

Opinnäytetyö (AMK)

Tietotekniikan Koulutusohjelma

Peliteknologia

2017

Viljami Saloranta

# LÄMPÖNUKEN MALLINNUS ERI MALLINNUSMETODEJA KÄYTTÄEN

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Tietotekniikan Koulutusohjelma | Peliteknologia

2017 | 37

Yliopettaja Mika Luimula, dosentti

Viljami Saloranta

# LÄMPÖNUKEN MALLINNUS ERI MALLINNUSMETODEJA KÄYTTÄEN

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Turun ammattikorkeakoulun sisäympäristön tutkimusryhmälle 3D-CAD-malli sen käyttämästä lämpönukesta ja tutkia mikä kolmesta eri mallinnusmetodista sopisi heille parhaiten. Tutkimusryhmä käyttää nukkea Ansys CFX -virtausmallinnusohjelmistossa. Työssä vertaillaan kolmea mallinnusmetodia jotka ovat Make a Human -sovellus, 3D-skannaus ja fotogrammetria.

Teoriaosassa käsitellään jokaista mallinnusmetodia sekä muita työhön liittyviä ohjelmistoja. Myös mallinnettavaan lämpönukkeen tutustutaan. Teoriaosassa pohditaan, miksi juuri nämä mallinnusmetodit valittiin opinnäytetyön tekemiseen ja mitä muita mahdollisia ohjelmistoja olisi ollut tarjolla.

Käytännönosassa käydään läpi jokaisen mallinnusmetodin eri vaiheet. Nukke mallinnettiin jokaisella mallinnusmetodilla sekä istuma- että seisoma-asennossa. Käytännönosassa myös käydään läpi, mitä ongelmia mallinnuksessa ilmeni ja miten nämä ongelmat ratkaistiin.

Tulokset osiossa kerrotaan opinnäytetyön tuloksista. Lämpönukke saatiin mallinnettua joka mallinnusmetodilla siihen pisteeseen, että tutkimusryhmä pystyy käyttämään niitä virtausmallinuksissa käyttäen CFX:ää. Tuloksissa myös pohditaan jokaisen mallinnusmetodin vahvuuksia ja heikkouksia.

ASIASANAT:

3D-mallinnus, 3DS MAX, Fotogrammetria, 3D-skannaus, Ansys CFX, Lämpönukke

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Information Technology | Game Technology

2017 | 37

Principal Lecturer Mika Luimula, Adj.Prof.

Viljami Saloranta

## MODELING THERMAL MANIKIN USING DIFFERENT MODELING METHODS

The purpose of this thesis was to produce 3D CAD-model of the thermal manikin that the indoor environment research group of Turku University of Applied Sciences uses and determine which of the three modeling methods would suit them best. The research group uses 3D CAD-models in Ansys CFX fluid flow modeling software to study room air flow patterns and air flows around different objects, like humans. The thesis compares three different modeling methods that are Make a Human software, 3D scanning, and photogrammetry.

The theoretical section of this thesis describes in detail each modeling method and other programs that were used in this thesis. This section also includes research of the modelled thermal manikin. It also discusses why these modeling methods were chosen and what other methods were available.

The practical section of this thesis reviews the modelling steps of each modeling method. The thermal manikin was modelled with each modeling method in sitting and standing posture. This section also reports on the encountered problems which occurred during modeling and how those problems were solved.

As a result, the thermal manikin was modelled and post-processed to the point where the research group can import it easily to CFX and use it in air flow simulations. This was achieved with all three modeling methods. The thesis concludes with reflections on the strengths and weaknesses of each modeling method.

### KEYWORDS:

3D modeling, 3DS MAX, Photogrammetry, 3D-scanning, Ansys CFX, Thermal manikin

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETTY SANASTO</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 3D-MALLINNUSMENETELMÄT JA OHJELMISTOT</b>	<b>9</b>
2.1 Make a Human -ohjelmisto	10
2.2 3D-skannaus	10
2.3 Fotogrammetria	12
2.4 Ansys CFX -virtauslaskentaohjelmisto	13
<b>3 LÄMPÖNUKEN MALLINTAMINEN</b>	<b>15</b>
3.1 Lämpönukke	15
3.2 Mallinnus Make a Human -ohjelmistolla	16
3.3 Mallinnus Structure-sensorilla	20
3.4 Mallinnus fotogrammetrialla	26
<b>4 TULOKSET</b>	<b>30</b>
<b>5 YHTEENVETO</b>	<b>34</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>35</b>
<b>KUVALÄHTEET</b>	<b>37</b>

## KUVAT

Kuva 1. Ihmiskasvojen polygonimalli.	9
Kuva 2. Nukke skannattuna Structure-sensorilla	11
Kuva 3. Mallintaja tutkimassa Darth Vaderin naamiota. (Electronic Arts, 2015).	13
Kuva 4. Sisäympäristön tutkimusryhmän Suvi-nukke (vasemmalla), sisään ja uloshengityksen savuvisualisointeja (keskellä) ja nukken lämpötilat eri ruumiin osissa. (oikealla) (PT teknik.)	15
Kuva 5. Ensimmäinen seisova malli Suvista Make a Human -ohjelmistossa.	17
Kuva 6. Jälkikäsitelty seisova malli Suvista.	18
Kuva 7. Extrude-työkalu.	19
Kuva 8. Istuvan mallin lopullinen versio.	20
Kuva 9. Structure sensori liitettyä iPadiin. (Structure.)	21
Kuva 10. Weld-työkalulla verteksien määrää saatiin vähennettyä yli 50 %:lla.	22
Kuva 11. Structure-skannerin tarkkuus ei riittänyt erottamaan käsiä kyljistä.	23
Kuva 12. Lähempää skannattu pää.	24
Kuva 13. Päällekkäisiä polygoneja.	25
Kuva 14. Jälkikäsitelty istuva malli verkotettuna.	26
Kuva 15. Kuvausasento teipatulla lahkeella.	27
Kuva 16. ReMaken luomat mallit. Vasemmalla ennen korjauksia ja oikealla korjauksien jälkeen.	28
Kuva 17. Fotogrammetrialla luodut mallit. Vasemmalla istuva ja oikealla seisova.	29
Kuva 18. Lopulliset mallit. Vasemmalla Make a Human -mallit. Keskellä 3D-skannatut. Oikealla fotogrammetrialla mallinnetut.	33

## TAULUKOT

Taulukko 1. Mallien vertailutaulukko.	32
---------------------------------------	----

# KÄYTETTY SANASTO

3D	Three Dimensional eli kolmiulotteinen.
CAD	Computer aided design eli tietokoneavusteinen suunnittelu
CFD	Computational Fluid Dynamics eli numeerinen virtausdynamikka
Fotogrammetria	Valokuvausta hyväksi käytävä 3D-mallinnustapa
Polygoni	Verteksien muodostama pinta
Renderöinti	3D-avaruudesta kerätyn tiedon perusteella luotu kuva
Sculptaus	Mallinnustapa jossa 3D-mallia käsitellään kuin savea
Verteksi	Piste 3D-avaruudessa

# 1 JOHDANTO

3D-CAD (computer-aided design) -malleja käytetään nykyään yhä useammalla teollisuuden alalla. 3D-mallit liitetään yleensä peliteollisuuteen, joka onkin suurin 3D-mallien käyttäjä. Peliteollisuuden globaali liikevaihto oli 70 miljardia dollaria vuonna 2015 ja tämä ajaa 3D mallinussovelluksien kehitystä eteenpäin. Toinen suuri 3D-mallien käyttäjä on elokuvateollisuus. Tietokoneanimaatioita käytettiin elokuvissa ensimmäisen kerran 1960-luvulla. (Jonpolygon, 2017.)

Myös muut teollisuuden alat käyttävät 3D-malleja. Arkkitehdit pystyvät näyttämään suunnitelmansa asiakkaille ennen kohteen rakennustöitä. Puolustusvoimat voivat kouluttaa sotilaita simuloitujen taistelutilanteiden avulla. Lentoteollisuudessa käytetään 3D-malleja eri osien testaukseen ennen fyysisien kappaleiden valmistusta. Koneissa on satoja liikkuvia osia, ja näiden valmistaminen ja testaukset maksavat paljon. 3D-malleilla voidaan todeta koneiden toimivuus ennen osien valmistusta, mikä pienentää kustannuksia. 3D-malleilla suunnittelijat ja insinöörit voivat myös visualisoida tuotteita ennen niiden valmistusta. (Jonpolygon, 2017.)

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena tutkia erilaisten menetelmien soveltuvuutta ihmishahmon mallinnukseen. Tarkasteltaviksi menetelmiksi valikoitui Make a Human -ohjelmisto, iPadin Structure skanneri ja fotogrammetria. Eri menetelmien valinnassa painotettiin käytettävyyttä, tarkkuutta ja nopeutta. Työn mallinnuskohteena oli Turun ammattikorkeakoulun sisäympäristön tutkimusryhmän käyttämä lämpönukke. Ryhmä käyttää nukkea erilaisissa ilmanvaihdon ja lämpöolojen tutkimushankkeissa tuottamaan tietoa esim. erilaisten ilmanjakotapojen toiminnasta (epäpuhtauksille altistuminen) ja lämpöviihtyvyydestä (koetut lämpöolot). Yhtenä tutkimusmenetelmänä ryhmässä käytetään CFD-mallinnusta, jossa tarkoista malleista on suurta hyötyä realististen tulosten saavuttamiseksi. Tutkimusryhmällä on tällä hetkellä käytössä karkea malli joka ei muistuta tarkasti lämpönukkea. Tämän vuoksi heillä on tarve saada tarkempi malli, sillä niistä on suurta hyötyä realististen tulosten saavuttamiseksi.

