka perustuu satunnaisesti tuotetun kohinan sijaan projisoituun dataan. Työnkulussa voi jatkotyöstää teksturointiohjelmassa projisoitua korkeusdataa hyödyntäen veisto-ohjelman tasoja. Malliin projisoitu tekstuuria viedään ulos teksturointiohjelmasta ja tuodaan sisään Zbrushiin. Tekstuuria käytetään Zbrushissa siirtokarttana, ja sitä voi myös käyttää pohjana tarkemmalle käsin veistämiseksi. Tällä tavoin päästään Zbrushin puolella saman kaltaiseen lopputulokseen kuin Zbrushin noise-editoria hyödyntämällä, mutta data perustuu projisoituun valokuvaan.

Veisto-osuuden valmistuttua tarvitaan jokin keino kaiken aikaansaadun datan viemiseksi teksturointiohjelmaan, jotta sitä voidaan lopulta käyttää normaalikarttana pelimoottorissa. Zbrushissa on Tool-valikon alla alavalikko Displacement Map, jota hyödyntämällä voidaan viedä UV-kartoitetun mallin pinnan muodot ulos siirtokarttana. Koska siirtokartta syntyy kokonaisuudessaan valittuna olleen

mallin sen hetkisestä tilasta, täytyy kaikki tasot laittaa yksi kerrallaan päälle ja muut tasot pois päältä, jotta niiden data saadaan vietyä ulos erillisinä karttoina.

Jokaisessa kartassa on kuitenkin vielä mukana myös pohjalla olevat muodot, jotka ovat peräisin mallista ilman tasoja. Jotta pelkästään tasojen itsensä data saadaan eristettyä, täytyy vielä viedä ulos pohjalla olevien muotojen siirtokartta, jossa kaikki tasot on käännetty pois päältä. Gallagherin (i.a.b.) esimerkissä voi valitsemassaan kuvankäsittelyohjelmassa tämän jälkeen eri sekoitustiloja hyödyntämällä eristää jokaisen kerroksen datan, vähentämällä tämän pohjamuotojen kartan jokaisen tason siirtokartasta. Koska siirtokartan oletusarvo on 50-prosenttinen harmaa, täytyy näin syntynyt data vielä lisätä 50-prosenttisen harmaan kerroksen päälle. Lopputuloksena on kuvassa 16 näkyvän kartan kaltaisia mustavalkokarttoja, joissa jokaisessa on vain yhden Zbrushin veistotason data, ja jotka voidaan viedä esimerkiksi Substance 3D Painteriin ja käyttää siellä korkeuskarttoina.



Kuva 16. Vasemmalla on Zbrushista ulos viety siirtokartta ja oikealla siitä Photoshopissa eristetty Voronoi-kohinan tason data, jolla on tuotettu ryppyjä muun muassa huuliin ja otsaan. Kontrastia on nostettu näkyvyyden vuoksi. (Kontio 2024.)

Kun kaikki kartat oli tuotu Substance 3D Painteriin omina tasoinaan, muokkasin vielä niiden voimakkuutta suhteessa toisiinsa teksturointiprosessin aikana, sillä

värien lisääminen auttoi hahmottamaan muotojen voimakkuutta. Lopuksi erittelin vielä tasonäkymässä kaikkein pienimmät yksityiskohdat omaan kansioonsa, ja tekstuureja ulos viedessä kytkin ne ensin pois päältä, jotta saisin vietyä ulos ns. tavallisen normaalikartan. Sitten kytkin ainoastaan pienimmät yksityiskohdat näkyviin ja vein ne ulos erillisenä yksityiskohtanormaalikarttana. Nämä normaalikartat voidaan lisätä toisiinsa renderöintiohjelman sävyttimessä, ja tällä tavoin minulla oli vielä työnkulun loppupuolellakin mahdollisuus hienosäätää pienimpien yksityiskohtien voimakkuutta. Irrottamalla kaikkein pienimmät yksityiskohdat omaksi kartakseen voidaan optimoida tekstuurien käyttöä peleissä, sillä kun kaikki hahmot jakavat samanlaisen UV-kartoituksen voidaan samaa yksityiskohdankarttaa käyttää jokaisessa hahmossa (Gallagher i.a.d; Schmitz 2023, 79).

5.2 Pohjavärikartan teko hyödyntäen kromoforeja ja absorptiota

Substance 3D Painter mahdollistaa monta eri lähestymistapaa tekstuurien rakentamiseen. Eri materiaaleja on mahdollista rakentaa kokonaisuudessaan omille tasoilleen, koska ohjelman lähestymistapa perustuu tasoihin, jotka voivat jokainen sisältää värin lisäksi muutkin sävyttimessä määritellyt ominaisuudet, kuten esimerkiksi metallisuuden, karkeuden ja pinnanalaisen hajonnan. Artistin näkökulmasta voi kuitenkin olla selkeämpää työskennellä yksi ominaisuus – tai kanava – kerrallaan. Tässä projektissa loin tasonäkymään omat kansionsa korkeuskartoille, karkeudelle sekä albedoväriille, jonka alle tein vielä alakansiot pohjaväriille, kromoforeille eli hemoglobiinille ja melaniinille, sekä kerrosten väliselle absorptiolle. Jokaisen kansion alla olevista tasoista on kytketty päälle vain yksi kanava, oli kyseessä sitten väri-, karkeus- tai korkeustaso.

Tavoitteenani oli luoda ihotekstuuri nojaamalla niin paljon todellisiin ihon ominaisuuksiin kuin vain mahdollista, joten lähestyin myös värystä rakentamalla tasot samaan järjestykseen kuin niiden kuvaamat ihon kerrokset todellisuudessa ovat. Aloitin albedon rakentamisen valitsemalla Donnerin ym. (2008) hakutekstuurista (engl. *lookup texture*, hakutekstuuri tai tarkistustekstuuri, kuva josta voi

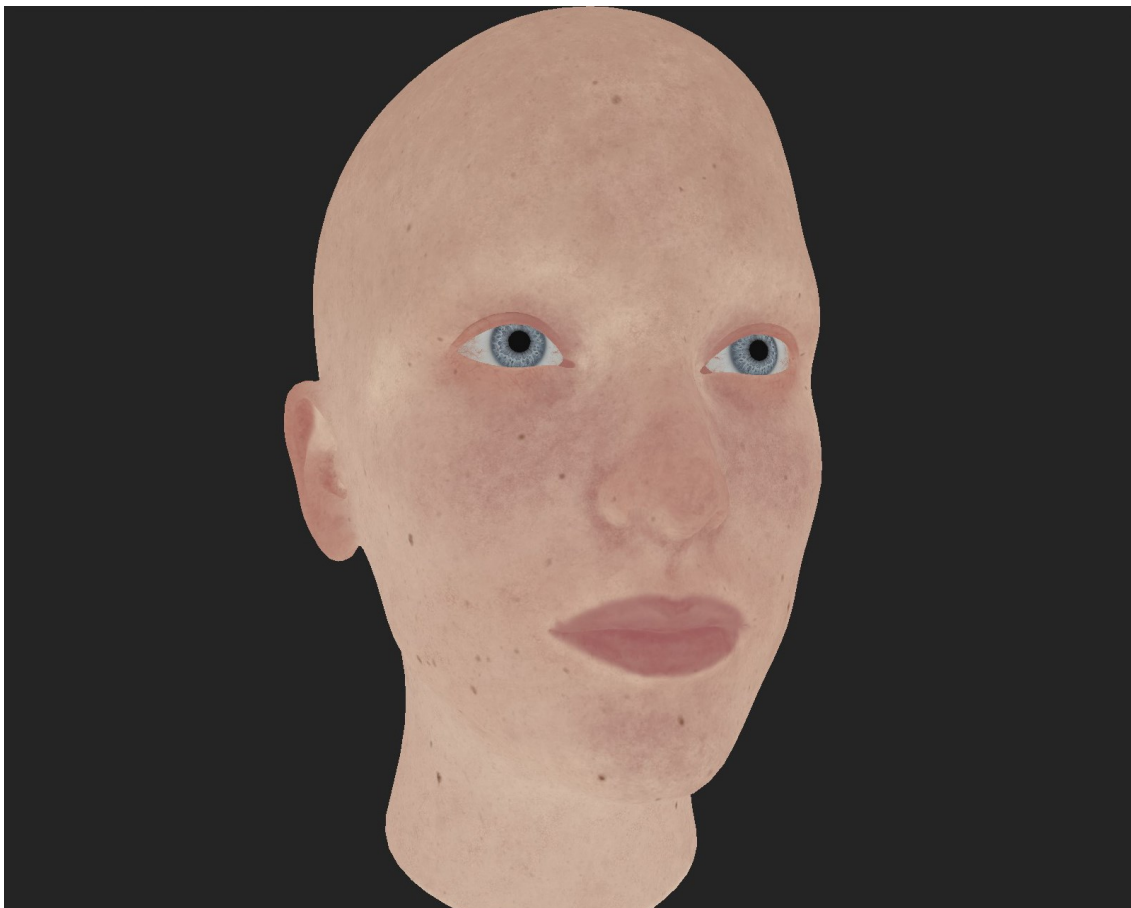
taulukon lailla hakea eri väriarvoja, vrt. elokuva-alalla käytetty *lookup table*) pi-
peltityökalulla väriarvon vasemmasta ylänurkasta, jossa hemoglobiinin ja mela-
niinin määrä on vähäisintä.

