

Jyri Jernström

# Fotogrammetria osana tuotantoa

Case: lyhytelokuva *Gonthrion*

---

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Medianomi

Viestinnän koulutusohjelma

Opinnäytetyö

18.5.2015

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Jyri Jernström Fotogrammetria osana tuotantoa - Case: lyhytelokuva <i>Gonthrion</i> 36 sivua + 2 liitettä 18.5.2015
Tutkinto	Medianomi
Koulutusohjelma	Viestinnän koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	3D-animointi ja -visualisointi
Ohjaaja	Lehtori Jaro Lehtonen
<p>Projektin tavoitteena oli selvittää fotogrammetrian hyödyntämistä elokuvatuotannossa 3D-mallinnusvaiheen nopeuttamisessa. 3D-skannaustekniikat ovat nykyään edullisia ja saatavilla 3D-graafikoille. 3D-skannaustekniikat ovat yhä enemmän käytössä muissakin kuin suuren budjetin elokuvatuotannoissa, myös pelikehityksessä.</p> <p>Tässä työssä käydään lyhyesti läpi eri 3D-skannaustekniikat, niiden ominaisuudet sekä käyttösovellukset viihdeteollisuudessa. Työn pääaihe on näyttelijän 3D-mallin tuottaminen lähifotogrammetrian avulla elokuvatuotannon jälkityöstövaihetta varten. Työ ei ota huomioon näyttelijän kasvojen tarkkaa mallintamista.</p> <p>Opinnäytetyön tekijä toteutti <i>Gonthrion</i>-lyhytelokuvan näyttelijöiden valokuvauksen fotogrammetriaa varten elokuvan kuvauksissa keväällä 2013. Tavoitteena oli nopeuttaa mallinnusprosessia ja saavuttaa haluttu lopputulos nopeammin kuin perinteisillä mallinnusmenetelmillä. Työssä käydään läpi fotogrammetriaan toteuttamiseen liittyviä haasteita ja annetaan neuvoja, kuinka välttää ongelmatilanteita.</p> <p>Fotogrammetria on viime vuosina kehittynyt varteenotettavaksi 3D-skannaustekniikaksi, jolla on mahdollista päästä laadukkaisiin lopputuloksiin. Vaativia mallinnusprosesseja on mahdollista nopeuttaa huomattavasti. Fotogrammetrian toteuttaminen vaatii suunnittelua ja harjoittelua, mutta oikein toteutettuna se mahdollistaa halutun lopputuloksen. Fotogrammetria on hyödyllinen työkalu kaikille 3D-graafikoille.</p>	
Avainsanat	Fotogrammetria, 3D-skannaus, digital double, tuotanto

Author(s) Title Number of Pages Date	Jyri Jernström Photogrammetry as Part of Production - A Case Study of <i>Gonthrion</i> Short Film 36 pages + 2 appendices 18 May 2015
Degree	Bachelor of Arts
Degree Programme	Media
Specialisation option	3D animation and visualization
Supervisor	Jaro Lehtonen, Senior Lecturer
<p>This final project highlights the benefits and limitations of using photogrammetry to aid computer-generated production process (CG), especially in asset creation. High quality 3D scanning is rapidly becoming an affordable technology for 3D artists and it is increasingly used also outside Hollywood-scale film productions, even in the game industry.</p> <p>The work briefly describes the most common 3D scanning technologies, their differences, and their applications in the entertainment industry. The main emphasis of this work is on the use of close-range photogrammetry for constructing a full body 3D model of an actor. For the purposes of this project, it was not necessary to animate accurate facial features.</p> <p>The author planned and implemented the photo scanning of all the actors during the filming of <i>Gonthrion</i> in February 2013 and June 2013. The objective was to speed up the post-production process of creating digital doubles of the actors for full-CG sequences in the film. The work reflects on the challenges faced during the process and gives advice on how to avoid them.</p> <p>Photogrammetry has quickly evolved into an affordable, precise and flexible 3D scanning technology, which is scalable for a wide range of uses. It can significantly speed up the production processes of assets and is not limited to a single use case. Photogrammetry requires planning and preparation to yield the desired outcome, but is nevertheless an indispensable tool for 3D artists.</p>	
Keywords	Photogrammetry, 3D scanning, digital double, production

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Keskeiset käsitteet	3
3	Optiset 3D-skannaustekniikat	4
3.1	Laser	6
3.2	Lidar	7
3.3	Valkoinen valo	9
3.4	Fotogrammetria	10
4	Sovellukset viihdeteollisuudessa	12
4.1	Elokuvat	13
4.2	Pelit	15
4.3	Digital doubles	19
5	Case: Gonthrion - Fotogrammetria tuotannossa	21
5.1	Fotogrammetrian workflow Agisoft Photoscannilla	23
5.2	Valmistelut	24
5.3	Näyttelijöiden valokuvaus	25
5.4	Valokuvamateriaalin käsitteleminen	26
5.5	Lopullisen mallin tuottaminen	28
6	Pohdinta	29
	Lähteet	32
	Liitteet	
	Liite 1. Fotogrammetrialla tuotettu 3D-malli	
	Liite 2. Näyttelijän 3D-mallin tuottaminen	

## 1 Johdanto

Lähestyn opinnäytetyössäni fotogrammetrian soveltuvuutta ja käyttöä realistisen 3D-mallin tuottamisessa näyttelijästä elokuvatuotannon jälkityöstöä varten. Tarkoitus on esitellä, kuinka itse toteutin näyttelijöidemme fotoskannauksen lyhytelokuva *Gonthrionin* VFX-tuotannossa, miksi päädyin nimenomaan fotogrammetrian käyttöön, mitkä edut ja haitat havaitsin tekniikassa ja mitä olisin tehnyt jälkiviisaana toisin. Haluan pureutua aiheeseen nimenomaan 3D-graafikon teknisestä ongelmanratkaisun näkökulmasta, eli kuinka toteuttaa hahmon 3D-malli mahdollisimman tehokkaasti ja nopeasti ottaen huomioon elokuvatuotannon tarpeet mallin teknisen toteutuksen suhteen.

Olen ollut *Gonthrion*-lyhytelokuvaprojektin alkuvaiheista asti mukana lyhytelokuvan VFX:n suunnittelussa ja toteutuksessa. Fotogrammetria oli minulle täysin uusi tekniikka, kun otin sen käyttöön efektien työstövaiheessa. Projektia tehdessä havaitsin tekniikan monipuoliset hyödyt 3D-graafikon työkaluna ja aloin ihmetellä, miksi tekniikkaa ei ollut esitelty meille sen tarkemmin koulussa. Oma toteutukseni tekniikasta ei ollut kovin onnistunut, mutta aihetta sen jälkeen tutkittuani opin, mitä olisin voinut tehdä toisin ja säävuttaa paljon käyttökelpoisemman ja tarkemman lopputuloksen. Tekniikan käytöstä on monia esimerkkejä elokuvatuotannon alalta ja viime aikoina myös pelialalla. Uskon, että tekniikka tulee yleistymään erilaisissa käyttötarkoituksissa niin elokuva- kuin pelialallakin. Kokisin sen hyödyttävän kaikkia linjamme opiskelijoita, jos heillä olisi paremmat lähtötiedot tekniikan suhteen.

Suuri innoittaja fotogrammetriaan perehtymiseen on ollut Infinite Realities ja heidän jakamansa tieto skannausjärjestelmien suunnittelusta ja rakentamisesta. Infinite Realities on näyttelijöiden skannaukseen ja taltiointiin liittyvien palveluiden myymiseen erikoistunut yritys. Heidän kehittämänsä ja rakentamansa skannausjärjestelmä perustuu lähifotogrammetriaan ja on yksi alan edistyksellisimmistä esimerkeistä tekniikan kaupallistamisesta.