Nukke mallinnettiin käyttäen Make a Human -ohjelmistoa, joka on avoimen lähdekoodin hahmonluomistyökalu. Nukke mallinnettiin myös iPadiin liitettävällä Structure-skannerilla, minkä jälkeen sitä jälkikäsiteltiin 3DS MAX -ohjelmistossa. Kolmas mallintamiseen käytetty metodi oli valokuvausta apuna käytävä fotogrammetria, jossa mallinnettavasta kohteesta otetaan useita valokuvia, joiden perusteella ohjelmisto luo 3D-mallin.

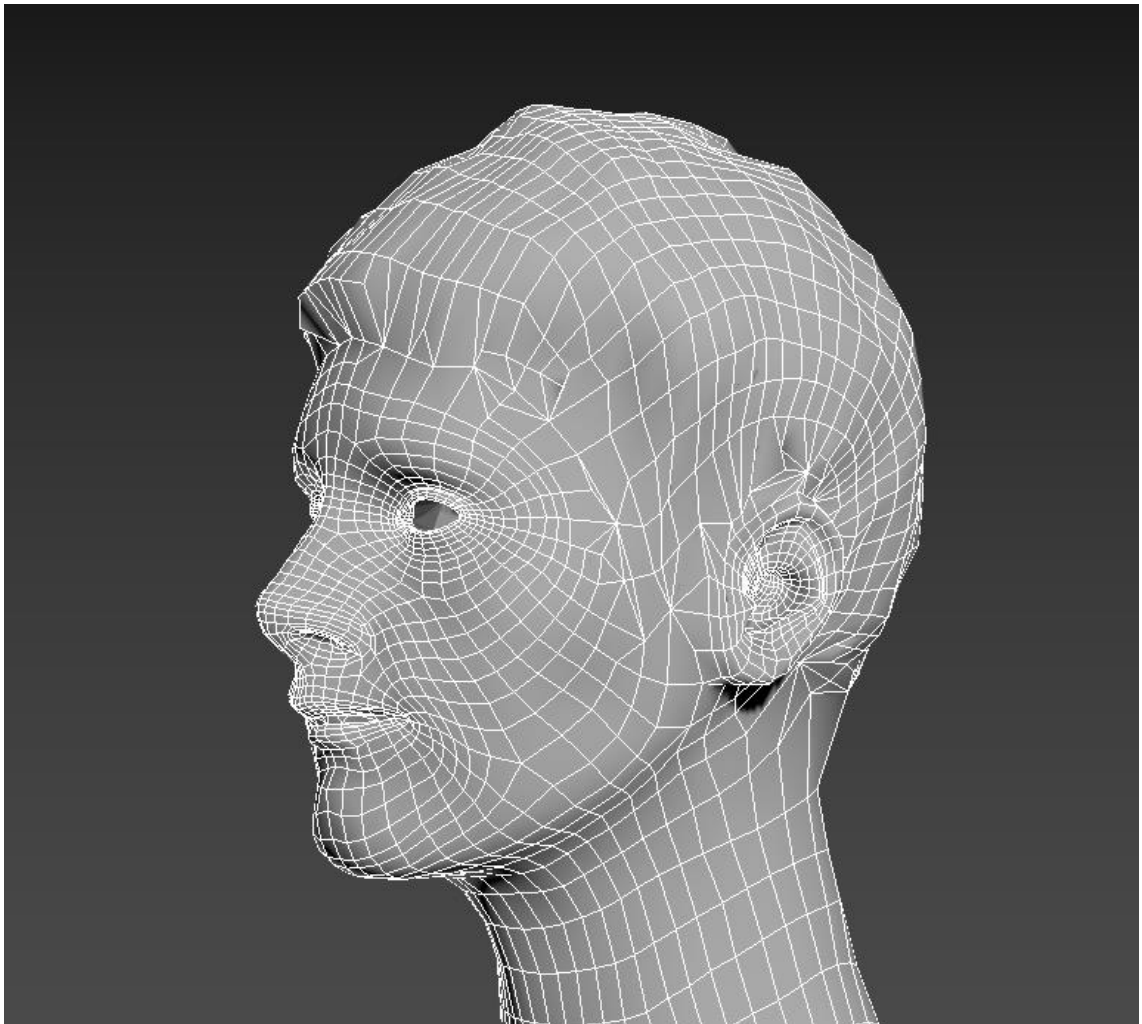
Teoriaosassa kerrotaan mallinnusmenetelmistä sekä 3D-mallinnuksesta yleisesti. Teoriaosassa tutustutaan myös mallinnettavaan nukkeen sekä Ansys CFX -ohjelmistoon ja sen käyttötarkoitukseen. Ansys CFX on virtausmallinnus ohjelmisto, jolla voidaan laskea ilmavirtauksia.

Käytännönosassa kerrotaan työn etenemisestä joka mallinnusmetodin aikana. Käytännönosassa kerrotaan, mitä ongelmia kussakin mallinnusmenetelmässä oli ja miten ongelmat ratkaistiin.

Tuloksissa kerrotaan, miten opinnäytetyö onnistui ja mitä ongelmia lämpönuken mallintamisessa ilmeni. Tuloksissa myös pohditaan, mitä vahvuuksia ja heikkouksia kullakin mallinnusmenetelmällä oli.

## 2 3D-MALLINNUSMENETELMÄT JA OHJELMISTOT

3D-mallinnus on esineiden, ihmisten, eläimien tai minkä tahansa muun objektin luomista tähän erikoistuneella ohjelmistolla. 3D tarkoittaa three-dimensional, eli kolmiulotteista. Toisin kuin 2D-mallinnuksessa, eli piirtämisessä, 3D-mallinnuksessa mukaan tulee z-akseli. Näiden x-, y- ja z-koordinaattien avulla tietokone, tai mallintaja luo pisteitä 3D-mailmaan, joiden perusteella tietokone pystyy luomaan verteksejä. Verteksit ovat liitoksissa toisiinsa ja muodostavat pinnan joka on useimmiten kolmion tai nelikulmion muotoinen. Tätä pintaa kutsutaan polygoniksi, ja näistä malli muodostuu. Tätä mallinnustapaa kutsutaan polygoni-mallintamiseksi (kuva 1) ja suurin osa 3D-malleista tehdään tällä tavalla, koska tietokoneet pystyvät renderöimään ne nopeasti. (Slick, 2016.)



Kuva 1. Ihmiskasvojen polygonimalli.

Esimerkiksi skulptaus on yksi mallinnusmetodi, jossa 3D-mallia työstetään ikään kuin savea. Skulptaus voidaan aloittaa esimerkiksi kuutiosta ja kuution eri kohtia työntämällä tai vetämällä saadaan aikaan erilaisia muotoja. 3D-malliin voi myös lisätä "savea" haluamiinsa kohtiin, jolloin malliin saa lisää materiaalia. (Autodesk, 2016.)

3D-mallinusta varten on monia tähän erikoistuneita ohjelmistoja, joista muutamat ovat saatavilla ilmaiseksi. Tämän opinnäytetyön mallinnukset tai niiden jälkikäsitteilyt on kaikki tehty Autodeskin 3DS Max -mallinnusohjelmistolla. Opinnäytetyössä käytettiin myös muita Autodeskin ohjelmistoja.

## 2.1 Make a Human -ohjelmisto

Make a Human on avoimen lähdekoodin hahmonluomisohjelmisto. Sillä pystyy muokkaamaan luotavan hahmon eri ominaisuuksia, kuten ikää, pituutta, painoa sekä sukupuolta. Sovelluksessa on käytetty hyväksi vartalon tutkimusta, joka on kestänyt 12 vuotta. Tämän 12 vuoden ajan sovellusta on kehitetty käyttäjien, kokeiden tulosten sekä kokeilujen perusteella. (Make a Human.)