Pohjaväriin päälle aloin rakentaa Kuva 17 näkyviä hemoglobiinikerroksia. Käytin
edellä mainittua hakutekstuuria väripaletina valitessani punertavia sävyjä. Re-
ferenssinä käytin Texturing XYZ -sivustolta ostettua studiokuvapakettia, jossa
on kuvattu noin 20-vuotiaan naisen pää monesta eri kulmasta. Paketissa on ku-
vista myös versiot, joissa spekulariheijastukset on poistettu, mikä helpottaa vä-
rien referoimista tekstuureja maalatessa. Hemoglobiinitasojen luominen oli hi-
dasta työtä, jossa jatkuvasti tutkin erilaisia toistuvia kuvioita referenssikuvista ja
yritin toteuttaa niitä aluksi puhtaasti proseduraalisilla työkaluilla, kuten saman-
kaltaisilla kohinoilla, joita Zbrushin noise-editoristakin löytyy. Seikoittamalla
useita erilaisia kohinoita päällekin maskitason sisällä sekä muokkaamalla mas-
kigeneraattorin eri asetuksia sai toistuvuutta rikottua kohtalaisen hyvin. Tällä
pääsi melko pitkälle, mutta tasot täytyi joka tapauksessa viimeistellä käsin maa-
laamalla, jotta konemaista toistuvuutta sai rikottua isommilta pinnoilta sekä
maalattua erityiset yksityiskohdat, joita ei voi luoda proseduraalisesti, kuten
vaikkapa silmän ympärökset. Erilaisten toistuvien kuvioiden lisäksi maalasin joi-
takin alueita selkeästi punaisemmiksi, koska iho on niissä ohuempaa ja hemo-
globiini näkyy enemmän kerrosten läpi, kuten esimerkiksi nenä ja sen ympärys,
silmäluomet, korvat, otsa, posket ja erityisesti huulet, joissa melaniinia ei juuri-
kaan ole peittämässä hemoglobiinia.



Kuva 17. Proseduraalisesti sekä käsin maalaamalla tuotetut hemoglobiinitasot. Kuvassa on Substance 3D Painterin työskentelynäkymästä kytketty näkyviin ainoastaan pohjavärikanava. (Kontio 2024.)

Kun hemoglobiinitasot alkoivat olla suhteellisen valmiita, aloin rakentaa melaniinitasoja niiden päälle. Referenssivalokuvat olivat jälleen suuri apu erilaisten toistuvien melaniinikuvioiden hahmottamisessa, ja niiden avulla tein erilaiset pienet läiskät sekä luomet. Melaniinitasot on esitetty Kuva 18. Gallagher (i.a.c.) mainitsee omassa prosessissaan jotakin hyvin silmiä avaavaa melaniinin suhteen: koska melaniinin määrä riippuu altistumisesta auringonvalolle, voi tätä hyödyntää Substance 3D Painterissa rajaamalla maskigeneraattorilla melaniinitasosta näkymään vain ylöspäin osoittavia pintoja, jotka vastaanottaisivat eniten auringonvaloa. Tällä keinolla sai helposti ja nopeasti aikaiseksi hieman ruskettumista esimerkiksi päällelle, nenään ja poskien yläpuoliskoille, kun taas esimerkiksi iho silmäkulmien, leuan tai alahuulen alta jäi kalpeammaksi.



Kuva 18. Melaniinitasot ilman valaistusta. Koska 3D-malli esittää kalpeaa hahmoa jäävät melaniinitasot luomia ja läikkiä lukuun ottamatta hienovaraisemmiksi, mutta esimerkiksi tummempi päälaki verrattuna kalpeampiin silmäkulmien alapuoliin erottuu kuvasta. (Kontio 2024.)

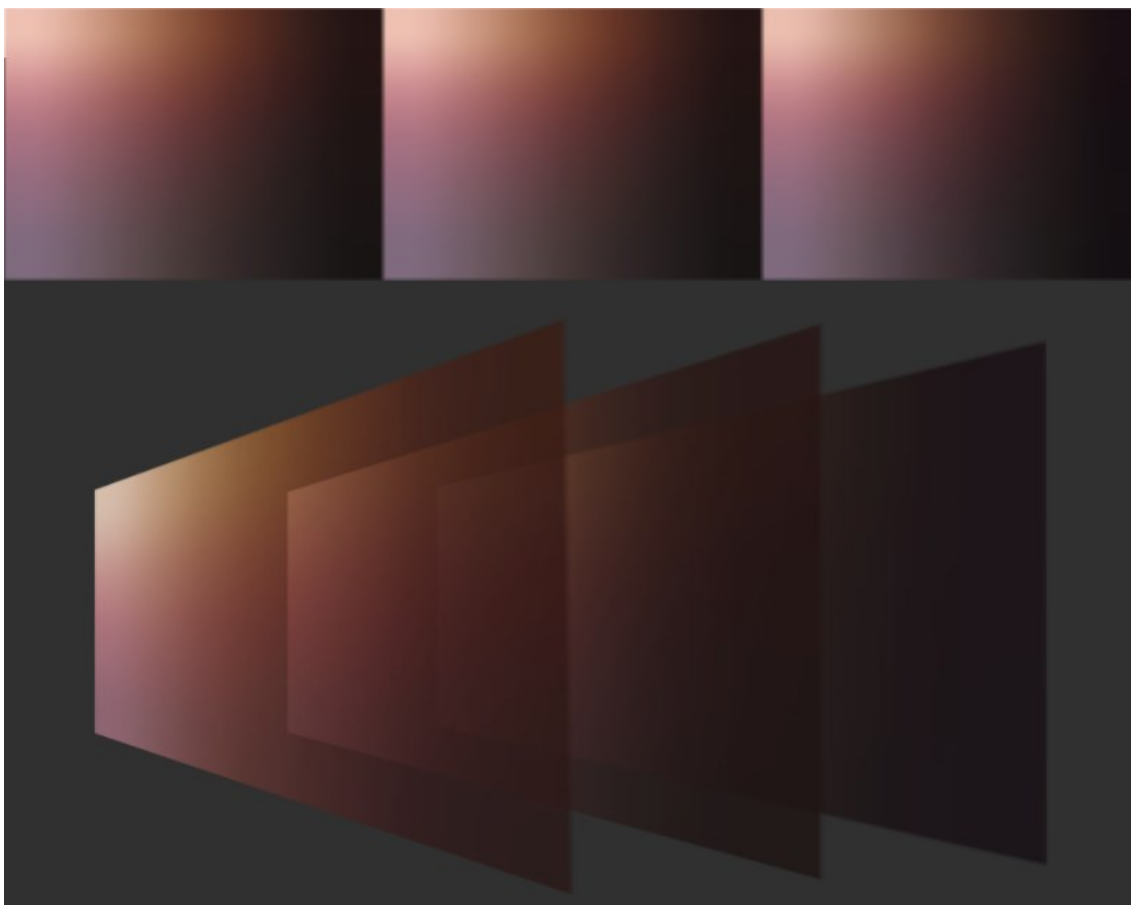
Absorptiotasot tuotin isompien hemoglobiiniukuvioiden tapaan luomalla ensin tason, jonka maskissa oli sekoitettu erilaisia kohinoita päällekkäin, ja tämän maskipinon päällimmäiseksi lisäsin tason, jolla maalasin käsin koko maskipinosta näkyviin ainoastaan halutut alueet. Tein absorptiokerrokset vain hiuspohjalle ja kulmakarvojen kohdalle, koska en halunnut ylikorostaa esimerkiksi verisuonia, jotka hiusjuurten tavoin myös kuultaisivat läpi sinivihertävinä. Lopputulos Kuva 19 on hyvin hienovarainen ja valaistussa näkymässä se erottuu juuri ja juuri, mutta realistisen lopputuloksen kannalta nämä pienet erot ovat ratkaisevia.



Kuva 19. Absorptiokerrokset erottuvat juuri ja juuri kun näkyvissä on vain pohjaväri. Realistisen lopputuloksen kannalta nämä pienetkin yksityiskohdat ovat kuitenkin tärkeitä. (Kontio 2024.)