Tässä opinnäytetyössä ei selvitetä tarkemmin itse fotogrammetrian teknisiä periaatteita vaan sen sovelluksia 3D-tuotannon haasteiden ratkaisuihin. Esittelen myös lyhyesti yleisimmät 3D-skannaustekniikat ja niiden sovellukset viihdeteollisuudesta, jotta lukija saa yleiskäsityksen, kuinka fotogrammetria vertautuu muihin 3D-skannaustekniikoihin. Opin-

näytetyöni on suunnattu erityisesti elokuva-alasta ja VFX:stä (visual effects) kiinnostuneille 3D-graafikoille, joilla on jo hallinnassa perusteet 3D-grafiikan tuottamisesta ja ymmärrys digitaalisesti tuotetun sisällön liittämistä kuvamateriaaliin. Opinnäytetyöni keskittyy nimenomaan esittämään fotogrammetrian käytön hyödyt elokuvatuotannon ympäristössä.

Esittelen luvussa kolme lyhyesti eri optiset 3D-skannaustekniikat ja niiden ominaisuudet. Käyn luvussa neljä läpi optisten skannaustekniikoiden sovellukset viihdeteollisuudessa ja esittelen tarkemmin digital doublejen tekemiseen liittyvät haasteet. Viidennessä luvussa käyn käytännönläheisesti läpi näyttelijän 3D-mallin tuottamiseen fotogrammetrian avulla. Esitän *Gontrion*-lyhytelokuvan tarpeet ja oman ratkaisumme ongelmaan. Kerron kokemuksemme perusteella tekniikan hyvät ja huonot puolet. Tekniikka on hyödynnettävissä myös muihin kuin elokuvatuotannon tarpeisiin, joten uskon, että kuvauksesta on hyötyä muistakin aloista kiinnostuneille 3D-graafikoille. Suurin hyöty on varmasti elokuva- ja pelialasta kiinnostuneille 3D-alan opiskelijoille.

Oma näkemykseni on, että 3D-graafikon yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on ymmärtää ja seurata oman alansa teknologioiden kehittymistä ja olla niistä perillä siihen pisteeseen asti, että ymmärtää niiden mahdollisuudet ja siten osaa valita oikeat tekniikat kuttakin eri tilannetta varten. Nojaan tutkielmassani suurimmaksi osaksi omaan kokemukseeni. Yritän löytää näkemyksieni tueksi mahdollisimman paljon lähdeaineistoa alan osaajilta blogeista, artikkeleista ja videoista.

## 2 Keskeiset käsitteet

Asset – Tuotannossa uudelleenkäytettävä elementti, käsittää yleensä geometrian ja tekstuurimapit.

Chroma key - Kompositointimenetelmä, jolla kuvamateriaalista määritetään värialue, joka muutetaan läpinäkyväksi.

Digital double - Näyttelijän digitaalinen kopio. Viittaa lopputulokseen, jossa näyttelijästä on luotu realistinen 3D-malli jälkityöstöä ja efektejä varten.

Liikkeenkaappaus - Tekniikka, jossa näyttelijän liikkeet tallennetaan digitaaliseen muotoon.

Matte – Jälkityöstövaiheen kuvaan lisättävä elementti, joka sisältää valaistuksen vaikutuksen pintoihin.

Mesh – polygon-verkko, josta 3D-malli koostuu.

PhotoScan - Agisoftin valmistama fotogrammetriaohjelma.

Previs - Previsualization, ennakkovisualisointi. Elokuvatuotannon alussa käytetty työvaihe, jossa kohtauksia tai kuvia suunnitellaan etukäteen 3D-ohjelmilla.

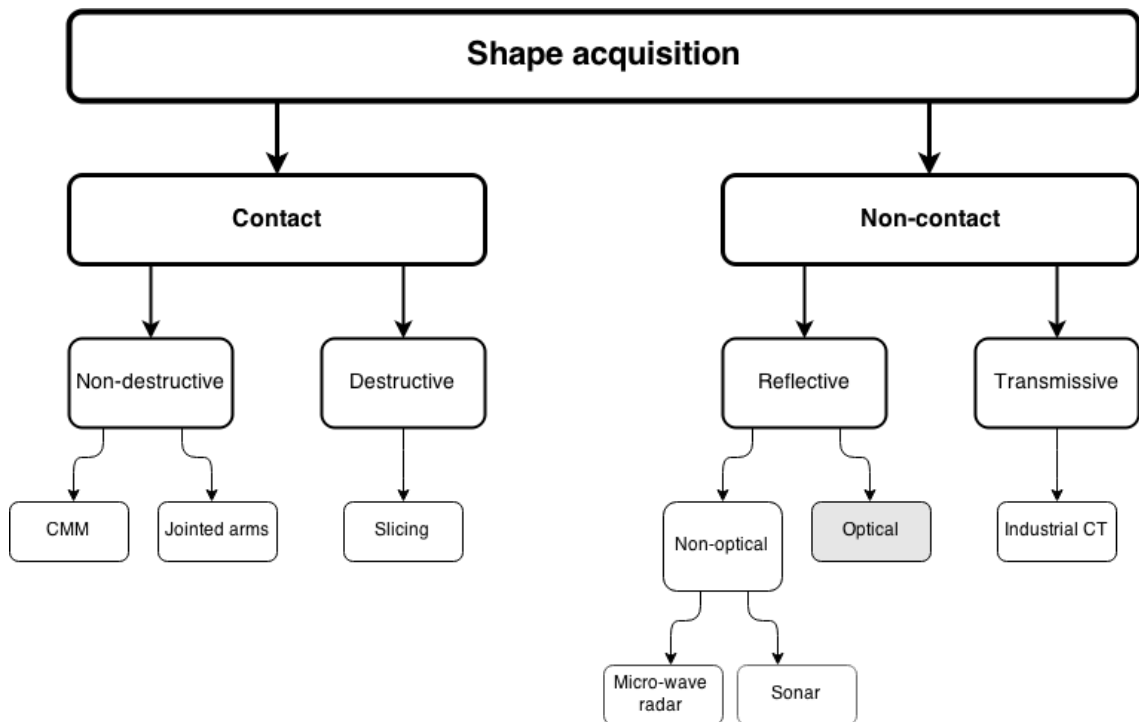
Retopologia - 3D-mallinnuksen vaihe, jossa alkuperäisen meshin pohjalta luodaan uusi käyttökelpoisempi mesh.

Tekstuuriprojisointi - Tekniikka, jossa tekstuurikartta projisoidaan 3D-mallin pintaan ilman UV-koordinaatteja.

VFX - Visual effects, elokuvan kuvauksien jälkeen lisätyt elementit.

### 3 Optiset 3D-skannaustekniikat

3D-skannaustekniikoita on kehitetty kahteen tarpeeseen: tarkkojen mittojen ottamiseen ja pintojen tarkkaan analysointiin. Ongelma on ratkaistu käyttäen hyvinkin erilaisia tekniikoita, jotka soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin. 3D-skannaustekniikat voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: kontaktiin perustuviin ja etähavainnointiin perustuviin (kuvio 1). Etähavainnointiin perustuvat voidaan vielä jakaa heijastaviin ja läpäiseviin tekniikoihin. Optiset järjestelmät perustuvat heijastuvan valon analysointiin. Optisia 3D-skannaustekniikoita ovat Laser, Lidar, valkoinen valo ja fotogrammetria (Gerig 2012, 3). Esitelen tässä luvussa lyhyesti optiset 3D-skannaustekniikat.



Kuvio 1. 3D-skannaustekniikoiden luokittelu.

3D-skannaustekniikat ovat käytössä monella eri teollisuuden ja tieteenalalla. Niitä on kehitetty erilaisia käyttötarkoituksia varten, joissa useimmissa tärkein käyttökohde on ollut mittojen ottaminen kohteesta. Tällaisessa käyttötarkoituksessa ei välttämättä haluta koko kohteesta 3D-mallia vaan pisteen tarkka sijainti. Tällaiset kontaktiin perustuvat laitteet, koordinaattimittalaitteet (CMM), ovat edelleen käytössä teollisuudessa mittojen tarkistamisessa tuotantokappaleissa. (Hoffman 1998.)