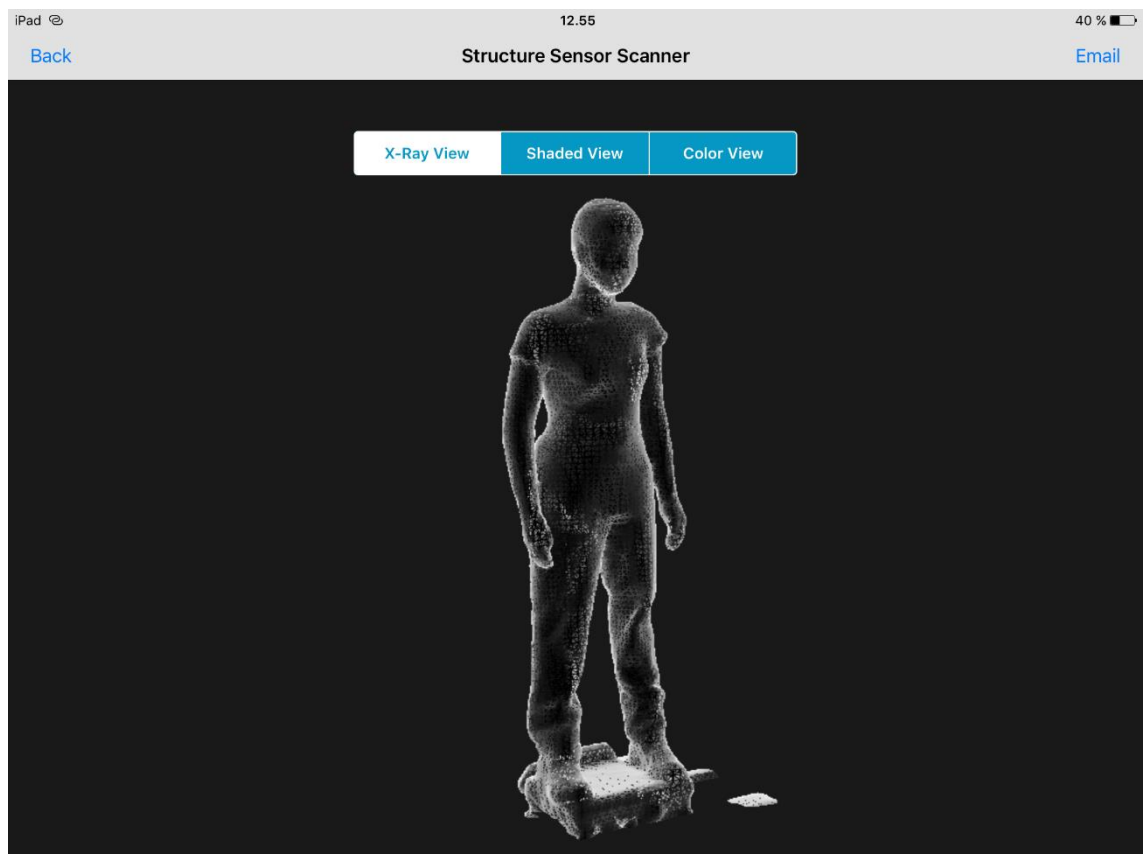
Markkinoilla on myös muita hahmonluomisohjelmistoja, kuten Adobe Fuse. Adobe Fuse on työpöytäsovellus, jonka avulla voidaan luoda personoituja ja korkealaatuisia 3D-malleja minuuteissa. Make a Human valittiin opinnäytetyön tekemiseen Adobe Fusen sijaan siksi, että Adobe Fuse on maksullinen ohjelmisto jonka kehitysversion saa käyttöön ilmaiseksi, kunnes sovellus on valmis myyntiin (Adobe). Make a Human on ilmainen ohjelmisto ja se käyttää CC0-lisenssiä, jonka takia malleja voi käyttää mihin tarkoitukseen vain ilman tekijänoikeus- ja tietokantalakien asettamia rajoituksia. (Creative Commons.)

## 2.2 3D-skannaus

3D-skannaus on objektiin koskematon ja sitä vahingoittamaton mallinnustapa joka digitaalisesti mallintaa objektin fyysiset ominaisuudet käyttäen laservaloa apunaan. 3D-laserskanneri luo pistepilvidataa objektin pinnasta (Laser Design.). 3D-skannauksella voidaan myös tallentaa objektin tekstuurit. 3D-skannauksella objektista saadaan tarkka ja samankokoinen malli kuin skannattava objekti. Skannauksen jälkeen skannattu objekti voidaan vielä jälkikäsitellä 3D-mallinnusohjelmistossa esimerkiksi 3D-tulostusta varten.

Kuluttajille on saatavilla erilaisia 3D-skannereita, ja kuluttajat ovat niistä entistä kiinnostuneempia. Esimerkiksi Structure Sensor, jota käytettiin opinnäytetyön tekemisessä, keräsi Kickstarter-kampanjallaan yli miljoona dollaria 3 515 lahjoittajalta. (Kickstarter.) Structure sensori on iPadiin kiinnitettävä lisälaitte, jolla käyttäjä voi skannata objekteja. Structuren ominaisuuksiin kuuluvat objekti-skannauksen lisäksi huone-skannaus.

Opinnäytetyössä päätettiin käyttää Structure sensoria 3D-skannauksiin, koska sen kokonaiskustannukset jäivät pieniksi. iPad ja siihen liitettävän sensorin kokonaiskustannukset jäisivät alle 1 000 euron. Laitteita ei kuitenkaan tarvinnut hankkia erikseen, sillä ne saatiin lainaksi Turku GameLabilta, joka on osa Turun ammattikorkeakoulua. Markkinoilla on muita 3D-skannereita, joita myös harkittiin työn tekoon. Yksi näistä eli Artecin valmistama Eva skanneri. Skannerin tarkkuus on 0,5 mm, ja se kuvaa skannattavasta objektista myös tekstuurit. Artec Evaa ei kuitenkaan valittu kustannussyistä. Skannerin hinta on 13 700 euroa. (Artec 3D.)



Kuva 2. Nukke skannattuna Structure-sensorilla

### 2.3 Fotogrammetria

Fotogrammetria on tekniikka, jossa prosessoidaan kuvia, joiden avulla luodaan erittäin tarkka 3D-malli. Siihen on monta lähestymistapaa, mutta kaikissa niissä otetaan kuvia oikeasta esineestä ja viedään ne fotogrammetria-ohjelmistoon, joka luo kuvien perusteella 3D-mallin. (Electronic Arts, 2015.)

Fotogrammetria (engl. photogrammetry) -nimi koostuu sanoista photo, gram ja metry, jotka tarkoittavat valoa, piirtoa ja mittausta. (Walford, A. 2007.)

Kun mallinnettavasta esineestä otetaan kuvia vähintään kahdesta kuvakulmasta, tietokone pystyy matemaattisesti luomaan nämä pisteet kolmiulotteiseen kordinaatistoon. Tätä metodologiaa kutsutaan kolmiomittaukseksi ja fotogrammetria ohjelmistot pystyvät selvittämään yhdestä kuvasta useampia pisteitä kerralla. (Geodetic.) Pieniä objekteja kuvattaessa riittää, että kohteesta otetaan 20–60 kuvaa. Mitä suurempi objekti on, sitä enemmän kuvia tarvitaan. (Blizard, B. 2014)

Fotogrammetriassa on myös tärkeää, että valokuvissa on tarpeeksi päällekkäisyyksiä. suositukseksi on, että jokaisessa kuvassa on noin 50 % samaa kuin edellisessä kuvassa. Muita huomioon otettavia asioita ovat valaistus, toistuvat muodot, läpinäkyvät kohteet ja kohteen paikallaan pysyminen. (Blizard, B. 2014)

Fotogrammetrialla on nopeaa ja helppoa luoda korkealaatuisia 3D-malleja. Sillä saadaan myös vangittua erilaisien esineiden tietty ilme ja tunnelma. Tämä oli yksi syy miksi fotogrammetriaa käytettiin Star Wars Battlefront -pelin 3D-mallien luomisessa. Mallintajat pääsivät LucasArtsin studiolle kuvaamaan elokuvien rekvisiittaa, joiden avulla he pystyivät luomaan tarkat kopiot näistä peliin. Fotogrammetriaa käytettiin myös pelin maisemien luomiseen, sillä mallintajat kävivät elokuvien kuvauspaikoilla kuvaamassa puita, kiviä ja maaston muotoja. (Electronic Arts. 2015.)



Kuva 3. Mallintaja tutkimassa Darth Vaderin naamiota. (Electronic Arts, 2015).

Fotogrammetria valittiin opinnäytetyön tekoon sen nopeuden ja kustannustehokkuutensa ansiosta. Ohjelmistot saatiin käyttöön opiskelijalisenssillä, sekä valokuvaukseen tarvittavat välineet löytyivät tutkimusryhmältä entuudestaan. Ohjelmistona käytettiin Autodeskin valmistamaa ReMake ohjelmistoa. ReMake on korkealuokkainen ratkaisu, kun tavoitteena on luoda valokuvien avulla korkealaatuisia 3D-malleja. ReMaken avulla malleja voidaan käsitellä ennen kuin ne viedään 3D-mallinnusohjelmistoon. (Autodesk ReMake. 2017) Fotogrammetriaan tarvittavien valokuvien valokuvaukseen soveltuu älypuhelimien kamera, mutta tarkemmalla kameralla saadaan aikaisiksi korkealaatuisempia malleja (Blizard, B. 2015).

#### 2.4 Ansys CFX -virtauslaskentaohjelmisto

Ansys CFX -virtauslaskentaohjelmisto on tehokas työkalu, joka tuottaa luotettavasti ja nopeasti tarkkoja CFD-mallinnuksia. CFX on saanut tunnustuksia sen nopeudesta ja tarkkuudesta simuloida pumppujen ja tuulettimien virtauksia. CFX on myös tehokas il-mavirtojen mallintaja. (Ansys, 2017.)

CFX käytetään auto- ja meriteollisuudessa. Se vähentää kuluja, koska muutokset voidaan testata 3D CAD -malleilla tuulitunnelitestauksen sijaan. Ohjelmistoa käytetään nykyään myös ilmastoinnin suunnittelussa, johon pätevät samat ongelmat ja ratkaisut, kuin auto ja meriteollisuudessa. (Ansys, 2017.)