Tässä vaiheessa projektia aloin pohtia ihonvärin valikoimista tekstuureja luodessa. Olin käyttänyt palettina Donnerin ym. (2008) hakutekstuuria, mutta vaikka siinä olikin esitettyä hemoglobiinin ja melaniinin määrän kasvu, ei hakutekstuurista voinut valikoida feomelaniinin ja eumelaniinin sekoitussuhdetta. Täydelliseen ihovärikuvaajaan tarvittaisiin vielä yksi akseli, jolla voitaisiin kuvata tätä sekoitussuhdetta. Kaikki mahdolliset ihon sävyt kattava paletti olisi siis kuutio, ei neliö. Nimimerkki Djelly (2020) esittelee blogikirjoituksessaan ratkaisua juuri tähän ongelmaan. Kirjoituksessa hän rakentaa Donnerin ym. mittaustuloksiin perustuvan simulaation, jolla tuottaa Kuva 20 näkyvät kolme eri ihonsävytekstuuria. Tekstuureissa melaniini ja hemoglobiini ovat omilla akseleillaan kuten Donnerin ym. taulukossa, mutta kolme kuvaa erottuvat toisistaan melaniinin

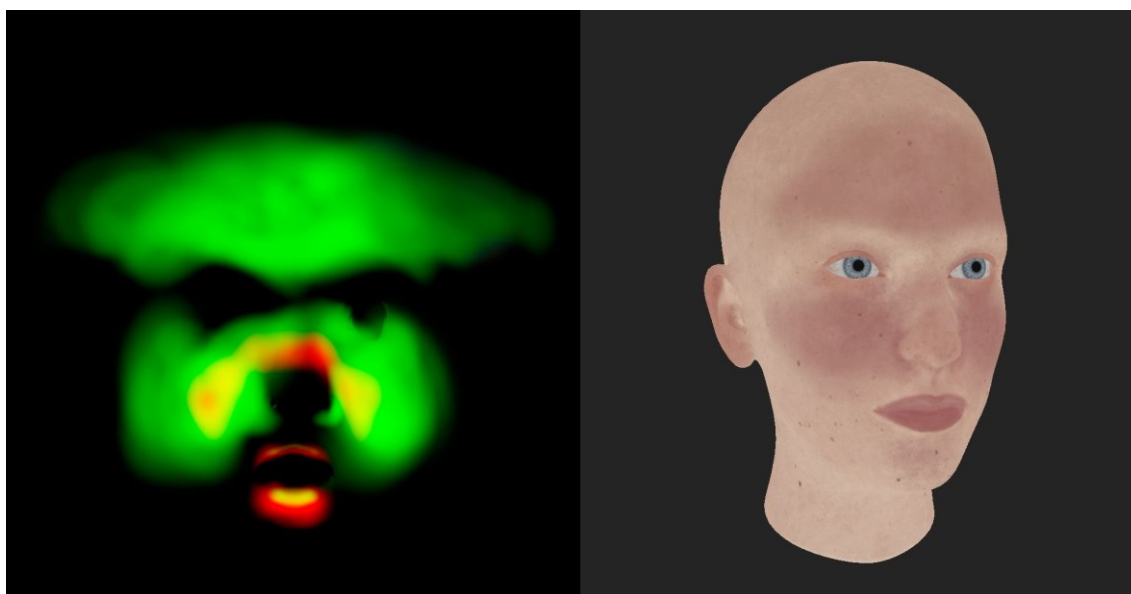
sekoitussuhteissa. Keskimmäisessä kuvassa kumpaakin melaniinia on yhtä paljon, ja kahdessa muussa kuvassa yhtä on enemmän kuin toista. Väriarvoa valitessa voidaan otosta sekoittaa liukuvasti kahden kuvan välillä. Näin saadaan muodostettua kolmas akseli väripaletille, ja siihen sisältyy kaikki mahdolliset, tieteellisesti tarkat kromoforien tuottamat ihonsävyt. Blogikirjoituksessaan Djelly demonstroi myös tämän kolmiulotteisen hakutaulukon soveltamista käytäntöön pelimoottorissa, mikä sai minutkin valitsemaan projektin lopulliseksi renderöintiohjelmaksi Unreal Engine 4:n.



Kuva 20. Yllä nimimerkki Djellyn (2020) simulaatiolla tuottama ihon hakutaulukko. Keskimmäisessä kuvassa eumelaniinia ja feomelaniinia on yhtä paljon, ja reunoilla olevissa yhtä on enemmän kuin toista. Alla taulukot on asetettu peräkkäin havainnollistamaan, kuinka kolmella kuvalla muodostetaan syvyysakseli.

5.3 Verenkierto- ja melaniinikartat

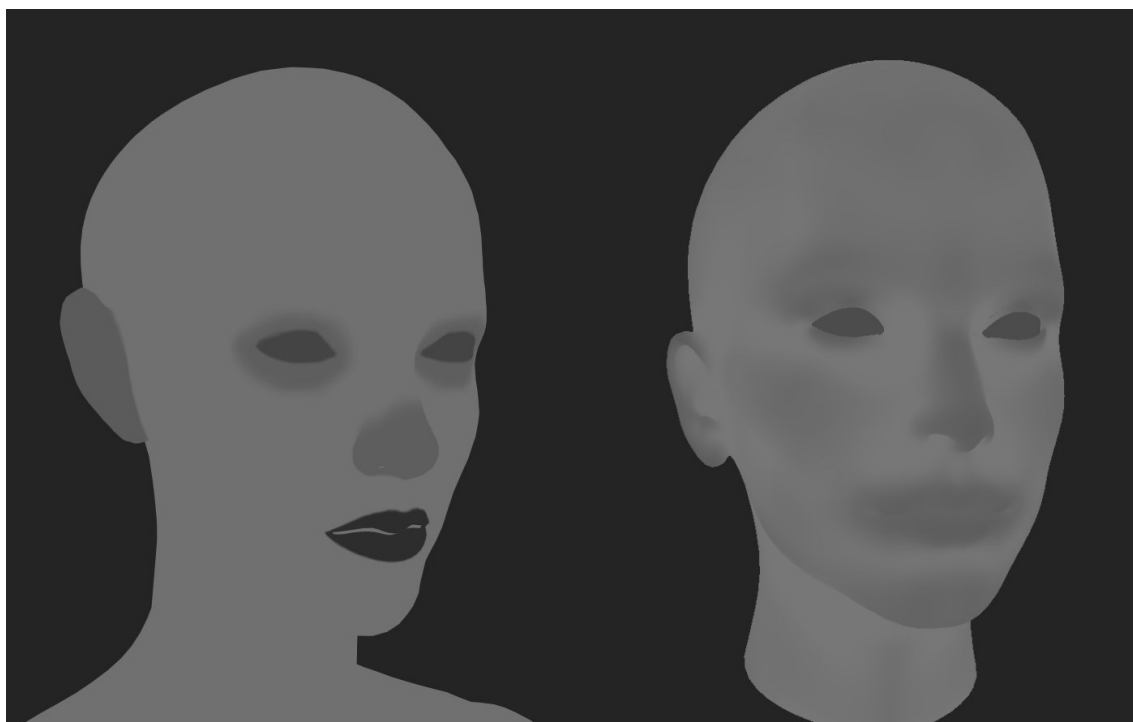
Absoprtiotasojen valmistuttua palasin vielä hemoglobiini- ja melaniinitasojen pariin. Schmitz (2023, 21) mainitsee presentaatiossaan, että pelissä Horizon: Forbidden West käytettiin kolmea eri verenkiertokarttaa hahmojen kasvoissa. Näitä karttoja pelimoottorin sävyttimessä sekoittamalla saadaan aikaan haluttuja, hienovaraisempia punastuksia. Tämän mielessä pitäen tein Kuva 21 näkyvät kaksi mahdollisimman erilaisen tunnetilan punastusta; totesin kahden olevan riittävä määrä tähän projektiin, jotta voin testata karttojen sekoitusta pelimoottorissa. Melaniinikarttojen testaamiseksi tuotin Substance 3D Painterin kohinageneraattorilla satunnaisen kuvion esittämään vitiligo-ihosairautta. Näiden tasojen maskit vein ulos erillisinä karttoina myöhempää käyttöä varten pelimoottorissa. Koska kartat ovat mustavalkoisia, sain pakattua verenkiertokartat ja melaniinikartat eri värikanaville omiin kuvatiedostoihinsa, säästäen näin tilaa.



Kuva 21. Kahden eri tunnetilan käsin maalatut verenkiertokartat. Kartat ovat mustavalkoisia, mutta tilan säästämiseksi ne on pakattu samaan kuvatiedostoon eri värikanaville. Punaisuutta on korostettu oikeanpuoleisessa näkymässä teksturointiohjelmasta. (Kontio 2024.)

5.4 Karkeus-/kiiltävyyskartta

Yksinkertaisin tapa tuottaa karkeuskartta on käsin maalaamalla. Käsityönä karttaa tuottaessa on hyvä referoida mitattuja kiiltävyysarvojen vaihteluita, mutta myös valokuvia. Karkeus- tai kiiltävyyskartta pohjimmiltaan kuvaa pinnan mikrotason röpelöisyyden vaihtelua. Kun pinnan pienimmät, tertiääriset yksityiskohdat on jo tuotettu huolella ei karkeuskartan tarvitse olla kovinkaan monimutkainen, sillä tertiääriset muodot rikkovat jo spekulaarista heijastusta hyvin uskottavasti. Kuva 22 on vasemmalla silmämääräisesti tuotettu karkeuskartta edellisestä hahmoprojektista, oikealla karkeuskartta tämän opinnäytetyön projektista, jota tehdessä on referoitu mittaustuloksia. Luonnolliset kiiltävyysvaihtelut ovat huomattavasti hienovaraisempia kuin mitä silmämääräisesti työstäessä voisi olettaa.



Kuva 22. Silmämääräisesti maalattu karkeuskartta sekä mittaustuloksista referoitu karkeuskartta. Tummat alueet ovat enemmän ja vaaleat vähemmän kiiltäviä. (Kontio 2024.)

Tuotin karkeuskartan referoiden Weyrichin ym. (2006, 9–10) mittaustuloksia kasvojen ihon kiiltävyydestä, mutta käytyäni läpi aiheeseen liittyvää lähdemateriaalia ja Gallagherin (i.a.d.) luennon aiheesta päätin kuitenkin käsin maalaamisen sijaan kokeilla tässä projektissa Unreal Enginestä löytyvää automaattista karkeuskartan luomista. Automatisoitu toiminto luo 3D-mallille karkeuskartan sen normaalikartan pohjalta. Normaalikartan on oltava tätä varten melko korkearesoluutioinen ja yksityiskohtainen, jotta lopputulos näyttää hyvältä, mutta koska olin jo veistovaiheessa tuottanut hyvin tarkasti pinnan muotoja ja kohinaa, oli tämä varteenotettava vaihtoehto.