Laserin keksiminen on ehkä merkittävin askel 3D-skannausmenetelmien kehityksessä. Ensimmäinen laserskannauslaite kehitettiin muutama vuosi laserin keksimisen jälkeen vuonna 1958. Ensimmäiset varteenotettavat 3D-mallien rakentamiseen kykenevät laitteet kehitettiin vasta 1990-luvulla. (Hoffman 1998.)

Mallien digitointi suoritettiin 1980-luvulle asti käsin kontaktianturilla. Työskentely oli hidasta, varsinkin jos digitoitavan kohteen pinta oli hyvin yksityiskohtainen. (Hoffman 1998.) Laser-skannausjärjestelmät kehitettiin nimenomaan suoriutumaan nopeasti monimutkaisten pintojen digitoinnista. Valoon perustuva analysointi on merkittävästi nopeampaa kuin kontaktianturiin perustuva. Laserin käyttö mahdollisti myös sellaisten kappaleiden skannauksen, jotka eivät kestäneet anturilla painamista. Esimerkiksi pehmeät pinnat olivat käytännössä mahdottomia digitoida tarkasti kontaktianturia käyttäen. (Pelowitz 2014.)

Suurin osa laser-skannauslaitteista soveltaa yhtä kolmesta tekniikasta: piste, ala tai viiva. Näistä tekniikoista viiva-sensoriin perustuva ratkaisu on selkeästi suosituin. Se on nopeampi kuin pisteeseen perustuva ja teknisesti helpompi toteuttaa kuin alaan perustuva. Ensimmäiset laitteet eivät tallentaneet muuta kuin pinnan muodon, mutta 90-luvun loppupuolella kehitettiin ensimmäiset järjestelmät, jotka tallensivat myös pinnan värin. (Hoffman 1998.)

Laseriin perustuva skannaus oli pitkään ainoa nopea ja tarkka tekniikka, mutta tietotekniikan kehitys on johtanut projisointiin perustuvan skannauksen kehittämiseen. Periaate on sama kuin viivaan perustuvassa skannauksessa, mutta yhden viivan analysoinnin sijaan kohteen pintaan projisoidaan säännöllinen kuvio. Kohde on mahdollista skannata yhdestä suunnasta huomattavasti nopeammin kuin laseriin perustuvilla tekniikoilla (Tong 2011). Kuvio projisoidaan yleensä DLP-projektorilla (videotykillä), jonka takia näitä tekniikoita kutsutaan kootusti valkoiseen valoon perustuviksi skannereiksi (Wikipedia 2014a).

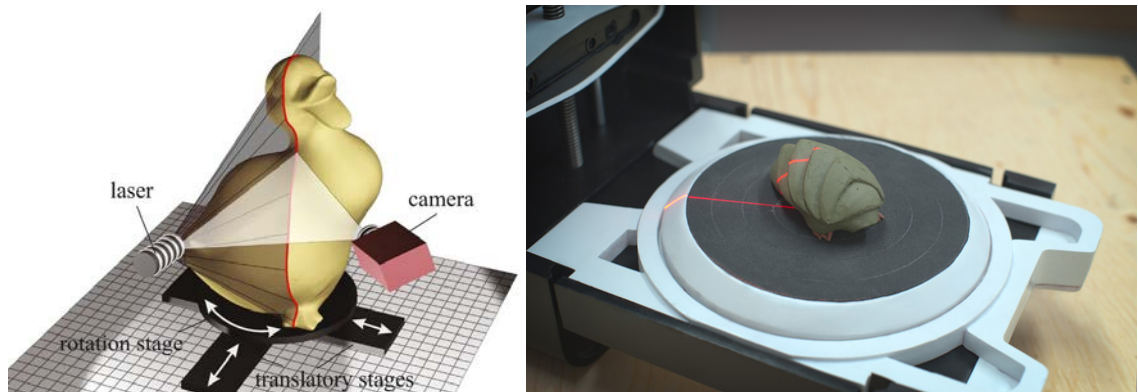
1980-luvulla digitaalisen valokuvauksen kehittäminen ja tietokoneiden laskentatehon kasvu johti valtavaan harppaukseen fotogrammetrian kehityksessä (Hoffman 1998). Aikaisemmin fotogrammetria oli suoritettu erityisillä fotogrammetrialaitteilla ja kalliilla kameroilla. Käyttötarkoitukset olivat lähes yksinomaan lentokoneesta käsin tehtävässä kartoituksessa. Tietotekniikan kehityksen myötä fotogrammetria siirtyi ohjelmistopohjaiseksi ja lähifotogrammetriaa ryhdyttiin kehittämään 3D-skannausmenetelmäksi. Esimerkiksi

arkeologian, restauroinnin ja arkkitehtuurin alalla on tarvetta taltioida kohteita ja esineitä, jotka ovat hauraita tai herkkiä valolle. Näitä kohteita ei välttämättä pysty skannaamaan laserilla, joten valokuvien analysointiin perustuva vaihtoehto on hyvin otollinen käyttökohde.

Kaikilla nykyisillä 3D-skannausmenetelmillä on mahdollista päästä hyvin tarkkoihin lopputuloksiin. Viihdeteollisuudessa skannausmenetelmien mittatarkkuus ei ole niin suuressa roolissa kuin muilla aloilla, joten en tässä opinnäytetyössä käy läpi eri optisten järjestelmien välisiä tarkkuuksia ja virhemarginaaleja. Keskityn kuvaamaan tekniikoiden käyttöön liittyviä ominaisuuksia.

### 3.1 Laser

Laser-3D-skannerit perustuvat laserilla projisoidun säännöllisen kuvion tai viivan analysointiin kohteen pinnalla. Laite koostuu yleensä laserista ja yhdestä tai kahdesta kamerasta. Useimmat laitteet käyttävät pyöritettävää alustaa, jolle skannattava kohde asetetaan (kuvio 2). Skannaus kestää muutaman minuutin kohteen koosta ja skannauksen toivotusta tarkkuudesta riippuen (Alec 2015).



Kuvio 2. Laser-skannauksen periaate.

Käsi­käyt­­töi­siä laser-skannereita on myös tarjolla monelta valmistajalta. Näissä laitteissa skannaus tehdään yleensä ”pyyhkimällä” kohdetta laserlähettimellä. Skannattavat kohteet voivat yleensä olla suurempia kuin kiinteissä järjestelmissä ja skannaus voidaan suorittaa kohteista, jotka ovat muuten hankalasti saavutettavissa. (Creaform 3D 2015.)

Laser-skannereita on saatavilla hyvin monenlaisia. Laitteiden hinta on noin 500 – 50 000 euroa. 3D-tulostuksen myötä markkinoille on ilmestynyt hyvin paljon vaihtoehtoja pienten esineiden skannaukseen tarkoitetuissa laitteissa. Esimerkiksi MakerBot valmistaa 3D-tulostimien lisäksi MakerBot Digitizer –nimistä 3D-laserskanneria, joka skannaa esineitä noin 12 minuutissa. Laite maksaa noin tuhat euroa. (Biggs 2013.) Vastaava tuote Geomagic Capture Scanner Geomagicilta maksaa noin 14 000 USD (3DSystems 2014).

### 3.2 Lidar

Lidar on lyhenne englannin kielen sanoista Light Detection and Ranging. Lidar perustuu laitteen lähettämän laserpulssin heijastumisen mittaamiseen kohteesta. Lidaria käytetään monessa tarkoituksessa, kuten maanmittauksessa ja meteorologiassa. Lidar laitteessa on laser-lähetin, sensori ja pyörivä peili, jota suuntaamalla laite koostaa ympäristöstään pistepilven (kuvio 3). Suurin osa lidar-laitteista käyttää laserissa valon aallonpituutta, joka ei vaadi käyttäjältä suojavarustusta. (Wikipedia 2014e.)