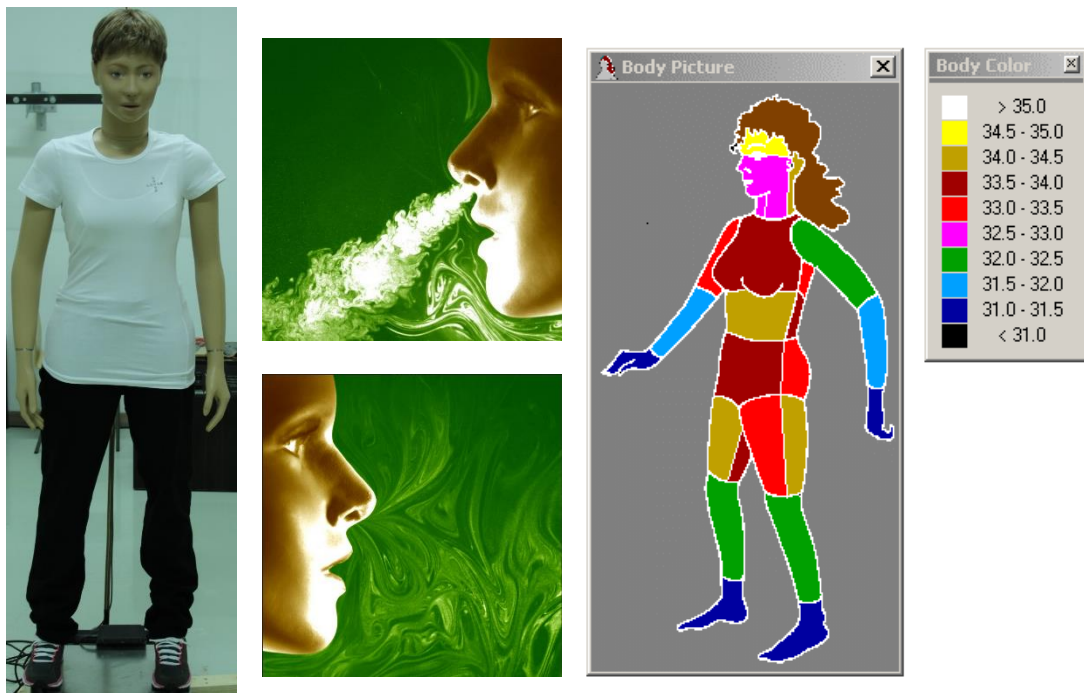
Formula 1 tiimi Red Bull Racing käyttää CFX:ää heidän autonsa kehitystyössä. Red Bull Tehnologyn Steven Nevery sanoo, että CFX on vähentänyt kehityskuluja, sillä enää yrityksen ei tarvitse aina luoda fyysistä prototyyppiä tuulitunnelitestejä varten, vaan nyt se voi tehdä muutoksia auton 3D-malliin ja tehdä testit simulaation avulla. Red Bull tekeekin nykyään enemmän tietokonesimulaatioita kuin fyysisiä kokeita. (Ansysinc, 2010.)

Tämän vuoksi Turun ammattikorkeakoulun sisäympäristön tutkimusryhmä käyttää CFX:ää. Se on kustannus tehokas tapa tutkia ilmavirtoja ja niiden vaikutusta muuhun ympäristöön. Tätä voidaan hyväksi käyttää esimerkiksi toimistojen, sairaaloiden, teollisuuden jne. ilmanvaihdon suunnittelussa.

## 3 LÄMPÖNUKEN MALLINTAMINEN

### 3.1 Lämpönukke

Opinnäytetyössä mallinnettiin sisäympäristön tutkimusryhmän käyttämä lämpönukke, jonka on valmistanut tanskalainen PT Teknik -niminen yritys. Sisäympäristön tutkimusryhmän käyttämän nukken mallinimi on Pernille. Tämä nukke on pituudeltaan 168 cm ja se painaa 20 kg. Nukella on myös nivelet, joiden avulla käsien ja jalkojen asentoa voidaan muuttaa käyttötarkoitukseen sopivaksi. (PT Teknik.)



Kuva 4. Sisäympäristön tutkimusryhmän Suvi-nukke (vasemmalla), sisään ja uloshengityksen savuvisualisointeja (keskellä) ja nukken lämpötilat eri ruumiin osissa. (oikealla) (PT teknik.)

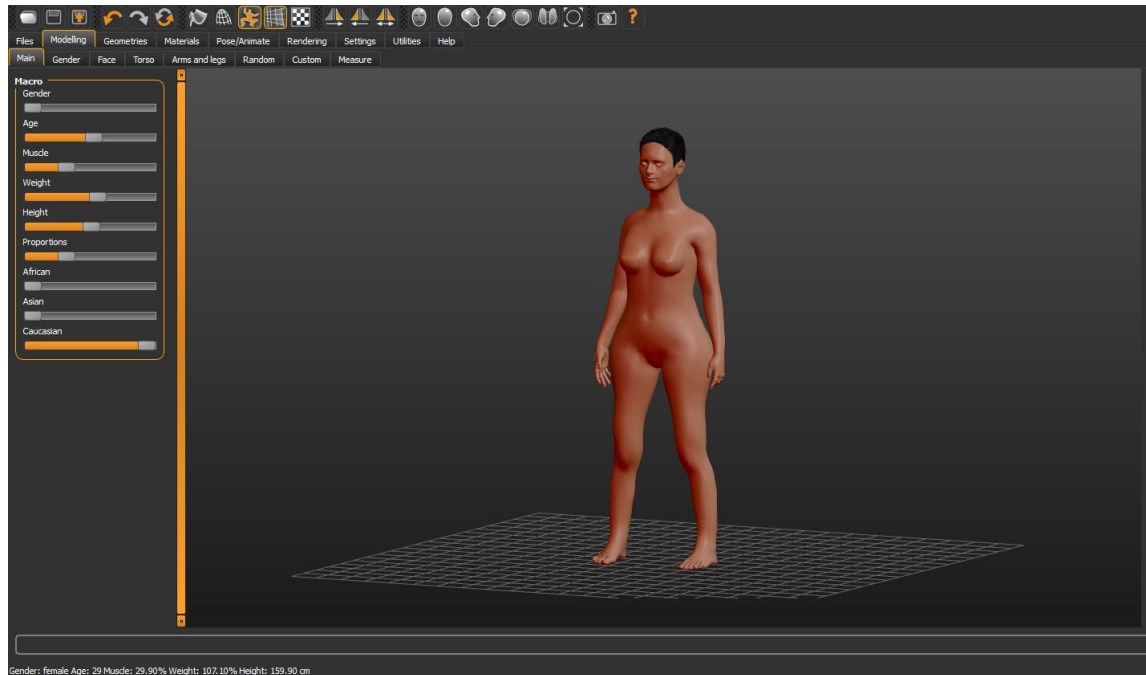
Sisäympäristön tutkimusryhmällä ei ollut käytössä nukken CAD-mallia ja se tarvitsi uuden, mahdollisimman tarkan mallin nukesta, jotta virtausmallinnoksien tulokset olisivat mahdollisimman yhteneviä laboratoriossa suoritettujen mittausten kanssa. Sen tällä hetkellä käytössä oleva malli ei ole käytettävän lämpönukken näköinen. Malli on haettu netistä, ja

siinä on ollut paljon puutteita, kuten reikiä ja yhdennäköisyysongelmia. Ansys CFX -virtauslaskentaohjelmisto on tärkeä osa heidän tutkimustyötään, ja jotta tulokset olisivat mahdollisimman yhteneviä laboratorio mittausten kanssa, tarvitsivat he uuden mallin. Vanhan mallin puutteet aiheuttavat myös paljon turhaa työtä jo ennen kuin virtausmallinnukset aloitetaan.

Malli haluttiin toteuttaa kustannustehokkaalla tavalla, jonka vuoksi mallinnusmetodeiksi valittiin Make a Human -hahmonluomistyökalu, 3D-skannaus sekä fotogrammetria. Koska mallinnustyöt olivat osa opinnäytetyötä, saatiin tätä työtä varten tarvittavat mallinnusohjelmit opetuslisenssin avulla, joka ei maksanut mitään. Make a Human on ilmainen sovellus ja structure skanneri maksaa 379 dollaria (Structure.). Structuren tarvitseman iPadin saa hankittua 419 eurolla (Gigantti.). Fotogrammetriaan tarvittavat ohjelmit saatiin hankittua myös opetuslisenssillä ja kuvaamiseen tarvittava järjestelmäkamera löytyi heiltä jo valmiiksi. Kaikkien mallinnusmetodien yhteiskustannuksiksi tuli siis alle 1 000 euroa.

### 3.2 Mallinnus Make a Human -ohjelmistolla

Lämpönukke Suvin ensimmäiset mallit päätettiin mallintaa Make a Human -sovellusta käyttäen. Tämän osion tavoitteena oli saada Suvia muistuttava 3D-malli, jonka kanssa voidaan tehdä alustavia virtausmallinnuksia ja testata, kuinka helposti mallit saadaan vietyä 3DS Maxista CFX-virtauslaskentaohjelmistoon. Työ aloitettiin ottamalla Suvista mitat mittanauhan avulla. Suvista mitattiin pään, kaulan, rinnan, vatsan ja raajojen ympärysmitat. Tämän jälkeen nämä mitat syötettiin Make a Human hahmogeneraattoriin, joka loi Suvista ensimmäisen luonnoksen.



Kuva 5. Ensimmäinen seisova malli Suvista Make a Human -ohjelmistossa.