5.5 Pinnanalainen hajonta eli subsurface scattering, SSS

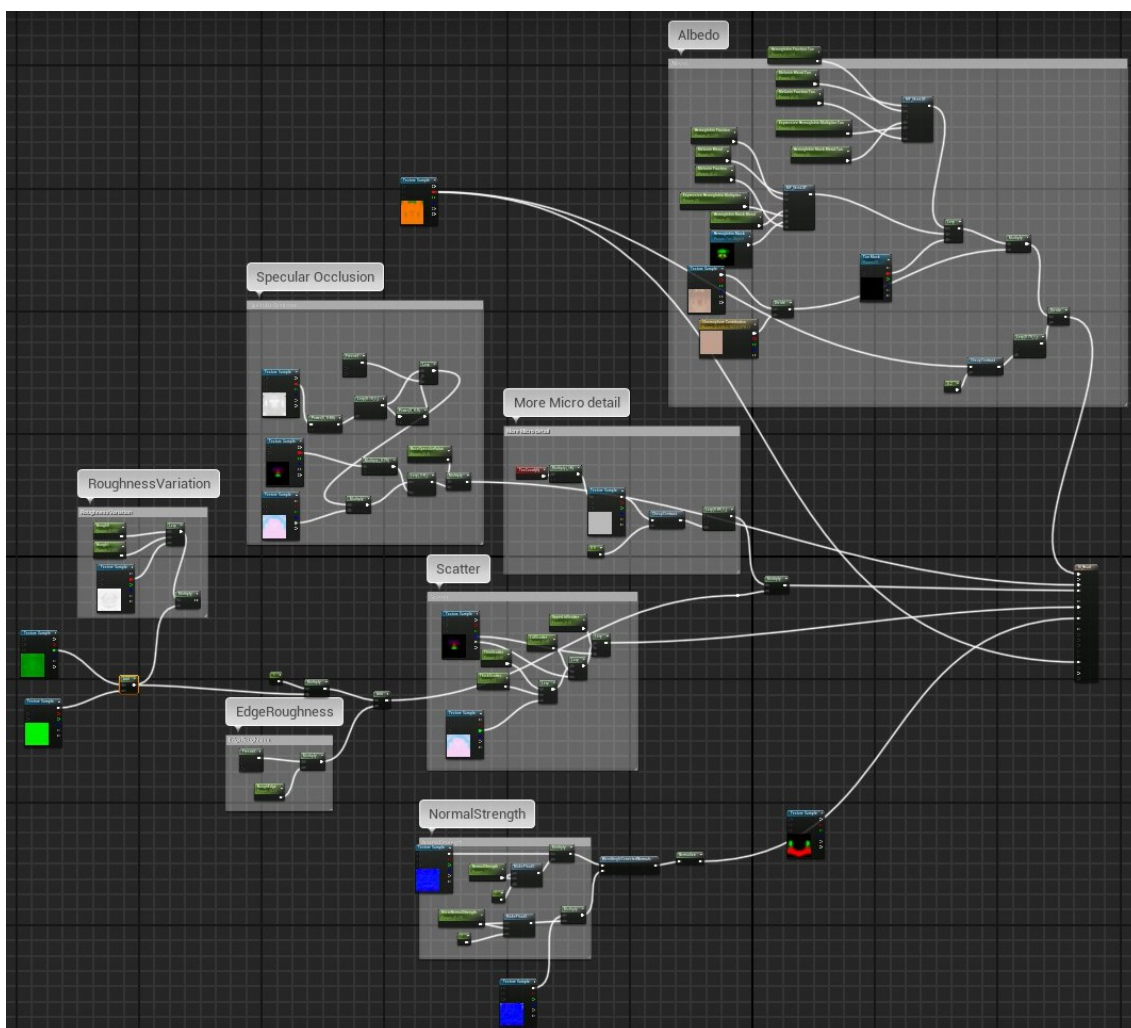
Samoin kuin karkeuden kanssa, voi hajontakartankin maalata käsin, mutta sen tuottamiseen löytyy myös automatisoituja työkaluja. Koska valon pinnanalaisen hajonnan voimakkuus määrittyy suurimmaksi osaksi kappaleen paksuudesta, voi Substance 3D Painterissa hyvin helposti luoda hajontakartan käyttämällä ohjelmasta löytyvää valmista generaattoria. Generaattori tuottaa mallin pintaan sitä vaaleampaa väriä mitä ohuempi 3D malli on, ja tällä tavoin voi luoda musta-vaalkotekstuurin hajontakartaksi renderöintiohjelman sävyttintä varten.

Aikaisemmassa hahmoprojektissa käytin käsin tehtyä hajontakarttaa, mutta tutustuttuani Unreal Enginen ominaisuuksiin jätin sen kokonaan tekemättä tähän projektiin, sillä Unreal Engine osaa automaattisesti piirtää pinnanalaista hajontaa kappaleen paksuuden mukaan. Unreal Enginen sävyttimessä oli myös riittävästi erilaisia säätöominaisuuksia pinnanalaiselle hajonnalle, joten erillinen tekstuuri ollut tarpeen tähän projektiin.

5.6 Sävyttimen rakentaminen ja renderöinti Unreal Enginessä

Ensimmäisten versioiden valmistuttua kaikista tekstuurikartoista vein mallin ja tekstuurit Unreal Engine 4:ään renderöimistä varten. Koska pelimoottori ei ollut minulle entuudestaan tuttu, päätin tyhjän skenen sijaan käyttää pohjana Unrealin kauppasivulta ilmaiseksi ladattavaa Digital Human -esimerkkiprojektia. Digital

Human on sittemmin korvattu Unreal Engine 5:ssä MetaHumanilla, mutta katsoin Digital Humanin olevan riittävän yksinkertainen muokattavaksi tätä projektia varten. Digital Humanista sain valmiin studiovalaistuksen mallille, sekä pohjan ihon sävyttimelle, johon vaihdoin itse tekemäni pohjavärikartan malliesimerkkien tilalle. Sävytintä täytyi kuitenkin vielä muokata voidakseni testata verenkierron vaihtelua ja melaniinin muutosta varten rakentamiani maskeja ja ihonvärin hakutaulukkoa. Lopullinen sävyttimen noodiverkko näkyy Kuva 23.



Kuva 23. Digital Human -esimerkkiprojektin sävyttimen pohjalta rakennettu ihosävyttin Unreal Engine 4:ssä (Kontio 2024).

Pohjavärin jälkeen toin normaalikartan ja yksityiskohtanormaalikartan Unreal Engineen ja kytkin ne sävyttimeen. Toin myös täysin mustan tekstuurin, jonka tuontivalikossa composite texture -kohdassa on mahdollisuus lisätä toinen kuva

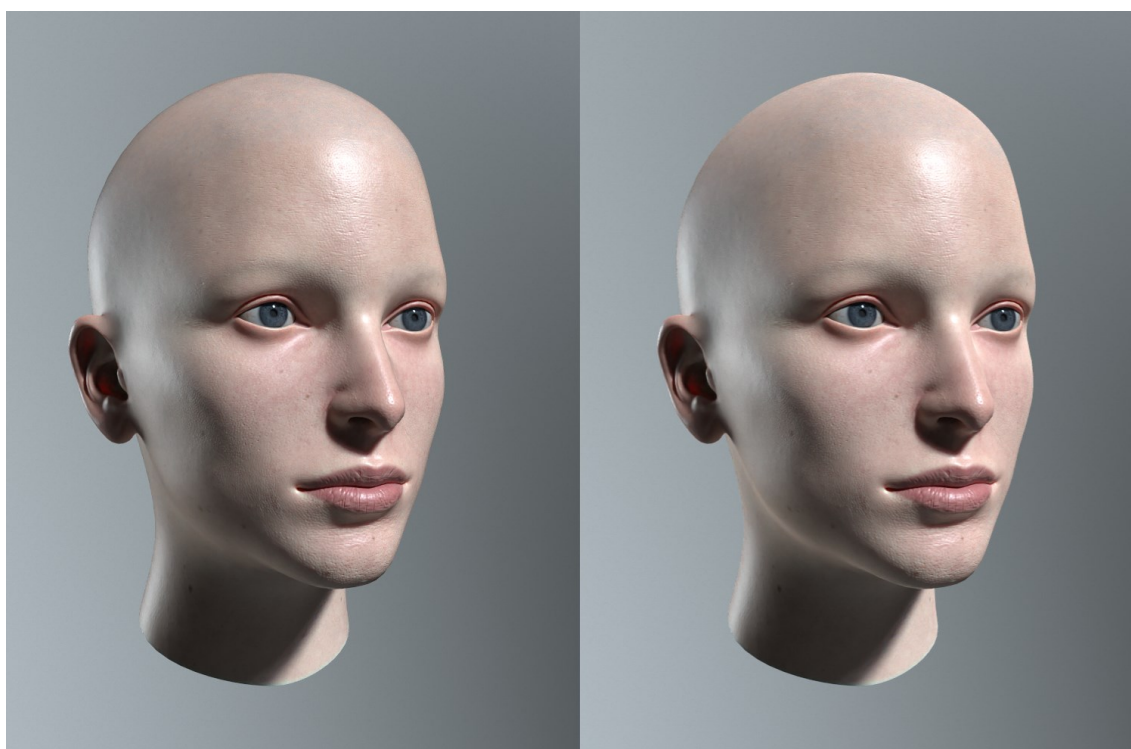
tekstuuriin. Tällä toiminnolla lisäsin normaalikartan mustan tekstuurin vihreälle värikanavalle karkeudeksi, ja Unreal Engine tallensi sen projektiin uutena karttana, jonka kytkin karkeuskartaksi sävyttimessä. Lopputulos toimi yllättävän hyvin täysin automatisoiduksi toiminnoksi jonka pohjana oli vain normaalikartta, mutta jos mallin sävytin vaatisi millään tavoin erityisenlaista kiiltävyys-/karkeusvaihtelua, kuten esimerkiksi suurempaa öljyisyyttä jossain kohtaa ihoa, täytyisi kartta tehdä käsin. Kuva 24 näkyy läheltä näiden karttojen vaikutus ihoon.