Lidarin yleisimmät käyttökohteet digitoinnin piirissä ovat kartoitus, maanmittaus, arkeologia ja arkkitehtuuri. Lidarilla on mahdollista päästä hyvinkin tarkkoihin tuloksiin. Yleensä mittatarkkuus on muutaman millimetrin luokkaa. Lidar-laitteiden kantama on mallista riippuen muutamasta sadasta metristä kilometreihin, joten lidar soveltuu hyvin suurien kohteiden taltiointiin. Yhden skannauksen suorittaminen kestää useita minuutteja (Seymour 2015).



Kuvio 3. Lidar-laite ja pistepilvi.

Lidar muodostaa ympäristöstään pistepilven, jota voidaan tarkastella tietokoneella (kuvio 4). Lidarin tuottama datan määrä muodostaa oman haasteensa sen käytössä, sillä pistepilvet koostuvat useista miljoonista pisteistä ja ovat raskaita työstää tehokkaallakin työasemalla. Koko kohteen kattava taltiointi vaatii yleensä useamman skannauksen, mikä kasvattaa datan määrää entisestään. Pistepilvi ei itsessään ole myöskään käyttökelpoinen 3D-malli, vaan geometria täytyy rakentaa erikseen pistepilven pohjalta. Sekin on laskennallisesti raskas prosessi. (Seymour 2015.)

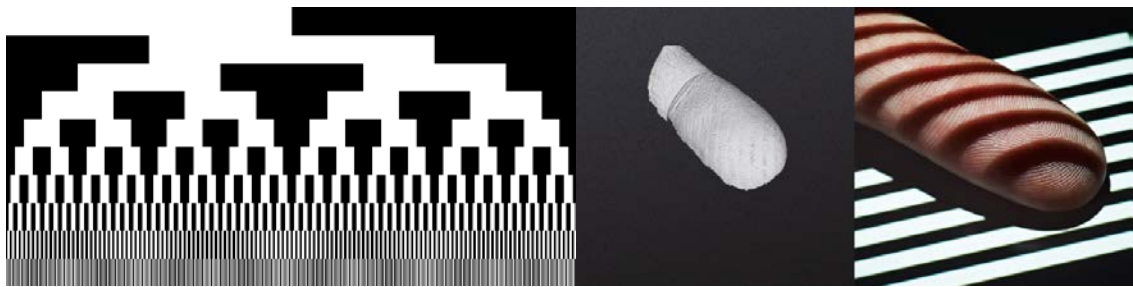


Kuvio 4. Lidarin tuottama pistepilvi yhdestä skannauspisteestä. (Unit C 2015)

Lidar on myös verrattain kallis skannaustekniikka. Lidar-laitteiden hinta on valmistajasta ja mallista riippuen noin 50 000 - 150 000 euroa (Riegl 2015). Laitteen hinta riippuu yksikön kantamasta, tarkkuudesta ja datan tallennustavoista. Useat laitevalmistajat tarjoavat malleja, jotka tallentavat myös väridataa. Näillä laitteilla on mahdollista ottaa skannauspaikoista panoraamakuvat, joista saadaan pistepilven pisteille värit.

### 3.3 Valkoinen valo

Valkoista valoa käyttävä skannaustekniikka muistuttaa periaatteeltaan laser-skannausta. Laserin sijaan kappaleen pintaan projisoidaan DLP-projektorilla mustavalkoinen kuviosarja, jota analysoimalla laite muodostaa kolmiulotteisen mallin (kuvio 5). Tekniikka on merkittävästi nopeampi kuin laseriin perustuva skannaus (Tong 2011). Esimerkiksi ihmisen koko vartalon skannaus kestää noin kaksi minuuttia ja pään noin 20 sekuntia (Ten24 2015). Tekniikalla on mahdollista skannata sellaisiakin kappaleita, joiden pintarakenteet ovat ongelmallisia laserille, kuten kiiltäväpintaiset kohteet (2h3D 2013).



Kuvio 5. Tarkentuva mustavalkoinen kuvio, joka projisoidaan kohteen pinnalle.

Skannaustekniikalla on mahdollista tuottaa hyvin tarkkoja tuloksia. Tarkkuus perustuu kameroiden kennojen tarkkuuteen sekä projektorin tarkkuuteen (Wikipedia 2014a). Skannerit koostuvat usein yhdestä kiinteästä kamera-projektoriyksiköstä ja pyörivästä alustasta, jolle skannattava kohde asetetaan. Markkinoilla on myös saatavilla käsikäyttöisiä laitteita, joilla voidaan skannata suurempiakin kohteita. (Tong 2011.)

Skannaus tapahtuu skannaamalla kappale osissa. Osat asetellaan paikoilleen tietokoneohjelmalla ja yhdistetään lopulliseksi geometriaksi. Tämä työvaihe luo ylimääräisen haasteen kohteen skannaamiseen. Suuri kohde vaatii lukuisia osia koko kohteen skannaamiseen. (Artec 3D 2014.)



Kuvio 6. Artec EVA ja Occipital Structure Sensor.

Markkinoilla on saatavilla monenlaisia valkoista valoa käyttäviä skannereita (kuvio 6). Artec EVA maksaa noin 14 000 euroa, mutta markkinoille on viime aikoina ilmestynyt 500 euron hintaluokan laitteita, jotka pystyvät lähes samaan lopputulokseen (Artec 3D 2014). Tällainen on muun muassa Occipitalin valmistama Structure Sensor, joka on suunniteltu toimimaan Apple iPadin kanssa (Occipital 2015).

Microsoft Kinect lukeutuu myös valkoista valoa käyttäviin skannereihin, vaikka itse tekniikka perustuu infrapunalla projisoidun kuvion analysointiin (Hackengineer 2012). Kinect on monikäyttöinen laite, jolla on tehty monia toimivia 3D-skannausratkaisuja. Ensimmäisen Kinectin kameroiden tarkkuus ei yltänyt kuin karkeiden mallien rakentamiseen. Vuonna 2012 Kinect v2 sisälsi tarkemmat HD-laatuiset kamerat, joiden tarkkuus riittää yksityiskohtaisen 3D-mallin rakentamiseen. Kinect on vartenotettava vaihtoehto kalliimmille laitteille, sillä se maksaa vain 150 euroa. Esimerkiksi Artec myy ohjelmistopakettia, johon voi kytkeä Kinectin Artecin omien skannereiden lisäksi. Monelta muulta valmistajalta löytyy myös vastaavia ohjelmistoja.

### 3.4 Fotogrammetria

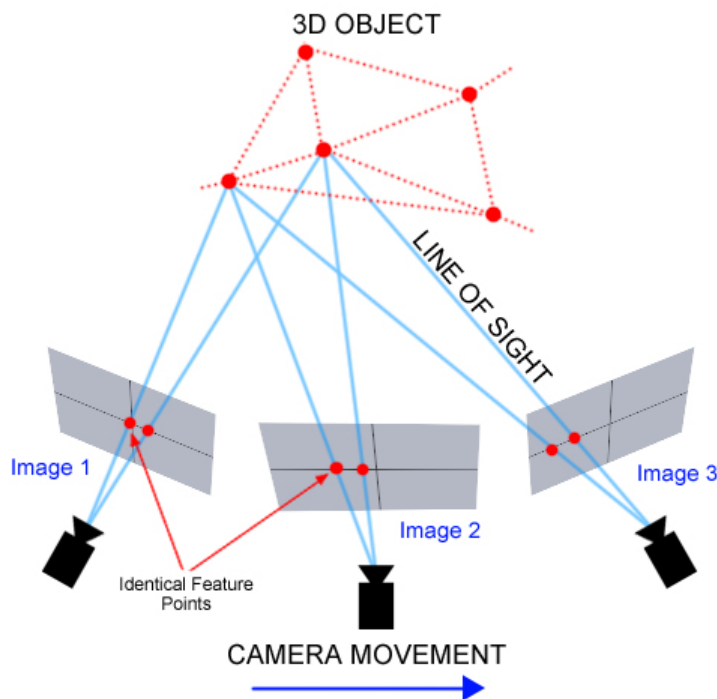
Fotogrammetria on tekniikka, jossa kaksiulotteista (kuva)dataa analysoimalla pyritään selvittämään kohteen kolmiulotteinen muoto tai fyysiset mitat. Tietokoneiden laskentatehon kehittyessä fotogrammetriasta on muodostunut käyttökelpoinen 3D-skannaustekniikka. Tekniikka kehitettiin alun perin maanmittauksen ja kartoituksen tarpeisiin. Fotogrammetrian juuret ovat 1800-luvun loppupuolella, jolloin Albrecht Meydenbauer käytti vuonna 1893 ensimmäisenä termiä fotogrammetria kuvailemaan valokuvien suorittavaa

mittausta. Hän myös kehitti ensimmäisen fotogrammetriaan tarkoitetun kamerasen ja käytti kameraa arkkitehtuurin mittaamiseen. (Center for Photogrammetric Training 2008.)