Tämän jälkeen malli vietiin 3DS Maxiin jälkikäsiteltäväksi, joka on Autodeskin kehittämä 3D-mallinnussovellus. Mallissa ei ollut jälkikäsitelyn tarvetta, joten se vietiin heti CFX:ään. Viennin jälkeen huomattiin ensimmäinen ongelma. CFX:än verkottaja ei pystynyt tekemään tarpeeksi pientä verkkoa mallin ympärille sen hetkisillä asetuksilla. Mikäli verkotuksen tiheyttä olisi pienennetty, olisi mallin verkotusaika kasvanut liian suureksi.

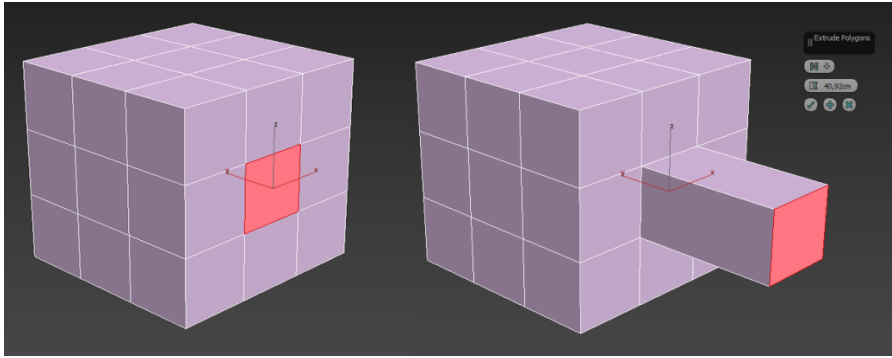
Tämän seurauksena Suvilta piti poistaa varpaat, sekä kaikki paikat missä polygonit ovat liian lähellä toisiaan, tai leikkasivat toisensa. Mallista piti myös poistaa silmät ja kitalaki. Esimerkiksi silmien poistosta syntyneet aukot tukittiin käyttämällä cap-työkalua, joka peittää mallissa olevan aukon luoden siihen polygonin. Muutenkin mallia piti muokata, koska osa hahmosta luotiin erillisinä objekteina, kuten hiukset, jotka piti liittää 3DS Maxissa. Tämä suoritettiin poistamalla osa Suvin kalloa, joka jälkeen verteksit Suvin kallossa ja hiuksissa liitettiin toisiinsa käyttäen bridge-työkalua. Suvin vaatteet päätettiin luoda vain kohottamalla mallin ihoa.



Kuva 6. Jälkikäsitelty seisova malli Suvista.

Jälkikäsitellyn jälkeen Suvi vietiin uudestaan CFX:ään. Tällä kertaa verkottaja sai verkotettua mallin, jonka jälkeen ajettiin testisimulaatio. Simulaatiossa malli laitettiin laatikkoon, johon virtasi ilmaa sisään toisesta päästä ja ulos toisesta (ns. tuulitunneli). Simulaatiossa pyrittiin havainnollistamaan liikkuvan ihmisen taakse syntyvää ilman virtauskenttää eli ns. vanaa, jota se vetää perässään. Testi oli erittäin yksinkertainen, jotta tuloksia saataisiin nopeasti. Testi onnistui hyvin ja tulokset olivat odotetun kaltaiset.

Tämän jälkeen Suvista alettiin tehdä istuvaa versiota. Make a Human oli luonut Suvin sisälle luurangon. Luurangon niveliä kääntämällä malli laitettiin istuvaan asentoon. Tämä kuitenkin aiheutti sen, että monet polygonit leikkasivat toisensa. Nämä ongelmat piti poistaa käsin joko liikuttamalla leikkaavat polygonit erilleen, tai poistamalla nämä kokonaan ja luomaan uusi tilalle. Näiden ongelmien korjaamiseen meni todella paljon aikaa. Suvin alle piti vielä mallintaa toimistotuoli, jolla hän istuu. Tuoli mallinnettiin laatikkomallinnusta käyttäen ja se aloitettiin luomalla viisi sivuinen kuutio, josta extrude-työkalua käyttäen pystytettiin luomaan tuolin jalat. Extrude-työkalu liikuttaa valittua polygonia haluttuun suuntaan.



Kuva 7. Extrude-työkalu.

Kaikki muu paitsi pyörät tuolissa tehtiin extrude-työkalun avulla. Tuolin pyörät luotiin ensin omaksi objektiksi, mutta liitettiin myöhemmin samaksi objektiksi tuolin kanssa. Kun tuoli oli valmis, se liitettiin Suviin bridgeämällä verteksit toisiinsa samalla tavalla kuin hiusten kanssa.

Jälkikäsittelyn jälkeen malli vietiin CFX:ään. Istuvan mallin kohdalla ei tehty virtausmallinnuksia koska seisovan mallin kanssa oli jo todettu, että ne onnistuvat. Tarkastettiin vain, että verkottaja pystyy verkottamaan 3D-mallin riittävällä tarkkuudella ilman liian tiheää verkkoa.



Kuva 8. Istuvan mallin lopullinen versio.

### 3.3 Mallinnus Structure-sensorilla

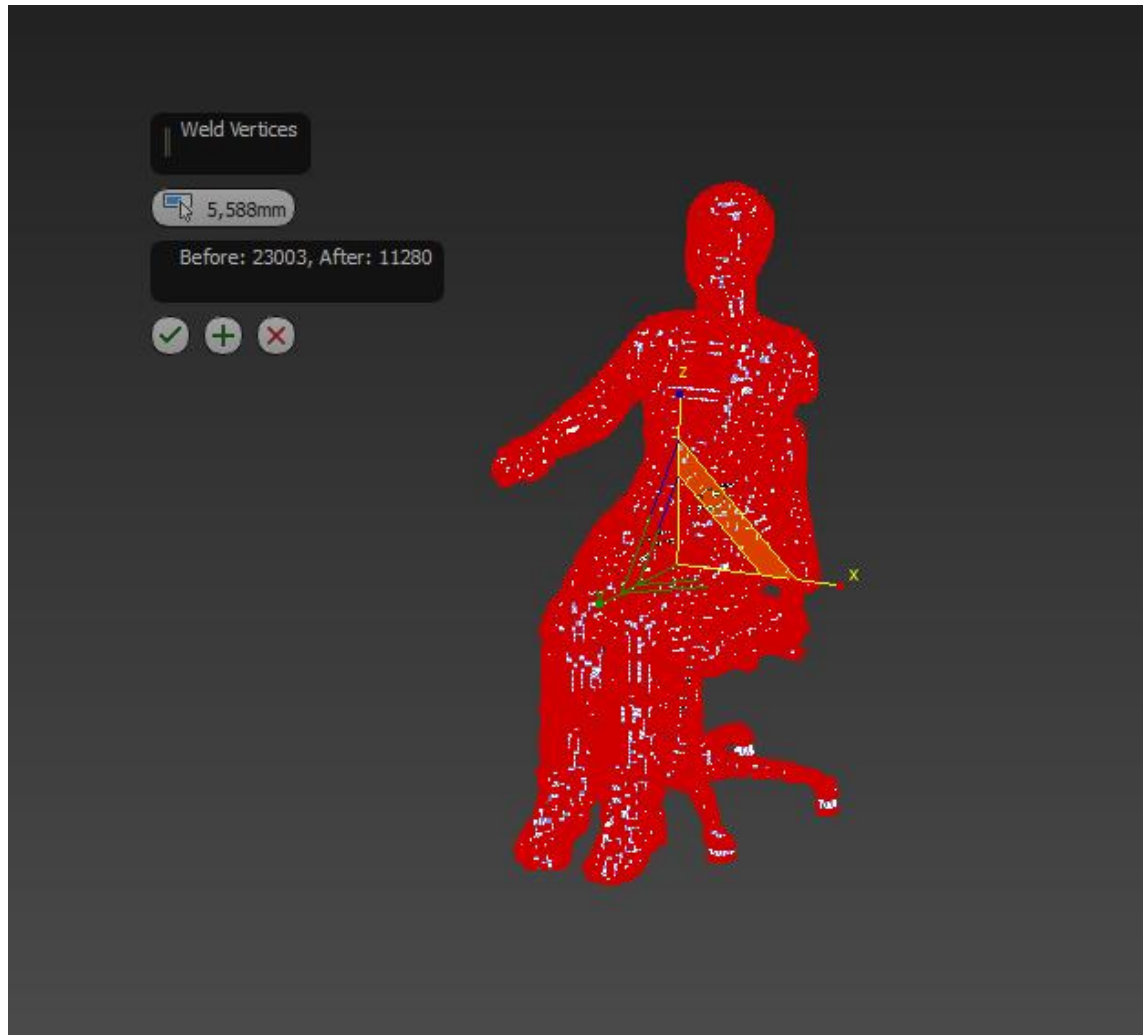
Structure sensori vaikutti mielenkiintoiselta, yksinkertaiselta ja nopealta työkalulta luoda CAD-objekteja. Laite saatiin lainaksi Turun ammattikorkeakoulun pelilaboratoriosta. Heiltä lainattiin myös iPad, jonka sensori vaatii toimiakseen. Tutustuminen laitteeseen aloitettiin skannaamalla pieniä ja yksinkertaisia esineitä, kuten kahvimukeja. Lisäksi perehdyttiin valmistajan tarjoamaan materiaaliin, jossa kerrottiin miten skannaus tuloksesta saa parhaan mahdollisen. Näin saatiin hyvä käsitys siitä, mihin skanneri pystyy ja mitkä ovat optimaaliset olosuhteet skannaamiseen.



Kuva 9. Structure sensori liitettynä iPadiin. (Structure.)