Kuva 24. Lähikuva ihon pienistä yksityiskohdista ja spekularisesta heijastuksesta. Unreal Enginen automatisoitu karkeuskartan luonti normaalikartan pohjalta toimi yllättävän hyvin. (Kontio 2024.)

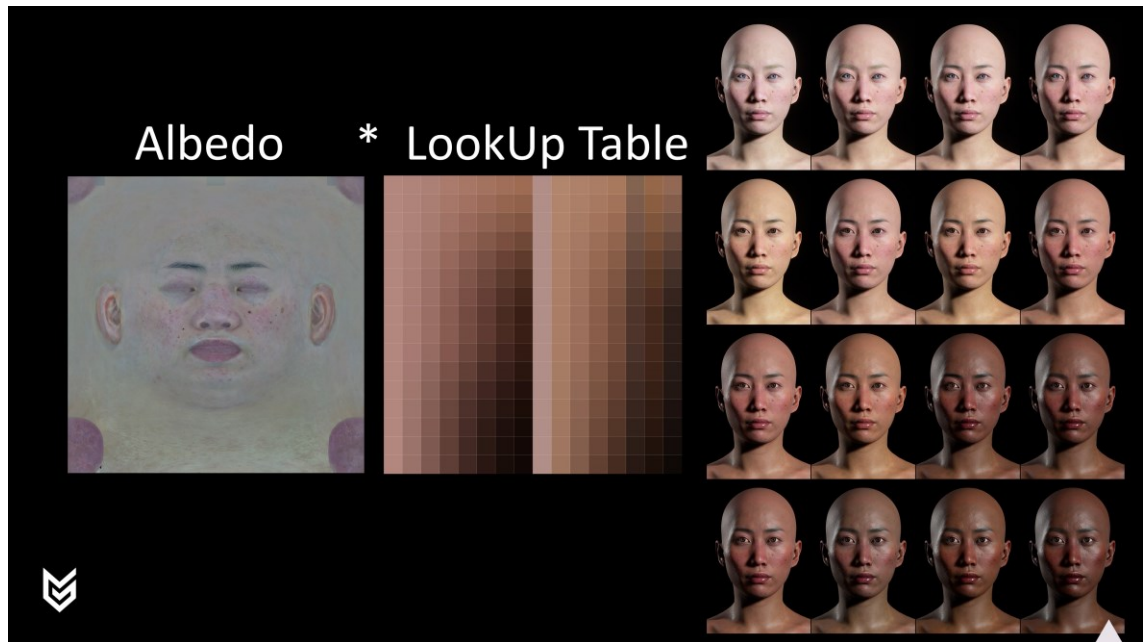
Pohjana käyttämäni Digital Human -projektin mallissa oli ihon pinnassa geometrialla toteutettua velluskarvoitusta. Projektiosuutta työstäessä en katsonut tarpeelliseksi mallintaa velluskarvoja koska tarkoitus oli syventyä ihon teksturointiin, ja samanlaisen visuaalisen vaikutelman saisi aikaan lisäämällä ihon sävyttiin fresnel-efektin, kuten Kuva 25 on tehty Marmoset Toolbag 4 -ohjelmassa. Sen sijaan mallinsin ripset ja kulmakarvat, sillä vaikka ne eivät liitykään itsensä ihon ulkonäköön, niiden puute vei hahmoa katsoessa huomion pois ihosta. Jälkikäteen reflektoiden olisi kuitenkin ollut hyvä mallintaa myös velluskarvat,

jotta olisin oppimismielessä käynyt läpi senkin työvaiheen. Ei ole enää poikkeuksellista, että hahmoilla esiintyy velluskarvoitusta esirenderöityjen animaatioiden lisäksi myös reaaliaikaisesti renderöidyissä peleissä. Horizon: Forbidden Westissä kamera on välillä hyvinkin lähellä hahmojen kasvoja, ja tämän takia siihen on tuotettu velluskarvoille kolme eri tarkkuustasoa (engl. *LOD, Level Of Detail*, polygoniverkoltaan eri tiheyksisiä versioita samasta mallista.) (Schmitz 2023, 78).



Kuva 25. Malli renderöitynä Marmoset Toolbag 4:ssä. Sävyttimeen on oikeanpuoleisessa kuvassa lisätty fresnel-efekti, joka matkii valon taittumista velluskarvoituksesta. Vaikutus erottuu esimerkiksi leuan varjoon jäävällä puolella, jonka reunassa on valoa. (Kontio 2024.)

Schmitz (2023, 80) kertoo pelissä Horizon: Forbidden West olevan valtava määrä hahmoja, joilla on hyvin erilaisia ihoväriytyksiä. Jotta ihovärejä voisi vaihtaa helposti lennossa, ei pohjavärikarttaan enää kuulukaan punertavia ja rusehtavia sävyjä. Sen sijaan ihon keskiarvoiset sävyt on irrotettu Kuva 26 näkyväksi, omaksi hakutaulukokseen ja ihonväri on oma muuttujansa, jota voi vaihtaa sävyttimessä. Pohjavärikartta näyttää harmaltavalta sinertävillä ja purppuraisilla yksityiskohdilla, koska siitä on poistettu sävyt pinkistä ruskeaan.



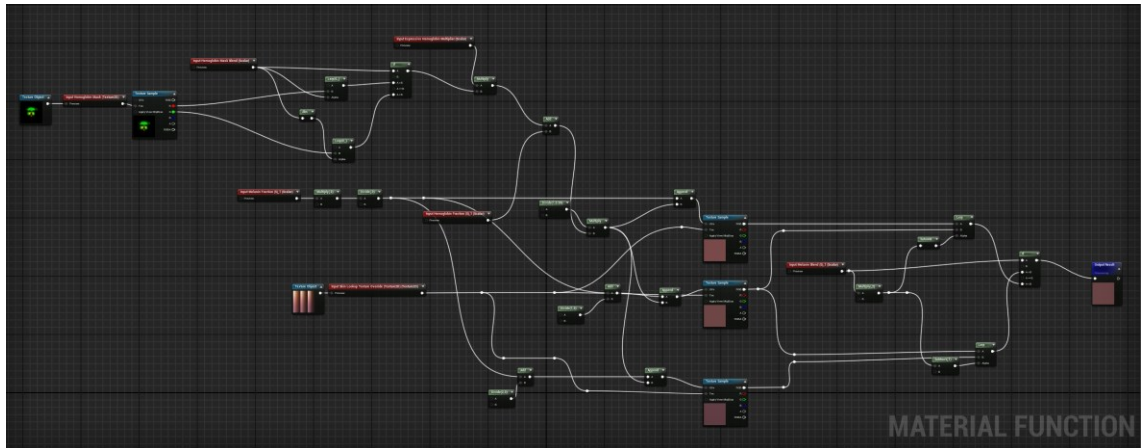
Kuva 26. Ihon hakutaulukko pelistä Horizon: Forbidden West. Ihon keskiarvoiset sävyt on irrotettu taulukoksi, josta niitä on helppo vaihtaa pelimoottorissa. Tämän takia albedo eli pohjavärikartta näyttää harmahtavalta. (Schmitz 2023, 80.)

Päädyin tekemään hyvin samankaltaisen toimenpiteen viedessäni mallin Unreal Engineen ja seurattessani nimimerkki Djellyn (2020) blogikirjoituksen esimerkkiä dynaamisen ihosävyttimen rakentamisessa. Koska omassa projektissani oli vain yksi hahmo, en nähnyt tarvetta irrottaa ihon keskiarvosävyä teksturointivaiheen päätteeksi, vaan keskiarvosävy irrotetaan ihon sävyttimessä. Lopuksi sävyttimessä valitaan vielä hakutaulukosta uusi keskiarvosävy iholle. Esimerkkejä melaniinin ja hemoglobiinin määrän dynaamisesta vaihtamisesta on Kuva 27. Varsinaisessa, useita hahmoja sisältävässä peliprojektissa keskiarvoväriin ensin irrottaminen sävyttimessä kävisi turhan raskaaksi kun sävytin toistaa jatkuvasti ylimääräistä toimenpidettä, joten on järkevää tuottaa pohjavärikartat harmahtavina, kuten Horizon: Forbidden Westissä on tehty.