Ennen 1900-luvun alkua ja lentokoneen keksimistä fotogrammetria suoritettiin erilaisin kuvauslaittein maasta käsin. 1920-luvulla yleistyi kartoitukseen tarvittavien kuvien ottaminen ilmasta lentokoneista käsin. (Center for Photogrammetric Training 2008.) Tietokoneiden laskentatehon ja ohjelmistojen kehitys on vaikuttanut mullistavasti digitaalisen fotogrammetrian yleistymiseen (Luhman 2006, 24).

Nykyään fotogrammetria jaetaan yleensä kahteen luokkaan, ilmafotogrammetriaan ja lähifotogrammetriaan. Ilmafotogrammetriaa käytetään kartoituksessa korkeuskarttojen luomiseen (DEM). Lähifotogrammetria tarkoittaa maasta käsin kuvattujen kohteiden mittaamista (kuvio 7). (Wikipedia 2014c.)

Lähifotogrammetriaa sovelletaan nykyään paljon teollisuudessa koordinaattimittalaitteiden sijaan. Fotogrammetria ei vaadi kohteeseen kajoamista, joten se soveltuu hyvin automatisoitujen linjastojen laaduntarkkailuun. Se on myös monin kerroin nopeampi kuin koordinaattimittalaite. Esimerkiksi autoteollisuuden linjastoon suunniteltu laite voi tarkistaa osista 500 mittauskohdetta 30 sekunnissa (Mapvision 2015).



Kuvio 7. Fotogrammetrian periaate.

Fotogrammetria voidaan suorittaa perinteisillä CMOS-kennoilla varustetuilla kuluttajajärjestelmäkameroilla, mutta tarkkuutta vaativissa toimenpiteissä tieteen ja teollisuuden puolella on käytetty enemmän CCD-kennoilla varustettuja kameroita. CCD-kenno oli pitkään CMOS-kennoa tarkempi kuvanlaadultaan, mutta nykyään CMOS-tekniikka on kehittynyt siihen pisteeseen, että tavalliset järjestelmäkamerat pystyvät lähes samaan tarkkuuteen. (Wikipedia 2014d.)

Lähifotogrammetria perustuu enemmän otettujen valokuvien käsittelyyn kykeneviin ohjelmistoihin kuin itse laitteistoon, joilla valokuvat on otettu. Markkinoilla on tarjolla useita eri valmistajien kehittämiä ohjelmistoja 3D-mallien generoimista varten. Autodesk on kehittänyt tätä varten 123DCatch-ohjelmiston. 123DCatch ei valitettavasti sovellu ammattikäyttöön, sillä kuvien laskenta tapahtuu Autodeskin servereillä ja lasketut mallit julkaistaan Autodeskin pilvipalvelussa. (Autodesk 2013.)

Autodesk julkaisi viime vuonna ammattikäyttöön suunnatun fotogrammetriaohjelmiston, joka pyrkii yhdistämään skannauksen ja geometrian käsittelyn. Autodesk Memento julkaistiin joulukuussa 2014 ja on nyt beta-vaiheessa. (Autodesk 2015.) Acute3D on toinen vastaava ohjelmisto ranskalaiselta kehittäjältä (Acute3D 2014). Photomodeler on toisen valmistajan ohjelmisto. Venäläisen AgiSoftin valmistama PhotoScan on tällä hetkellä yksi markkinoiden pätevimmistä ohjelmistoista fotogrammetrian suorittamiseen.

#### **4 Sovellukset viihdeteollisuudessa**

Käyn tässä luvussa läpi muutaman esimerkin kautta 3D-skannaustekniikoiden sovelluksia viihdeteollisuuden puolella. Viihde-teollisuudessa on käytetty samoja teknologioita kuin muillakin teollisuuden aloilla, joten laitteet ja tekniikat ovat osittain samoja. Viihde-teollisuudessa painoarvo on enemmän pintojen nopeassa ja tarkassa taltioinnissa kuin hyvin luotettavassa mittatarkkuudessa, mikä näkyy käytettävien tekniikoiden painottumisen optisiin 3D-skannaustekniikoihin.

Peliteollisuudessa on viime vuosina alkanut ilmestyä esimerkkejä samojen tekniikoiden hyödyntämisestä pelien sisällön tuottamisessa kuin elokuvatehosteidenkin tekemisessä.



Perinteisesti pelien tuotanto on ollut hyvin käsityöpohjaista, mutta muutama pelituottaja on ottanut käyttöön 3D-skannauksen pelien ympäristön ja hahmojen tuottamisessa.

3D-skannaustekniikkojen käyttöä viihdeteollisuudessa ajaa pääosin halu tuottaa realistisia kuvia. 3D-skannaustekniikoita käytetään silloin, kun jonkin asian tekeminen fyysisesti lavastein ja näyttelijöin on liian hidasta, kallista tai vaarallista. Tuotannoille on houkuttavaa muuttaa jokin oikean maailman asia digitaalseksi kopioksi, jota voidaan muokata mielin määrin tuotannon jälkityöstövaiheessa. (Okun 2010.)

3D-skannauksen käyttökohteet ovat monenlaiset elokuvatuotannoissa, mutta näyttävimmät edistysaskeleet 3D-skannauksen käytössä ovat tapahtuneet ihmisen digitoimisen puolella. Artisteilta täysin realistisen kopion tekemiseen näyttelijästä menisi liian kauan, joten on otettu käyttöön 3D-skannaustekniikat. Näyttelijöiden digitoiminen on mahdollistanut entistä näyttävämpien elokuvien toteuttamisen digitaalisin menetelmin.

#### 4.1 Elokuvat

3D-skannausta hyödynnetään tietenkin muissakin viihdeteollisuuden tuotannon alueissa kuin näyttelijöiden tai hahmojen tuottamisessa (kuvio 8). Elokuvien previsin (previsualisation) tekemiseen käytetään usein fotogrammetriaa sen nopeuden ja kustannustehokkuuden takia. Nykyään myös elokuvien lavasteet skannataan usein Lidarilla elokuvan efektien jälkityöstövaihetta varten (Seymour 2012).

3D-skannauksen on nykyään hyvin arkipäiväistä tehostevetoisissa suuren budjetin elokuvissa. Näyttelijöiden digital doublet ja kaupunkikortteleiden ja lavasteiden lidar-skannaus ovat yleistä jälkituotantovaiheelle. Elokuvien alkutuotantovaiheenkin työstämiseen on otettu käyttöön 3D-skannaus tuottamaan nopeita referenssejä previsin muodossa (Finance 2010).



Kuvio 8. 3D-malli näyttelijän kasvoista taistelukohtausta varten Avatar-elokuvassa.