Skannattaessa isoja objekteja menetelmä vaatii suuren tilan, sillä siinä pitää päästä liikumaan kohteen ympäri, jotta se saadaan kuvattua joka puolelta. Tämän takia Suvi asetettiin isompaan huoneeseen, jossa oli myös mahdollisuus kiinnittää hänet katosta roikkumaan. Näin hänet saatiin seisovaan asentoon. Skannaus sujui ongelmitta, ja malli näytti iPadista katsottuna erittäin hyvältä.

Malli siirrettiin tietokoneelle jälkikäsitteilyä varten, jossa huomattiin heti, että Structure sensori oli tehnyt mallin pintaan erittäin tiheää, kolmioista muodostuvaa verkkoa. Tästä syystä malliin tuli tuhansia polygoneja, jotka leikkasivat toisensa. Työ olisi vienyt useita viikkoja, jos nämä virheet olisi pitänyt etsiä ja korjata käsin. Ongelma kuitenkin ratkaistiin käyttämällä weld-työkalua, joka hitsaa verteksejä tai edgejä toisiinsa, jotka ovat toisiinsa mallintajan määrittelemän etäisyyden sisällä.



Kuva 10. Weld-työkalulla verteksin määrää saatiin vähennettyä yli 50 %:lla.

Structure-sensorin skannaus tarkkuus ei ollut tarpeeksi tarkka erottelemaan käsiä vartalosta. Suuret aukot kyynärtaipeen kohdalla havaittiin Structurella, mutta kainaloa lähestyttäessä olivat käsi ja kylki sulautuneet yhteen.



Kuva 11. Structure-skannerin tarkkuus ei riittänyt erottamaan käsiä kyljistä.

Tämä ongelma piti korjata käsin poistamalla polygonit, jotka yhdistivät kättä ja kylkeä, ja tämän jälkeen sulkea syntyneet aukot. Jälkikäsitteilyn aikana huomattiin myös, että kasvot eivät olleet tarpeeksi tarkat. Ongelma ratkaistiin skannaamalla pää uudelleen lähempää, jotta kasvon piirteet tulevat esiin, jonka jälkeen pää liitettiin muuhun vartaloon.

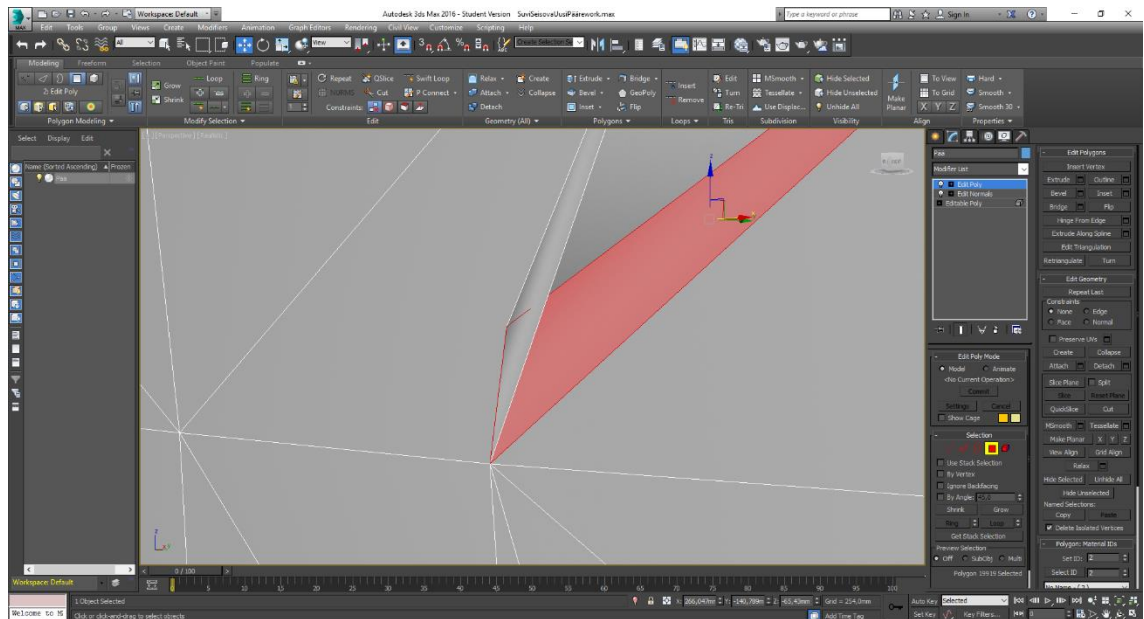


Kuva 12. Lähempää skannattu pää.

Tämän jälkeen seisovan mallin toimivuus varmistettiin verkottamalla se CFX:ssä. Verkottus onnistui ongelmitta.

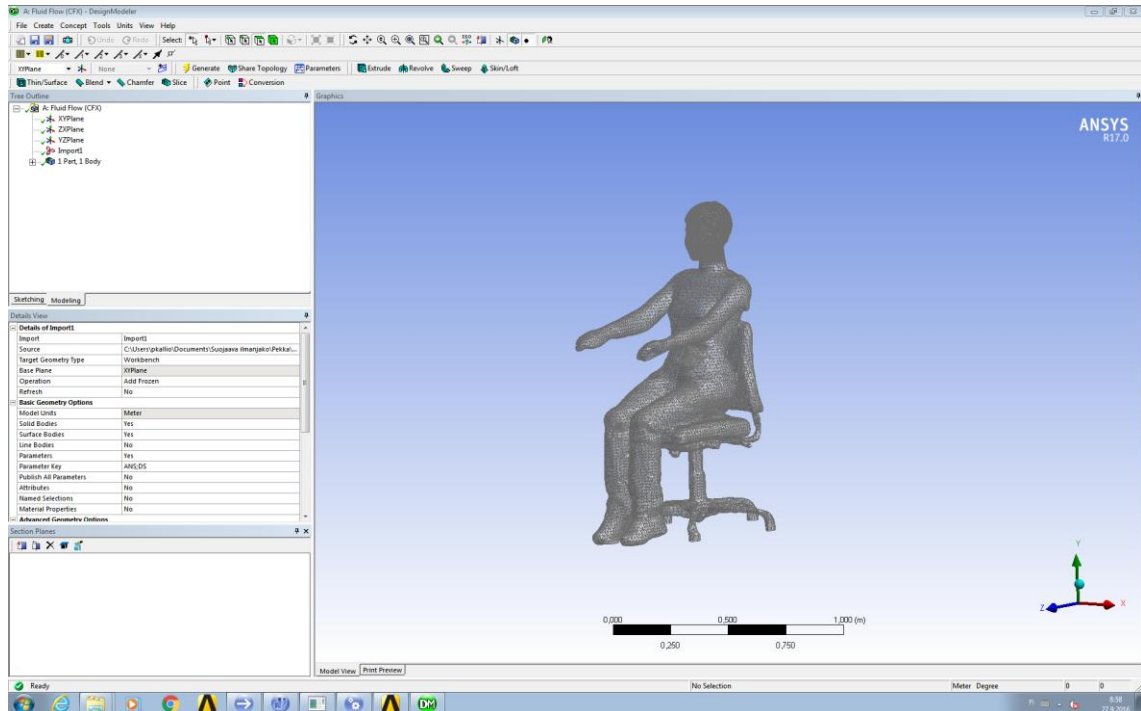
Istuvan Suvin skannaus aloitettiin asettamalla hänet toimistotuoliin. Skannaus vaati enemmän aikaa kuin seisovan Suvin tapauksessa, sillä tuolin muodot vaikeuttivat skannerin tehtävää. Tämän jälkeen skannaus lähetettiin tietokoneelle jälkikäsitteilyyn.

Istuvan mallin jälkikäsitteilyssä toistuivat samat ongelmat kuin seisovan mallin käsitteilyssä. Skannerin luoma verkko oli erittäin tiheää ja polygonit leikkasivat toisiaan.



Kuva 13. Pällekkäisiä polygoneja.

Tähän käytettiin uudelleen weld-työkalua, joka korjasi ongelman. Eniten ongelmia kuitenkin aiheutti toimistotuoli, jolla Suvi istui. Tuolissa oli paljon erilaisia vipuja ja säätimiä, joiden polygonit leikkasivat toisensa. Myös osa tuolin pohjasta oli jäänyt skannauksen ulkopuolelle, jonka vuoksi tuolin pohjaa piti käsin luoda. Istuvaan malliin liitettiin erikseen skannattu pää, kuten tehtiin myös seisovan mallin kanssa. Istuvassa mallissa toistui myös käden ja kyljen yhdistyminen, joka korjattiin käyttäen samoja metodeja kuin seisovassa mallissa. Korjauksien jälkeen malli vietiin CFX:ään, jossa se verkotettiin onnistuneesti.



Kuva 14. Jälkikäsitelty istuva malli verkotettuna.

### 3.4 Mallinnus fotogrammetrialla

Fotogrammetria oli viimeinen mallinnusmetodi, jota käytettiin Suviin. Tutkimusryhmällä oli järjestelmäkamera (Canon 7D), joka soveltui hyvin fotogrammetriaan. Kuvaustyö aloitettiin seisovasta mallista. Suvin kädet haluttiin kurkottavaan asentoon, joten hänen kädet laitettiin narun varaan roikkumaan.