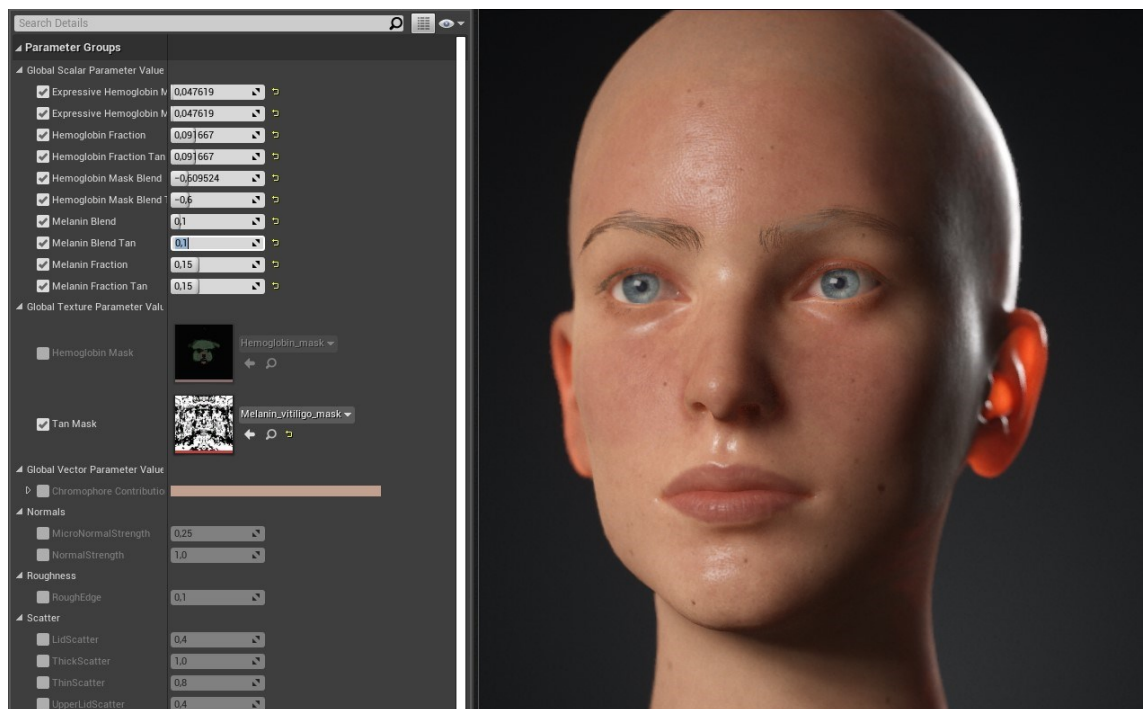
Kuva 27. Melaniinin määrää ja sekoitussuhdetta sekä hemoglobiinin määrää voi säätää dynaamisesti sävyttimessä käyttäjälle paljastetulla kontrollilla. (Kontio 2024.)

Viimeiseksi rakensin nimimerkki Djellyn (2020) esimerkin mukaisesti sävytti-
meen mahdollisuuden käyttää maskeja hemoglobiinille ja melaniinille ja keino-
sekoittaa lopputulosta niiden välillä, jotta käyttäjä voisi vaihtaa hahmolle erilaisia
punastuksia tai melaniinikuvioita. Tämä sävyttimen osa on kuvattuna kokonaan
Kuva 28. Käytännössä melaniinimasteilla voisi esimerkiksi rajoittaa melaniinin
määrää sellaisissa kohdissa ihoa, joissa melaniinia esiintyy luonnollisestikin vä-
hän, kuten kämmenten sisäpuoli tai jalkapohjat.

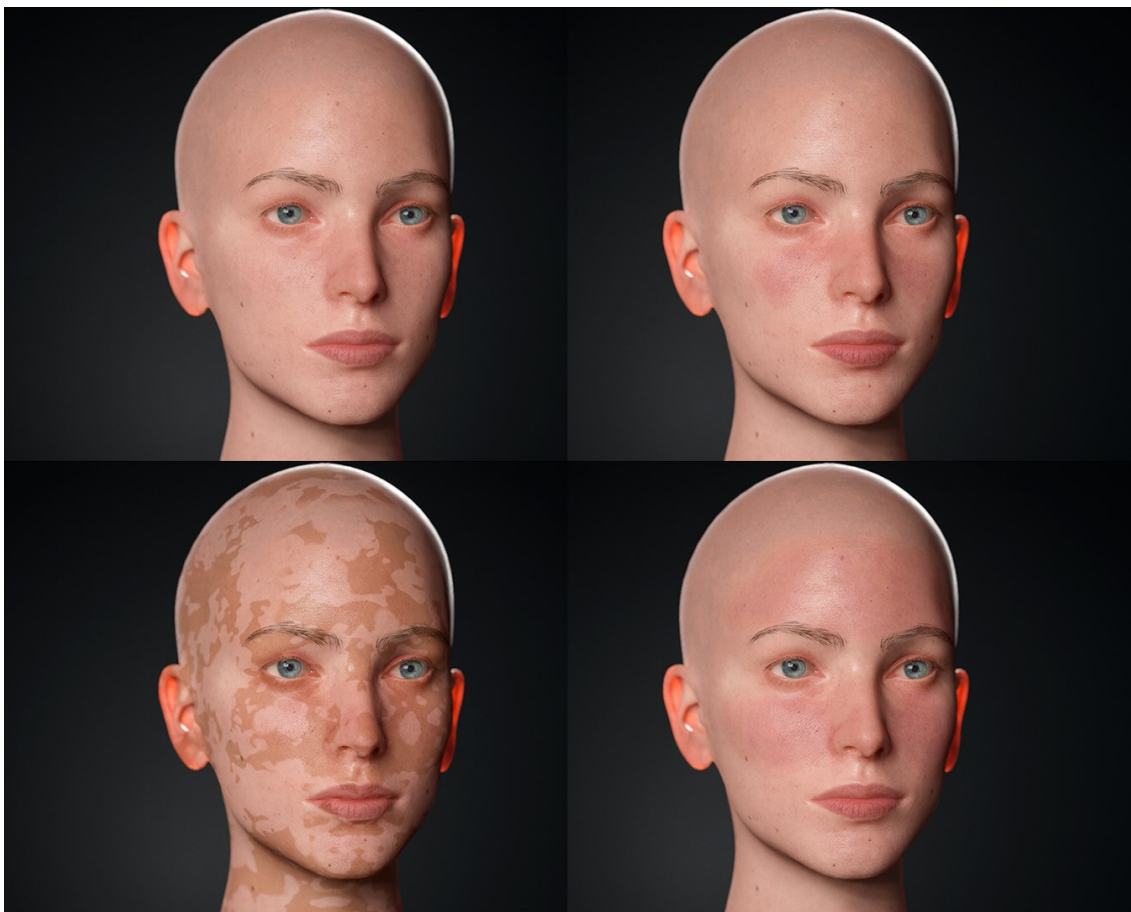


Kuva 28. Hemoglobiinin ja melaniinin dynaamisen vaihtamisen noodiverkko ihon sävyttimessä (Kontio 2024).

Koska tässä projektissa renderöitävänä mallina oli vain hahmon pää, päätin visuaalisen selkeyden vuoksi käyttää melaniinimaskia vitiligo-ihosairauden kaltaiseen kuvioon. Kuva 29 näkyy, kuinka maskien sekoitustasojen säätökontrollit on paljastettu käyttäjälle samalla tavoin kuin kromoforien määrän säädöt. Kuva 30 näkyy melaniini- ja verenkiertokuvioiden vaihto, joka toimi riittävän hyvin tätä projektia varten.



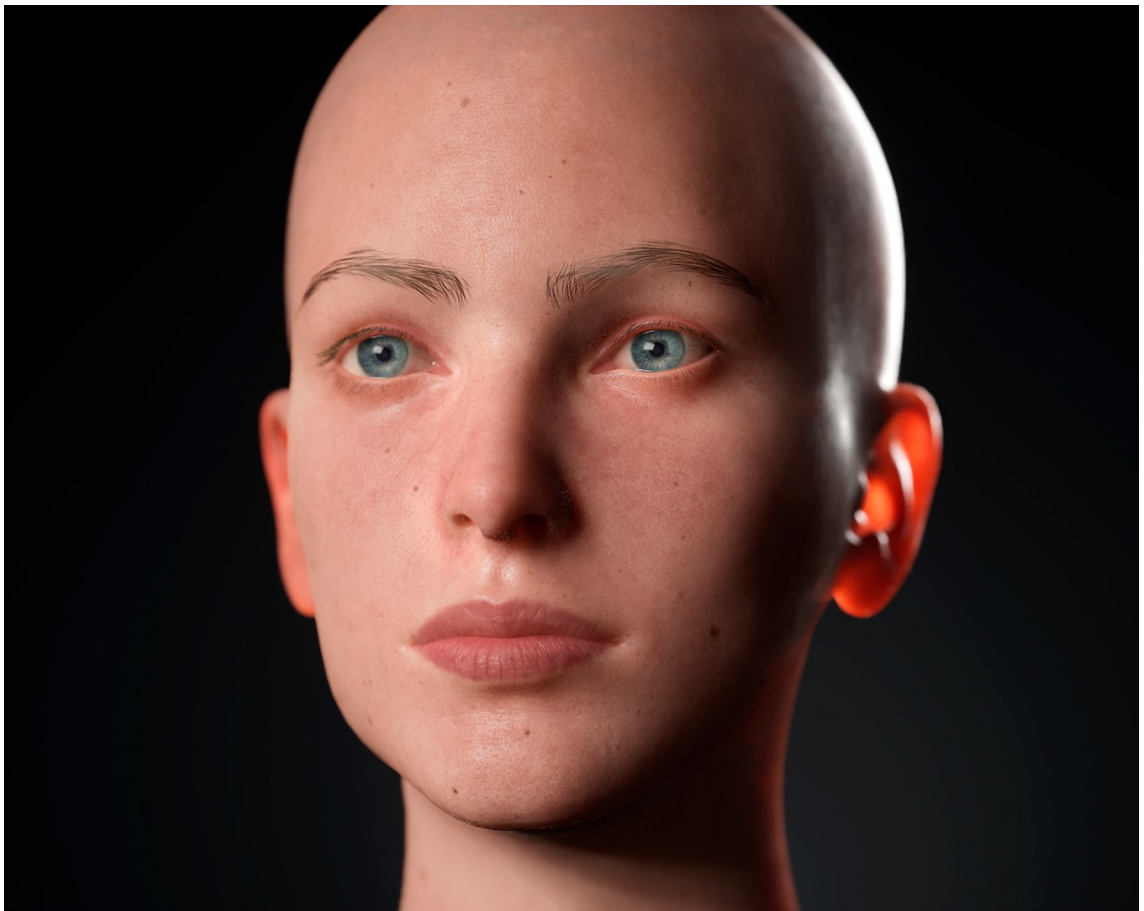
Kuva 29. Käyttäjälle paljastetut kontrollit sävyttimen säätämiseen. Verenkierto- ja melaniinikartat on myös mahdollista vaihtaa helposti tätä kautta. (Kontio 2024.)