Matte on kuvattuun materiaaliin upotettu kuvaa muokkaava tai jatkava elementti. Matten ja tekstuurin ero on valaistuksessa. Tekstuureissa pyritään välttämään minkäänlaisia valon käyttäytymisen näyttämistä pinnalla, kun taas matte-elementtiin valon käyttäytyminen tehdään valmiiksi itse kuvaan ja valaistus pyritään tekemään mahdollisimman samankaltaiseksi alkuperäisen kuvan kanssa. Fotogrammetria soveltuu mattejen tekemiseen erittäin hyvin, sillä kuvien ottaminen ei vaadi erityiskalustoa tai vaativia järjestelyitä. Ymmärrys valokuvauksesta ja fotogrammetrian teknisistä vaatimuksista riittää. 3D-graafikko voi hyvin itse tuottaa tarvittavan elementin. (Fry 2014.) Elokuvien previsualisointiin alkutuotannon vaiheessa hyödynnetään myös usein fotogrammetriaa samoista syistä kuin 3D-mattejen tekemisessä (Finance 2010).

Esimerkiksi elokuvan World War Z tuotannossa hyödynnettiin monia 3D-skannaustekniikoita. Elokuvan VFX:n toteutukseen osallistui useita VFX-yhtiöitä, mm. Cinesite, Moving Picture Company MPC, 2h3D ja 4Dmax. 2h3D on tallennukseen ja skannauspalveluihin erikoistunut yritys, jonka vastuulla oli zombie-laumojen tekemiseen käytettyjen näyttelijöiden sekä lavasteiden ja lokaatioiden skannaus jälkityöstöä varten. (Failes 2014.)



Kuvio 9. Zombie-hahmojen pohjana olleita 3D-skannauksia.

Elokuvan zombie-laumat toteutettiin skannaamalla pieni ryhmä ekstroja, joilla määritettiin zombie-hahmojen perusmallit (kuvio 9). Vaatteiden vaihtelua varten ekstroja skannattiin muutama kymmenen erilaisissa asusteissa, joiden avulla luotiin kirjasto erilaisia vaatetuksia. Näitä yhdistelemällä pystyttiin tekemään kustannustehokkaasti monipuolinen zombie-lauma. Elokuva varten skannattiin myös monia lokaatioita ja lavasteita. Esimerkiksi Skotlannista otettiin lukuisia lidar-skannauksia kohteista monimutkaisia kohteita varten. (Failes 2014.)

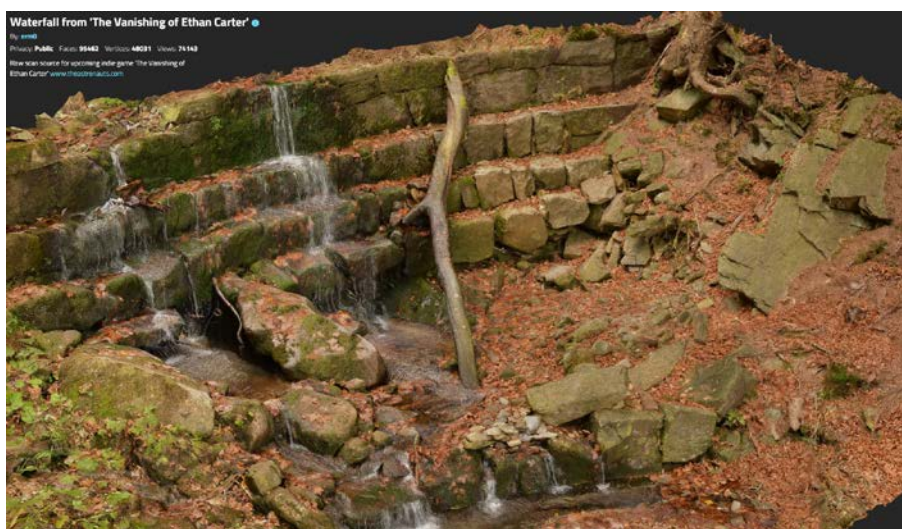
#### 4.2 Pelit

Peliteollisuuden puolelta on viime aikoina ilmestynyt useita mielenkiintoisia esimerkkejä, joissa on hyödynnetty optisia 3D-skannaustekniikoita. The Vanishing of Ethan Carter on The Astronautsien kehittämä ja kesäkuussa 2014 julkaistava PC-peli. Pelimaailma on luotu fotogrammetrian avulla. The Astronauts kuvasi pelin ympäristön mallintamista varten valtavan määrän oikeaa luontoa ja käytti fotogrammetriaa luomaan uskomattoman realistisen pelimaailman (kuvio 10). (Astronauts 2014.)



Kuvio 10. The Astronauts valokuvaamassa luontoa fotogrammetriaa varten.

Pääsyy käyttää fotogrammetriaa juontui huomiosta, että huolimatta siitä, kuinka hyvin pelin artistit maalaavat ja tekevät peliympäristön tekstuurit, ihmisaivot pystyvät havaitsemaan toistuvat kuviot ja immersio pelin maailmaan kärsii. The Astronautsin päätavoite oli luoda maailma, jossa ympäristö sulautuisi yhdeksi kokonaisuudeksi, eikä pelaaja enää huomaisi yksittäisiä asetteja vaan hyväksyisi näkemänsä pelin maailmaksi (kuvio 11). (The Astronauts 2014.)



Kuvio 11. Fotogrammetrialla tuotettu pala oikeaa luontoa.

The Astronautsin tavoite ei kuitenkaan ollut täysin toisintaa todellisuutta dokumentaariin tyylisiin. He eivät käyttäneet skannaamia esineitä ja kohteita suoraan pelimaailmassa, vaan he muokkasivat näitä hienovaraisesti istumaan pelin visuaaliseen tyyliin. Pelissä käytettiin myös perinteisin menetelmin tuotettuja asetteja fotogrammetrialla tuotettujen lomassa (kuvio 12). (The Astronauts 2014.)

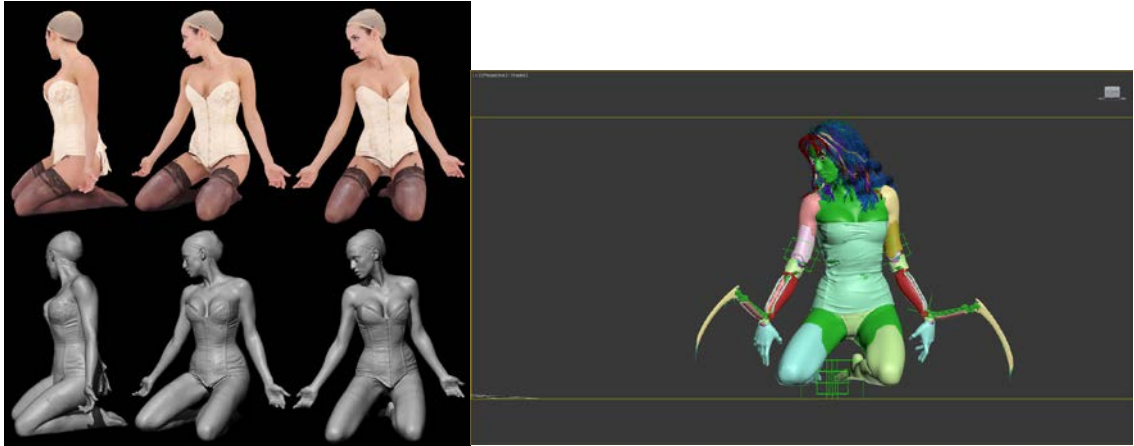


Kuvio 12. The Vanishing of Ethan Carter –pelin pelimaailmaa.

Fotogrammetrialla tuotetut assetit ovat polygonimäärältään erittäin suuria, noin 2-20 miljoonaa polygonia ja skannauksen tuottaman tekstuurin koko on gigapikseleiden luokkaa. Fotogrammetrialla tuotettujen assettien hyödyntäminen pelimootorissa vaatii rankkaa geometrian optimointia sekä tekstuurien pakkaamista. The Astronauts kehitti tätä varten omia työkaluja, joilla prosessointi pystyttiin osaksi automatisoimaan. (The Astronauts 2014.)