Suvista otettiin noin 200 valokuvaa, jonka jälkeen ne syötettiin Autodesk ReMake -ohjelmistoon. Käytetyn tietokoneen näytönohjain ei ollut tarpeeksi tehokas, jotta kuvat olisi voitu prosessoida paikallisesti. Tämän takia ne piti ladata ReMaken palvelimille prosessoitavaksi. Prosessi kesti monta tuntia ja oli valmis vasta seuraavana päivänä. Jälkikäsitelyssä huomattiin, että ReMake ei osannut erottaa mustia housun lahkeita toisistaan, minkä seurauksena housut olivat yhdistyneet. Ongelma ratkaistiin laittamalla maalarinteippiä toiseen lahkeeseen, jolloin tummat pinnat eivät sulautuneet toisiinsa.



Kuva 15. Kuvausasetto teipatulla lahkeella.

Jälkikäsitellyssä mallin polygonien määrää vähennettiin. Mallissa oli yli 300 000 polygonia, joka oli aivan liikaa. Ansys CFX:llä olisi kestänyt liian kauan prosessoida malli ja simulaatioiden laskemisesta olisi tullut liian raskasta. Tämä ei olisi ollut tehokasta, joten polygonien määrää vähennettiin 80 %:lla 300 000:sta 60 000:een. Näin mallista saatiin tarpeeksi tarkka ja nopeammin prosessoitava. Polygonien määrän saatiin alennettua suoraan ReMakessa, joten tämän jälkeen malli vietiin vielä 3Ds maxiin jälkikäsitelyyn. Jälkikäsitelyssä tarkistettiin, ettei verteksejä ole toistensa päällä. Tämän jälkeen vietiin CFX-ohjelmistoon, jossa se verkotettiin onnistuneesti ja tämän jälkeen siirryttiin työstämään istuvaa mallia.

Viimeisenä kuvattiin istuva malli. Kätet pidettiin eteenpäin ulottuneina niin kuin seisovassa mallissa. Ainoa eroavaisuus oli se, että Suvi laitettiin tuolille istumaan. Suvi valokuvattiin ja kuvat syötettiin ReMake-ohjelmistoon. Kävi ilmi, että kuvia oli otettu liian vähän, minkä seurauksena mallista ei tullut kovin tarkka. Kaula oli vääristynyt, sekä lahkeet olivat hitsautuneet yhteen (sama ongelma kuin seisovan mallin tapauksessa). Ongelmat ratkaistiin laittamalla teippiä molempiin lahkeisiin, sekä ottamalla enemmän kuvia, jotta ReMaken olisi helpompi työstää mallia. Ongelmat ratkesivat ja istuvalle mallille tehtiin

samat korjaukset kuin seisovallekin. Polygonien määrää alennettiin ReMakessa ja 3Ds Maxissa tarkistettiin, etteivät verteksit ole toistensa päällä.



Kuva 16. ReMaken luomat mallit. Vasemmalla ennen korjauksia ja oikealla korjauksien jälkeen.

Päällekkäin olevat verteksit sulautettiin toisiinsa weld-työkalulla. Tämän yhteydessä huomattiin, että tuolin pohja ei ole kuvautunut kunnolla. Tuolin pohjan reikiä piti paikata cap-työkalulla, joka peittää reikiä 3D-malleista. Tuolin pohjasta poistettiin myös useita satoja polygoneja, jotka olivat turhia. Tämän avulla malli saatiin suorituskykyisemmäksi ja viimeistellyn näköiseksi.

Näiden korjauksien jälkeen istuva malli oli valmis. Se vietiin CFX:n verkottajaan ja prosessoitiin onnistuneesti.



Kuva 17. Fotogrammetrialla luodut mallit. Vasemmalla istuva ja oikealla seisova.

## 4 TULOKSET

Työn tuloksena saatiin mallinnukset Suvista istuvassa, sekä seisovassa asennossa käyttäen kolmea eri mallinnusmenetelmää. Jokaisessa mallinnusmenetelmässä oli omat hyvät ja huonot puolensa, joita tässä luvussa avataan.

Make a Human -mallien luomisprosessi oli todella nopeaa. Ohjelmistossa oli selkeät valikot, joita oli helppo käyttää. Vaikka Suvi oli mitattu tarkasti joka puolelta, ei näistä mitauksista ollut suurta apua. Make a Human -sovelluksessa ei voinut syöttää näitä arvoja suoraan valintoihin, vaan esimerkiksi käsien ja reisien paksuus piti arvioida silmämääräisesti. Tämän vuoksi mallista ei tullut kovin tarkkaa kopiota Suvista. Hahmon pituuden sai määrittää 1 cm:n, jolloin mallista saatiin vain pituussuunnassa tarkka. Asentojen asettaminen oli myös ongelmallista tässä sovelluksessa. Hahmon sai luotua luurangon kanssa, jota pystyi muokkaamaan 3DS Maxissa. Nivelien kääntäminen kuitenkin aiheutti sen, että polygonit menivät toistensa päälle. Nämä virheet piti käsin korjata, mikä kulutti paljon työaika. Make a Human teki mallista yksityiskohtaisen silmien, sormien, korvien ja varpaiden alueella. Tämän takia verkottajan verkottamistiheyttä piti pienentää, mikä lisäsi hahmon prosessointitehon tarvetta. Nämäkin ongelmat piti käsin korjata poistamalla liian tarkat alueet, ja korvata ne käsin luoduilla korvikkeilla. Tämän lisäksi istuvalle hahmolle piti käsin mallintaa työtuoli, jossa hahmo istui. Tuolista tuli erittäin yksinkertainen, ja Suvi piti ”liimata” penkkiin, jolla estettiin mahdolliset verkoittamisongelmat, joita aluksi esiintyi. Mallinnusmenetelmän hyväksi puoleksi osoittautui hahmon sisälle luotu luuranko. Tämän avulla mallin käsien asentoa on helppo muuttaa jälkikäteen vastamaan käyttäjän tarpeita. Huonoja puoli menetelmässä oli sen vaatima suuri jälkikäsitteilyn tarve sekä mallin epätarkkuus suhteessa Suviin.

Structure sensorin kanssa mallinnusprosessi erosi Make a Humanista siten, ettei Suvia tarvinnut erikseen mitata. Structuren skannaus sovellusta oli helppo käyttää, ja sen oppi nopeasti. Skannauksella saatiin melko tarkkoja tuloksia, joissa esimerkiksi vaatteiden rypyt näkyivät mallissa selkeästi. Structure myös teksturoi mallin automaattisesti, mutta tälle ei ollut tarvetta tässä työssä. Skannausprosessi oli helppo ja nopea. Mallin sai lähetettyä sähköpostiin suoraan iPadiltä, joten johtoja tai muistitikulla siirtelyä ei tarvittu. Skannatut mallit vaativat kuitenkin paljon jälkikäsitteilyä. Skannauksen luoma malli oli täynnä verteksejä, jotka leikkasivat toisiaan. Skannauksen tarkkuus oli myös ongelmallista joissain kohdissa. Vaikka sileistä pinnoista oli hyötyä esimerkiksi rinnan ja jalkojen

alueella, aiheutti se kuitenkin ongelmia paikoissa, joissa välit olivat pieniä, kuten käsien ja kylkien välit. Näiden erotteluun kului paljon aikaa, sillä työ piti tehdä manuaalisesti eikä siihen löytynyt sopivaa työkalua 3DS Maxista. Istuvassa mallissa ongelmaksi koitui tuoli, koska sen asennonsäätövivut ja -kytkimet olivat todella ohuita ja pieniä ja ne aiheuttivat sensorille ongelmia. Jotkut kytkimet se skannasi ja joitain ei. Nämä piti kaikki poistaa ja vain selkeimmät voitiin jättää viimeiseen malliin. Myös työtuolin pohja oli pahoin vääristynyt, mikä osittain johtui vaikeasta skannausasennosta. Istuvassa mallissa esiintyivät myös samat ongelmat kuin seisovassa mallissa. Hyvää tässä mallinnusmenetelmässä oli sen nopeus, tarkkuus ja helppous. Myös tekstuurit näyttivät hyviltä, vaikka niitä ei tässä työssä tarvittu. Huonoja puolia olivat skannerin kyky skannata ahtaita alueita, kuten käsien ja kylkien välit. Mallit myös vaativat paljon jälkikäsitteilyä joka hidasti mallien käyttöönottoa.

Fotogrammetriassa mallinnettavan objektin luomiseen käytettiin kameraa. Mallinnusmenetelmän opettelu oli helppoa ja nopeaa. Suvista otettiin toistasataa valokuvaa eripuolilta nukkea, jotka syötettiin Autodeskin ReMake ohjelmistoon, joka loi kuvien perusteella kuvauskohteesta mallin. Mallit on mahdollista luoda kuvien perusteella paikallisesti koneella, mutta ne on myös mahdollista luoda Autodeskin palvelimilla, jolloin omalta koneelta ei vaadittu suurta laskentatehoa. Sovellusta oli helppo käyttää, ja siitä löytyi valmiiksi paljon hyödyllisiä työkaluja mallin esikäsittelyyn. Ohjelmisto kertoi mallin polygonien määrän ja niitä pystyi vähentämään haluttuun määrään erittäin helposti. Tämän seurauksena mallin tekstuurit voivat kärsiä, mutta sillä ei ollut väliä tässä työssä. Fotogrammetrian luomat mallit olivat erittäin tarkkoja ja yksityiskohtaisia. Sovelluksesta löytyi myös työkalut, joiden avulla mallia pystyi tasoittamaan ja leikkaamaan haluttuja kohtia pois. Tämä vähensi jälkikäsitteilyn tarvetta suuresti. Malleissa esiintyi kuitenkin samoja ongelmia kuin skannatuissa. Malleissa ainoa jälkikäsitteilyä vaativa asia oli verteksien päällekkäisyys. Fotogrammetrian heikkous pienitehoisilla tietokoneilla oli mallien luomisen hitaus. Malleja ei voitu luoda paikallisesti ja mallien prosessointi palvelimilla kesti useita tunteja. Tästä syystä mallista ei saatu välitöntä palautetta vaan mahdolliset mallinnusvirheet huomattiin vasta useiden tuntien kuluttua, jolloin niihin voitiin reagoida. Mallinnusmenetelmä oli hidas, mutta erittäin tarkka. Myös jälkikäsitteily helpottui ReMaken omien korjaus työkalujen ansoista. Muita positiivisia asioita fotogrammetrialla mallinnettaessa oli sen kyky mallintaa muutakin kuin pelkästään Suvi. Tämän avulla voitaisiin mallintaa esimerkiksi kokonaisia huoneita ja siellä olevia esineitä ja hahmoja tarkasti.