Kuva 30. Sävyttimeen rakennetuilla maskeilla voi vaihtaa ihoon erilaisia punastus- ja melaniinikuvioita (Kontio 2024).

Todellista peliprojektia varten tulisi käytettävyyttä vielä parantaa, sillä esimerkiksi projektin kaksi hemoglobiinimaskia on asetettu yhden liu'utettavan kontrollin kahdeksi ääripääksi. Tämä toimii yksinkertaisena ratkaisuna siihen, että käyttäjä voi sulavasti valita kohdan kahden tunnetilan väliltä, mutta todellisessa käyttötarkoituksessa olisi hahmolla enemmän kuin kaksi mahdollista ääripäätä punastukselle. Tätä varten sävyttimen täytyisi olla huomattavan paljon monimutkaisempi, eivätkä liu'utettavat kahden ääripään kontrollit olisi enää useiden verenkiertokarttojen kanssa käyttäjäystävällisiä.

Punastusten vaihtelua erilaisissa tunnetiloissa olisi myös ollut hyvä kokeilla niin, että myös kasvojen ilme muuttuu tunnetilan mukaisesti. Näin tulisi demonstroida kuinka verenkierron muutos kasvoissa korostaa tunnetiloja. Tätä varten päälle olisi kuitenkin täytynyt tehdä rigaus (engl. *rigging*, toimenpide, jossa 3D-mallin verkolle rakennetaan luuranko tai rigi, jolla mallin pintaa voidaan muuttaa ja animoida), ja se olisi vienyt projektilta liian paljon aikaa. Toisaalta rigin animaatiokontroleihin olisi voinut myös lisätä säätökontrollit sävyttimen ominaisuuksille, jolloin animaattori voisi kasvoja animoidessaan helposti muuttaa myös verenkiertoa vastaamaan haluttua tunnetilaa.



Kuva 31. Lopputulos renderöitynä ulos Unreal Engine 4:stä (Kontio 2024).

6 Yhteenveto

Tavoitteenani oli tämän opinnäytetyön tekoprosessin alussa saavuttaa kattavampi ja syvempi ymmärrys ihosta: sen koostumuksesta, valon käyttäytymisestä sen rakenteissa sekä teksturointitekniikoista uskottavan ihon luomiseksi. Kävin läpi lukuisia lähteitä liittyen jokaiseen aihealueeseen, ja jokaista uutta lähdettä läpikäydessäni tuntui siltä, että yksittäisten alaotsikoidenkin aiheisiin olisi voinut sukeltaa paljon syvemmälle. Esimerkiksi valon käyttäytymisestä tietokonegrafiikassa on paljon erilaisia matemaattisia malleja, joihin olisi voinut pureutua. Haasteena oli valikoida kaikkein olennaisimmat lähteet pohjaksi tälle työlle. Hyvä apukeino oli monesti palauttaa mieleen, että tarkoitus oli tarkastella kaikkia näitä aiheita nimenomaisesti artistin näkökulmasta, jolloin matemaattisten kaavojen läpikäynti ei ole tarkoituksen mukaista, sekä vielä kapeammin rajaten, että käyttökohde on reaaliaikaisesti renderöitävää grafiikkaa.

Tiedonkeruu oli helpompaa ihon fysiologiaa tutkiessa – josta on kirjoitettu paljon tutkimuksia ja tieteellisiä artikkeleita – mutta kun koetin löytää lähdemateriaalia liittyen käytännön työnkulkuun renderöinnissä ja teksturoinnissa, ei samanlaista kirjallisten lähteiden kirjoja ollutkaan, tai se oli sisällöltään osin tai kokonaan vanhentunutta, työkalujen kehittymisen ja muuttumisen takia. Suurin osa käytännöllisestä oppimateriaalista vaikuttaisi olevan nykyään videomuodossa, ja aiheisiin syvemmälle menevä aineisto on useimmiten maksumuurin takana. Videolähteet ovat kyllä erinomaisia kokonaisten työnkulujen havainnollistamiseen seikkaperäisesti, mutta niiden sisältöä ei voi samalla tavoin silmäillä ennen niihin tarkemmin syventymistä kuin on mahdollista tekstilähteiden kanssa, mikä tekee niiden läpikäymisestä hidasta. Runsas ajankäyttö tiedonkeruuvaiheeseen oli kuitenkin hyödyllistä, sillä ymmärrykseni tämän opinnäytetyön aiheista kasvoi valtavasti.

Projektiosuudessa pääsin suurimmaksi osaksi tavoitteeseeni eli luomaan uskottavan näköistä, reaaliaikaisesti renderöityä ihoa 3D-hahmolle, jonka ihonväri perustuu fysikaalisesti oikeisiin väriarvoihin, joita voi vaihtaa dynaamisesti. Ihoa työstäessäni päätin jättää väliin velluskarvoituksen mallintamisen, sillä uskoin

sävyttimeen lisättävän fresnel-efektin tuovan riittävän samankaltaisen vaikutuksen ihon ulkonäköön. Jälkikäteen arvioiden olisi karvoituskin ollut hyvä mallintaa, sillä ihotekstuurin resoluutio on muutoin riittävän tarkka tarkasteltavaksi jopa niin lähietäisyydeltä, että yksittäiset velluskarvatkin olisivat erottuneet. Dynaaminen kromoforien säätäminen sävyttimessä ei myöskään ole kovinkaan käyttäjäystävällistä ja vaatisi lisää kehitystä todellista peli- tai animaatioprojektia varten.

Vaikka en päätenytkään projektiosuudessa käyttämään karkeus- tai hajontakarttoja, oli niihinkin aiheisiin erittäin hyödyllistä perehtyä tutkiessani teoriaosuudessa ihon fysiologiaa. Pystyin tekemään valistuneempia päätöksiä pelimoottorin puolella juuri sen takia, että olin syventynyt aiheeseen. Oli myös kiinnostavaa kokea hyvin konkreettisesti, kuinka teknologian kehityksen ansiosta jotkin työvaiheet nopeutuvat tai jopa poistuvat, kuten tämän projektin karkeus- ja hajontakarttojen maalaamisen kanssa. Tämän opinnäytetyön kirjoitushetkellä on teksturointi- ja 3D-ohjelmiin vasta tulossa erilaisia tekoälytoiminnallisuuksia tai jo julkaistut ominaisuudet ovat vielä kehityskaarensa alkuvaiheessa. Näiden toimintojen hyödyntämistä ihon teksturoinnissa voisi olla kiinnostavaa tutkia, sillä huolimatta kaikista jo olemassa olevista proseduraalisista työkaluista vaatii realistisen lopputuloksen saavuttaminen edelleen paljon käsityötä.

Lähteet

Arda, Oktay & Göksügür, Nadir & Tüzün, Yalçın 2014. Basic histological structure and functions of facial skin. Clinics in Dermatology, Vol. 32, No. 1. <https://doi.org/10.1016/j.clindermatol.2013.05.021> (viitattu 14.4.2023).

Brunet, Marc 2016. PBR Character For Games. Ladattava videotutoriaali. https://cubebush.co/mb?product_id=1ztdpw (viitattu 2.2.2023). Rajattu käyttöoikeus

Djelly 2020. Physically Modeling Skin Tones. half4.xyz. Verkkotutoriaali 18.8.2020. <https://half4.xyz/index.php/2020/08/18/introduction-physically-modeling-skin-tones/> (viitattu 2.2.2023).

Donner, Craig & Weyrich, Tim & d'Eon, Eugene & Ramamoorthi, Ravi & Rusinkiewicz, Szymon 2008. A Layered, Heterogenous Reflectance Model for Acquiring and Rendering Human Skin. n3m0.org. <http://reality.cs.ucl.ac.uk/projects/internal/defskin/defskin-080123.pdf> (viitattu 2.2.2023).