Star Wars: Battlefronts on hyvä esimerkki fotogrammetrian käyttötarkoituksesta. Sen sijaan, että pelin kehittäjä DICE olisi mallintanut Star Wars universumin ikoniset alukset uudestaan, he saivat luvan Lucasfilmiltä skannata alkuperäiset elokuvissa käytetyt pienoismallit tallentaen näin Star Warsin alkuperäisten taiteilijoiden näkemyksen ja kädenjäljen. (Hall 2015.)

Platige Image toteutti CD Projekt REDille teaser-elokuvan uudesta kehitteillä olevasta pelistä Cyberpunk 2077. Elokuva päätettiin toteuttaa freeze frame –omaisesti, jossa kamera liikkuu hidastuneessa ajassa kohtauksen läpi. (Platige Image 2013.)



Kuvio 13. Näyttelijän 3D-skannaus ja lopullinen skannauksen pohjalta tehty 3D-malli.

Elokvassa haluttiin viedä tyyppillisen naishahmon suunnittelu pidemmälle ja välttää yleisesti pelejä vaivaavat sudenkuopat naishahmojen suunnittelun osalta (kuvio 13). Elokuva nojaa vahvasti tunnelataukseen, jonka saavuttaminen ilman oikeaa ihmismallia olisi ollut hyvin hankalaa. 3D-skannaus toi autenttisuuden vivahteen hahmoihin, vaikka ne menivät läpi pitkän työstöprosessin. (Platige Image 2014.) Skannauksen käyttäminen mallien luomisessa nosti myös elokuvan laatua tavalla, joka ei olisi ollut muulla tavalla mahdollista.



Kuvio 14. Kuvakaappaus Cyberpunk 2077 -teaseristä.

Lopulliset 3D-mallit tehtiin skannauksesta tuotettujen mallien pohjalta. Fotogrammetrian lisäksi näyttelijöistä otettiin laaja otos referenssivalokuvia. Fotogrammetria toimi projektissa työkaluna, jolla saavutettiin haluttu visuaalinen lopputulos (kuvio 14). (Platige Image 2013.)

### 4.3 Digital doubles

Elokuvien alkuajoista lähtien on haluttu tuottaa myös realistisia ihmishahmoja. Perinteinen tapa luoda digitaalinen ihmishahmo on työläs prosessi, joka vaatii tekijältä taitoa ja kokemusta ja on lopulta lähes mahdotonta saada täysin realistiseksi. Tästä kertoo hyvin ensimmäisten digitaalisten näyttelijöiden outous (Gutierrez 2011).

Paul Debevec ja muut ihmisen digitaalisen toisintamisen tutkijat ovat pyrkineet ratkaisemaan tämän ongelman kehittämällä erilaisia tallennustekniikoita. Kuten kaksiulotteisen kuvan puolella tekniikka on syrjäyttänyt maalauksen ja piirtämisen valokuvakameran muodossa, digitaalisella puolella käsityön puutteet on pyritty ratkaisemaan yhä edistyneemmillä ja tarkemmilla tallennusmenetelmillä ja laskennalla. Debevecin USC:lla tekemä tutkimus, teknologioita kehittävä suuret projektit kuten Avatar ja virtuaalitodellisuuden pyrkivä tutkimus Nvidian puolella ovat johtaneet tekniikoiden syntymiseen, joilla voidaan tuottaa hyvin tarkkoja ja realistisia digitaalisia malleja ihmisestä. (Abrams 2013.) Näissä tapauksissa ei puhuta pelkästään staattisen mallin tuottamisesta vaan ihmisen pehmeiden kudosten oikeiden liikkeiden toisintamista hyper-realismiin saavuttamiseksi.

On siis selvää, että nykyään näyttelijöiden digital doublet on tehokkaampaa tuottaa 3D-skannaustekniikoilla kuin perinteisesti käsin mallintamalla (Finance 2010). 3D-skannauksen teknologioista kerrottaessa keskitytään usein ihmishahmojen tuottamiseen juurikin siitä syystä, että uskottavaan lopputulokseen on erittäin vaikeaa päästä. Ihminen on hyvin herkkä tunnistamaan "epätodellisuudet" ihmiskasvojen toisintamiseen pyrkivissä teoksissa. Uncanny valley on todellinen ilmiö, ja 3D-skannausta käyttämällä kuilu on mahdollista ylittää tehokkaasti ja hallitusti.



Kuvio 15. Infinite Realitiesin fotogrammetrialla tuottama näyttelijän 3D-malli.

Infinite Realities on tutkinut ja kehittänyt perinteisten laseria käyttävien näyttelijöiden skannausmenetelmien rinnalle fotogrammetriaan pohjautuvan monikamerajärjestelmän. Tällainen järjestelmä poistaa muilla keinoilla suoritettavan ihmisen skannauksen ongelmat. Tallennus tapahtuu volumetrisesti ja samalla nopeudella kuin valokuvaus, eli valokuvamallin ei tarvitse olla paikallaan pitkiä aikoja jäykässä asennossa (kuvio 15). (Infinite Realities 2013.)



Kuvio 16. Infinite Realitiesin fotogrammetriajärjestelmä.

Infinite Realitiesien rakentamalla järjestelmällä päästään samaan lopputulokseen kuin paljon kalliimpia 3D-skannaustekniikoita hyödyntävillä järjestelmillä. Järjestelmän etuna on myös hyvin nopea taltiointi, joka mahdollistaa dynaamisten asentojen tallentamisen. Tässä mielessä Infinite Realitiesin järjestelmällä skannaus muistuttaa enemmän perinteistä studiovalokuvausta kuin 3D-skannausta. Järjestelmän ainoa huono puoli on, että se vaatii studiutilan, johon se rakennetaan eikä se siis ole yhtä ketterä kuin käsikäyttöiset skannaustekniikat (kuvio 16). (Tilbury 2012.)



Infinite Realities on erinomainen esimerkki uuden tekniikan soveltamisesta. Järjestelmä on rakennettu käyttäen kuluttajatuotteita, joten kenen tahansa on mahdollista soveltaa samoja periaatteita ja rakentaa samankaltainen järjestelmä omaan käyttöönsä. Infinite Realitiesin perustaja Lee Perry Smith on myös jakanut blogissaan paljon tietoa järjestelmän kehityksen vaiheista ja omista kokemuksistaan Agisoft Photoscanin käyttämisestä ja fotogrammetriaan liittyvien ongelmien ratkaisemisesta. (Infinite Realities 2014a, 2014b.)

## 5 Case: Gonthrion - Fotogrammetria tuotannossa

Gonthrion-lyhytelokuva on Arcadan, Metropolian ja Aalto-yliopiston opiskelijoiden aloittama ja työstämä 10-minuuttinen lyhytelokuvaprojekti. Elokuvan päätarkoitus oli tuottaa näyttävää ja laadukasta elokuvakerrontaa tekniikoilla ja työtavoilla, mitä suomalaisessa elokuvissa harvoin sovelletaan. Elokuvan kuvaukset suoritettiin kahdessa kuvausjaksossa maaliskuussa ja kesäkuussa 2013.

Elokuva varten suunniteltiin oma maailmansa, jonka toteutus päätettiin ratkaista kuvaamalla elokuva green screeniä vasten ja luomalla maailma jälkityöstövaiheessa CG-menetelmin. Elokuvassa on monia laajoja kuvia, jotka vaativat näyttelijöiden 3D-hahmojen käyttämistä. Hahmojen liikkeet toteutettiin liikkeenkaappauksella realistisen liikkeen aikaansaamiseksi. Kaikista pää- ja sivuosanäyttelijöistä tuotettiin realistiset 3D-mallit, yhteensä 10 mallia. Tämän lisäksi suuria joukkokohtauksia varten haluttiin tuhatpäinen ihmisyleisön, joka sekin piti toteuttaa digitaalisesti (kuvio 17).