Kaikissa mallinnusmenetelmissä oli omat hyvät ja huonot puolensa. Jos pohditaan, mikä mallinnusmenetelmistä vaati vähiten jälkikäsitteilyä, niin fotogrammetria olisi paras. Myös tarkkuuden puolesta fotogrammetria oli paras näistä kolmesta. Fotogrammetrian tarkkuus oli kuitenkin joissain kohdissa ongelmallinen. Esimerkiksi kuvauksen aikana laakkeet piti erottaa toisistaan teipillä ja nämä teipit tulivat näkyviin mallin pintaan. Fotogrammetria ei kuitenkaan ollut nopein tai helppokäyttöisin mallinnusmenetelmä. Structure skanneri oli erittäin käyttäjäystävällinen tapa mallintaa ja jopa ensikertalainen voi saada sen avulla nopeita ja tarkkoja tuloksia. Nämä mallit kuitenkin tarvitsisivat paljon jälkikäsitteilyä ennen kuin ne olivat käyttökelpoisia virtauslaskenta ohjelmistossa. Mallien pinnat olivat kuitenkin sileät ja niissä oli vaatteiden ryppyjä. Make a Human oli myös nopea ja käyttäjäystävällinen, mutta siitä saadut mallit eivät olleet yhteneviä mallinnettavan kohteen kanssa. Tämä johtuu siitä, että sillä ei mallinnettu Suvia, vaan luodaan kokonaan uusi hahmo.

Taulukko 1. Mallien vertailutaulukko.

	Make a Human: Istuva malli	Make a Human: Seisova malli	Structure: Istuva malli	Structure: Seisova malli	Fotogrammetria: Istuva malli	Fotogrammetria: Seisova malli
Polygonien määrä	12 528	11 605	38 868	29 406	96 350	70 517
Jälkikäsitteilytarve	1	1	2	3	2	3
Helppokäyttöinen	3	3	3	3	2	2
Mallinnseläkkeiden hinta	0 €	0 €	999 €	999 €	349,90 €	349,90 €
Mallinnseläkkeiden hinta	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Mallin tarkkuus	1	1	3	3	3	3

Asteikko 1-3

1: Huono

2: Neutraali

3: Hyvä



Kuva 18. Lopulliset mallit. Vasemmalla Make a Human -mallit. Keskellä 3D-skannatut. Oikealla fotogrammetrialla mallinnetut.

## 5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Turun ammattikorkeakoulun sisäympäristön tutkimusryhmälle 3D-malli heidän käyttämästä lämpönukesta. Ryhmä käyttää nuken 3D-mallien CFX-mallinnuksissa. Malli luotiin käyttäen kolmea eri mallinnusmetodia, joiden vahvuuksia ja heikkouksia vertailtiin. Mallinnusmenetelmät olivat Make a Human -sovellus, 3D-skannaus sekä fotogrammetria. Näiden pohjalta myös tutkittiin mikä olisi tutkimusryhmälle parhaiten sopiva mallinnusmenetelmä nopeaan ja kustannustehokkaaseen 3D-mallintamiseen.

Mallinnukset onnistuivat hyvin ja lopputulokset olivat haluttuja. Jokainen mallinnus kuitenkin vaati jälkikäsittelyä. Tämä ei ollut kuitenkaan ongelmallista, sillä 3DS Maxin käyttö oli entuudestaan tuttua. Malleille tehtiin tarvittavat jälkikäsittelyt, minkä jälkeen ne vietiin CFX:ään verkotettavaksi. Verkotuksen valmistuttua varmistuttiin, että malleja voidaan käyttää CFX-mallinnuksissa. Mallinnukset onnistuivat hyvin ja mitään ei tehtäisi toisin, jos saataisiin aloittaa alusta.

Make a Human -mallinnusmenetelmä, 3D-skannaus ja fotogrammetria osoittautuivat hyviksi työkaluiksi luoda 3D-malleja nopeasti, joilla ensikertalainenkin voi saada tarkkoja tuloksia aikaan. Jokainen menetelmä kuitenkin vaatii mallien jälkikäsittelyä. Parhaaksi mallinnusmenetelmäksi valikoitui Structure-sensori, joka oli erittäin käyttäjäystävällinen, nopea sekä tarpeeksi tarkka vastaamaan ryhmän vaatimuksia. Structure-sensori soveltuu myös erinomaisesti pienien esineiden mallinnukseen, joten tulevaisuudessa tutkimusryhmä voisi mallintaa muitakin kohteita, kuten kahvikuppeja, pöytiä tai tuoleja, käytettäväksi Ansys CFX -simulaatioissa.

## LÄHTEET

- Adobe. Adobe Fuse. 2016. Viitattu 15.4.2017 <https://helpx.adobe.com/fuse/faq.html?promoid=XKMMHJ7Y&mv=other>
- Ansys. Ansys CFX. 2017. Viitattu 15.4.2017 <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-CFX>
- Ansysinc. Red Bull Racing Formula 1 / F1 and ANSYS Engineering Software. 2010. Viitattu 16.4.2017 <https://www.youtube.com/watch?v=yjiSNaqZLps>
- Artec 3D. Artec Eva. Viitattu 16.4.2017 <https://www.artec3d.com/3d-scanner/artec-eva>
- Autodesk. Sculpting. 2016. Viitattu 16.4.2017 <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Maya/files/GUID-246B90C9-914F-4EC6-8317-349AF2DE90F7-htm.html>
- Blizard, B. The Art of Photogrammetry: How To Take Your Photos. 2014. Viitattu 15.4.2017 <http://www.tested.com/art/makers/460142-art-photogrammetry-how-take-your-photos/>
- Creative Commons. CC0 "No Rights Reserved". Viitattu 15.4.2017 <https://creativecommons.org/share-your-work/public-domain/cc0/>
- Gigantti. iPad 32 GB WiFi. Viitattu 16.4.2017 <https://www.gigantti.fi/product/tietokoneet/tabletit-ja-ipad/IPADM2F2KNA/ipad-32-gb-wifi-tahtiharmaa>
- Electronic Arts. How we used Photogrammetry to Capture Every Last Detail for Star Wars™ Battlefront™. 2015. Viitattu 15.4.2017 <http://starwars.ea.com/starwars/battlefront/news/how-we-used-photogrammetry>
- Geodetic. The basics of photogrammetry. Viitattu 15.4.2017 <http://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry.aspx>
- Jonpolygon. Industries Utilizing 3D Models. Viitattu 15.4.2017 <https://jonpolygon.com/who-uses-3d-models/>
- Kickstarter. Structure Sensor: Capture the World in 3D. Viitattu 15.4.2017 <https://www.kickstarter.com/projects/occipital/structure-sensor-capture-the-world-in-3d>

Laser Design. 3D Scanning Technology — Hard Work That Looks Like “Magic”. Viitattu 15.4.2017 <https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>

Lievendag, N. Structure Sensor 3D Scanner Review. 2016. Viitattu 15.4.2017 <http://3dscanexpert.com/structure-sensor-review-part-1/>

Make a Human. Make a Human Homepage. Viitattu 15.4.2017 <http://www.makehuman.org/index.php>

PT Teknik. PT Teknik Thermal Manikin. Viitattu 15.4.2017 <http://pt-teknik.dk/details>

Autodesk ReMake. ReMake homepage. Viitattu 16.5.2017 <https://remake.autodesk.com/about>

Slick, J. 3D Model Components – Vertices, Edges, Polygons & More. 2016. Viitattu 15.4.2017 <https://www.lifewire.com/3d-model-components-1952>

Structure. Structure Homepage. Viitattu 15.4.2017 <https://structure.io/>

Takahashi, D. Video game industry to hit \$70 billion by 2015, but growth will slow. 2010. Viitattu 15.4.2017 <https://venturebeat.com/2010/05/25/video-game-industry-to-hit-70-billion-by-2015-but-growth-will-slow/>

Walford, A. Photogrammetry. 2007 Viitattu 16.4.2017 <http://photogrammetry.com/>

## KUVALÄHTEET

Kuva 2. Electronic Arts. 2015. <http://starwars.ea.com/starwars/battlefront/news/how-we-used-photogrammetry>

Kuva 4. PT Teknik. <http://pt-teknik.dk/details>

Kuva 9. Structure. <https://structure.io/press>