Flament, Frederic & Francois, Ghislain & Qiu, Huixia & Ye, Chengda & Hanaya, Tomoo & Batisse, Dominique & Cointereau-Chardon, Suzy & Seixas, Mirela Donato Gianeti & Dal Belo, Susi Elaine & Bazin, Roland 2015. Facial skin pores: a multiethnic study. Pdf. Lontoo: Dovepress. <https://doi.org/10.2147/CCID.S74401> (viitattu 2.2.2023).

FlippedNormals 2023. How to Sculpt Realistic Scales with Painter and Zbrush. Verkkovideo. <https://www.youtube.com/watch?v=vG-zS753es> (viitattu 11.10.2023).

Gallagher, Laura i.a.a. Creating Tertiary Details. Verkkovideo. Outgang.studio. <https://outgang.studio/lecture/creating-tertiary-details/> (viitattu 2.2.2023). Rajattu käyttöoikeus.

Gallagher, Laura i.a.b. Baking and Exporting Out of Zbrush. Verkkovideo. Outgang.studio. <https://outgang.studio/lecture/baking-exporting-zbrush/> (viitattu 2.2.2023). Rajattu käyttöoikeus.

Gallagher, Laura i.a.c. Facial Texturing with Painter. Verkkovideo. Outgang.studio. <https://outgang.studio/lecture/facial-texturing/> (viitattu 2.2.2023). Rajattu käyttöoikeus.

Gallagher, Laura i.a.d. Integrating a Head in UE4. Verkkovideo. Outgang studio. <https://outgang.studio/lecture/integrating-head-unreal/> (viitattu 14.4.2023). Rajattu käyttöoikeus.

Igarashi, Takanori & Nishino, Ko & Nayar, Shree K. 2007. The Appearance of Human Skin: A Survey. Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision: Vol. 3: No. 1. <https://www.nowpublishers.com/article/Details/CGV-013> (viitattu 13.4. 2023).

Jimenez, Jorge & Scully, Timothy & Barbosa, Nuno & Donner, Craig & Alvarez, Xenxo & Vieira, Teresa & Matts, Paul & Orvalho, Verónica & Gutierrez, Diego & Weyrich, Tim 2010. A Practical Model for Dynamic Facial Color. Pdf. n3m0.org. <http://reality.cs.ucl.ac.uk/projects/skinperf/skinperf.pdf> (viitattu 2.2.2023).

Joensuu, Janne 2016. 3D-alan sanasto : 3D-grafiikan termit suomeksi. Opin- näytetyö. Kajaani: Kajaanin ammattikorkeakoulu. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2016060612045> (viitattu 2.2.2023).

Krishnaswamy, Aravind & Baranoski, Gladimir V. G. 2004. A Biophysically- Based Spectral Model of Light Interaction with Human Skin. Computer Graphics Forum, Volume 23, Issue 3. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2004.00764.x> (viitattu 8.4.2024).

Kumar, Abhishek 2020. Beginning PBR Texturing. Varanasi: Apress.

McDermott, Wes 2018. The PBR Guide. E-kirja. <https://learndown-load.adobe.com/pub/learn/substance-3d-designer/the-pbr-guide.pdf> (viitattu 8.4.2024).

Russell, Eddie 2014. Eliminate Texture Confusion: Bump, Normal and Displacement Maps. <https://www.pluralsight.com/blog/film-games/bump-normal-and-displacement-maps> (viitattu 2.2.2023).

Schmitz, Arno 2023. Creating the Many Faces of Horizon Forbidden West. Guerrilla Games. <https://d3d3g8mu99pzk9.cloudfront.net/Ar-noSchmitz/Creating%20the%20many%20Faces%20of%20Horizon%20Forbidden%20West.pptx> (viitattu 20.3.2024).

Spencer, Scott 2011. Zbrush Character Creation: Advanced Digital Sculpting, Second Edition. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc.

Verma, Archee 2021. Blender 2.9: UV Mapping - Simply Explained. All3DP. <https://all3dp.com/2/blender-uv-mapping-simply-explained/> (viitattu 2.2.2023).

Weyrich, Tim & Matusik, Wojciech & Pfister, Hanspeter & Bickel, Bernd & Donner, Craig & Tu, Chien & McAndless, Janet & Lee, Jinho & Ngan, Addy & Jensen, Henrik Wann & Gross, Markus. Analysis of Human Faces Using a Measurement-Based Skin Reflectance Model 2006. New York: Association for Computing Machinery. SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Papers. Sivut 1013–1024. <https://doi.org/10.1145/1179352.1141987> (viitattu 20.3.2024).

Wilson, Joe 2015. PBR Texture Conversion. Marmoset. <https://marmoset.co/posts/pbr-texture-conversion/> (viitattu 9.4.2024).

Kuvalähteet

Kuva 1. Brunet, Marc 2016. PBR Character For Games. Ladattava videotutoriaali. https://cubebrush.co/mb?product_id=1ztdpw (viitattu 2.2.2023).

Kuva 2. McDermott, Wes 2018. The PBR Guide. E-kirja. <https://learn.download.adobe.com/pub/learn/substance-3d-designer/the-pbr-guide.pdf> (viitattu 8.4.2024).

Kuva 3. Wilson, Joe 2015. PBR Texture Conversion. Marmoset. <https://marmoset.co/posts/pbr-texture-conversion/> (viitattu 9.4.2024).

Kuvat 4–5. Igarashi, Takanori & Nishino, Ko & Nayar, Shree K. 2007. The Appearance of Human Skin: A Survey. Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision: Vol. 3: No. 1. <https://www.nowpublishers.com/article/Details/CGV-013> (viitattu 13.4. 2023).

Kuva 6. Flament, Frederic & Francois, Ghislain & Qiu, Huixia & Ye, Chengda & Hanaya, Tomoo & Batisse, Dominique & Cointereau-Chardon, Suzy & Seixas, Mirela Donato Gianeti & Dal Belo, Susi Elaine & Bazin, Roland 2015. Facial skin pores: a multiethnic study. Pdf. Lontoo: Dovepress. <https://doi.org/10.2147/CCID.S74401> (viitattu 2.2.2023).

Kuva 7. Weyrich, Tim & Matusik, Wojciech & Pfister, Hanspeter & Bickel, Bernd & Donner, Craig & Tu, Chien & McAndless, Janet & Lee, Jinho & Ngan, Addy & Jensen, Henrik Wann & Gross, Markus. Analysis of Human Faces Using a Measurement-Based Skin Reflectance Model 2006. New York: Association for Computing Machinery. SIGGRAPH '06: ACM SIGGRAPH 2006 Papers. Sivut 1013–1024. <https://doi.org/10.1145/1179352.1141987> (viitattu 20.3.2024).

Kuva 8. Krishnaswamy, Aravind & Baranoski, Gladimir V. G. 2004. A Biophysically-Based Spectral Model of Light Interaction with Human Skin. Computer Graphics Forum, Volume 23, Issue 3. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2004.00764.x> (viitattu 8.4.2024).

Kuva 9. Kontio, Janne 2024. Kuvakaappaus Zbrushin DemoHeadFemale-mallista.

Kuvat 10–11. Kontio, Janne 2024. Kuvakaappauksia omasta aikaisemmasta hahmoprojektista.

Kuvat 12–15. Kontio, Janne 2024. Kuvakaappauksia omasta 3D-mallista Zbrushin työstönäkymästä.

Kuva 16. Kontio, Janne 2024. Kuvakooste omista siirtokartoista.

Kuvat 17–19. Kontio, Janne 2024. Kuvakaappauksia omasta 3D-mallista Substance 3D Painterin työstönäkymässä.

Kuva 20. Kuvakooste. Kuvat ylhäältä alas.

- Djelly 2020. Physically Modeling Skin Tones. half4.xyz. Verkkotutortiaali 18.8.2020. <https://half4.xyz/index.php/2020/08/18/introduction-physically-modeling-skin-tones/> (viitattu 2.2.2023).
- Kontio, Janne 2024. Oma muokkaus hakutaulukosta Djellyä mukailen.

Kuva 21. Kontio, Janne 2024. Oma hemoglobiinikartta ja kuvankaappaus Substance 3D Painterin työstönäkymästä.

Kuva 22. Kontio, Janne 2024. Kuvakaappaus omista 3D-malleista Substance 3D Painterin työstönäkymästä.

Kuva 23. Kontio, Janne 2024. Kuvakaappaus Unreal Engine 4:stä.

Kuva 24. Kontio, Janne 2024. Oma Unreal Engine 4:llä tehty renderöinti 3D-mallista.

Kuva 25. Kontio, Janne 2024. Oma Marmoset Toolbag 4:llä tehty renderöinti 3D-mallista.

Kuva 26. Schmitz, Arno 2023. Creating the Many Faces of Horizon Forbidden West. Guerilla Games. <https://d3d3q8mu99pzk9.cloudfront.net/ArnoSchmitz/Creating%20the%20many%20Faces%20of%20Horizon%20Forbidden%20West.pptx> (viitattu 20.3.2024).

Kuva 27. Kontio, Janne 2024. Kuvakooste omista Unreal Engine 4:llä tehdyistä renderöinneistä.

Kuvat 28–29. Kontio, Janne 2024. Kuvakaappauksia Unreal Engine 4:stä.

Kuvat 30–31. Kontio, Janne 2024. Omia Unreal Engine 4:llä tehtyjä renderöintejä.

Liitteet

Linkki opinnäytetyön teososaan ArtStationissa, jossa on teososassa tehdyistä renderöinneistä korkealaatuisempia versioita:

<https://www.artstation.com/artwork/m8A0xd>