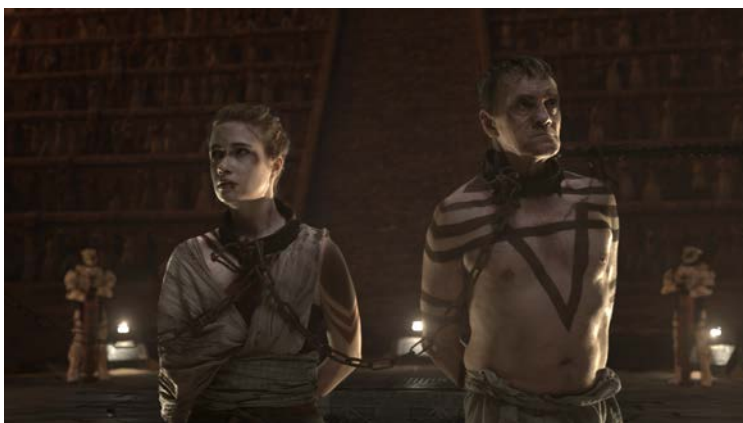


Kuvio 17. Areena-kohtausta varten tarvitsimme näyttelijöistä digitaaliset versiot.

Realistisen hahmon 3D-mallintaminen perinteisin menetelmin on suuri ja haastava prosessi. Todentuntuisen ihmishahmon mallintaminen vaatii myös paljon ammattitaitoa. Tuotettavien mallien määrän vuoksi oli selvää, että 3D-mallien tuottamiselle olisi edullista, jos työvaihetta pystyisi automatisoimaan ja nopeuttamaan.

Päätin selvittää, pystyisikö näyttelijöiden 3D-mallinnusta nopeuttamaan tai suorittamaan kokonaan käyttämällä 3D-skannausta. 3D-skannauksesta on useita eri teknisiä vaihtoehtoja, joiden käyttö vaatii usein kallista laitteistoa. Eri tekniikat soveltuvat myös toisia paremmin tietynlaisiin käyttötarkoituksiin. Tekniikoilla on myös huomattavat hintaerot sekä saatavuus Suomessa.

Tuotannon budjetti oli hyvin rajallinen, joten ulkopuolisten palveluiden ostamista ei voitu harkita. Myös suurin osa 3D-skannaustekniikoista oli hintansa puolesta rajattava pois. Ainoastaan fotogrammetrian oli ominaisuuksiltaan sellainen, että pystyisimme toteuttamaan sen tuotannon puitteissa. Lyhyen testijakson jälkeen totesimme lähifotogrammetrian soveltuvan ominaisuuksiltaan erinomaisesti tarkoituksiimme.



Kuvio 18. Näyttelijät lähikuvassa lavalla.

Koska 3D-mallien lopullinen käyttötarkoitus oli tiedossa etukäteen laajoissa kuvissa (kuvio 18), mallien yksityiskohtaisuudesta pystyttiin tinkimään. Laajoissa kuvissa käytettävien 3D-mallien vaatimukset ovat aivan eri luokkaa kuin lähikuviin tarkoitettujen, joten yksityiskohtaisuudesta pystyttiin tinkimään huomattavasti. Hahmoille ei esimerkiksi tarvinnut tehdä missään vaiheessa kasvoanimaatioita, joten kasvojen mallintamisessa riitti, että kasvonpiirteet olivat riittävän lähellä näyttelijän oikeita piirteitä. Mallien siluetti ja liikkeenkaappauksella tuotettu animaatio olivat suuremmassa roolissa (kuvio 19).

Lopputulos kannalta ei ollut olennaista huolehtia jokaisesta yksityiskohdasta ja monimutkaisesta sheidaamisesta. Teksturointiprosessi voitiin yksinkertaistaa väritekstuurin sekä specular-tekstuurin tekemiseen. Myös geometria voitiin jättää yksinkertaisemmaksi.



Kuvio 19. Näyttelijät laajassa kuvassa.

Päämääränä oli, että pystyisimme fotogrammetrialla nopeuttamaan 3D-mallien toteuttamista. Toivoimme tietenkin, että mallit olisivat mahdollisimman pienellä jälkityöstöllä käytettävissä tuotannossa, mutta tällaiseen lopputulokseen pääseminen ei ollut realistista kokemustasollamme. Käyn seuraavissa alaluvuissa läpi yksityiskohtaisesti oman toteutuksemme ja esitän lopuksi ratkaisuja, joilla voidaan korjata tekemämme virheet.

### 5.1 Fotogrammetrian workflow Agisoft Photoscannilla

Fotogrammetrian työvaiheet jakautuvat tyypillisesti viiteen osioon riippumatta käytetystä ohjelmistosta: valokuvien ottamiseen, valokuvien käsittelyyn, valokuvien kohdistamiseen, geometrian ja tekstuurien generoimiseen ja lopputuloksen tallentamiseen jatko-työstöä varten. Fotogrammetrian onnistumisen kannalta on tärkeää, että valokuvat otetaan tavalla, jolla kuvien välillä on tarpeeksi parallaksia ja yhtenevää kuva-alaa. Kuvien pohjalta tehtävän laskennan kannalta on myös tärkeää, että valotilanne on suhteellisen tasainen eikä kohteessa ole suuria kiiltoja tai kontrastisia varjoja. (Agisoft 2014.)

Kuvista on myös hyvä syvätä pois tausta kuvattavan kohteen takaa. Näin ohjelmiston on helpompaa löytää yhteneviä pisteitä valokuvista ja päästä tarkempaan lopputulokseen geometrian generoimisessa. Valokuvien kohdistamisen jälkeen kannattaa myös poistaa

virheelliset pisteet, joita syntyy kohdistamisen aikana. Tämäkin johtaa tarkempaan lopputulokseen geometrian kannalta.

Lopuksi valokuvien perusteella laskettu geometria ja tekstuuri voidaan tallentaa yleisiin tiedostomuotoihin ja viedä jatkotyöstettäväksi haluttuun 3D-ohjelmaan. Agisoft Photoscanista saa myös tallennettua kohdistettujen kameroiden sijainnit FBX-tiedostona, jolloin kamerakulmia voi käyttää suoraan tekstuuriin projisointiin MARIssa tai Mudboxissa. (Wilson 2014.)

## 5.2 Valmistelut

Fotogrammetriaa varten tarvittiin näyttelijästä valokuvia joka suunnasta. Yksi vaihtoehto olisi ollut kuvata näyttelijät yhdellä kameralla liikkuessa näyttelijän ympärillä. Tällainen järjestely olisi vienyt paljon aikaa, eikä sitä suositella käytettäväksi muiden kuin esineiden valokuvaamiseen fotogrammetriaa varten. Fotogrammetriaa varten otetuissa valokuvissa on tärkeää, että kohde pysyy paikallaan.

Paras vaihtoehto olisi ollut käyttää kymmeniä kameroita, jotka olisi sijoitettu näyttelijän ympärille. Tällaisen järjestelmän rakentaminen ja testaaminen vaatii kuitenkin aikaa sekä tietenkin kaiken tarvittavan kamerakaluston. Näin mittavaan järjestelmään meillä ei ollut varaa eikä aikaa tuotannon puitteissa, joten jouduimme harkitsemaan muita vaihtoehtoja. Löysimme onneksi samaa periaatetta käyttävän ratkaisun, joka ei vaatinut kuin kolme kameraa.

Kamerat kiinnitettiin telineeseen pystysuunnassa samaan linjaan, jolloin pystyimme pyörittämään kuvattavaa kohdetta ja ottamaan valokuvat paikallaan olevalla kameralla. Optimaalinen tilanne tällaisessa järjestelyssä on, jos kameroita on useampi kuin yksi ja ne saadaan kiinnitettyä samaan linjaan pystysuunnassa, jolloin yhdestä suunnasta saadaan kuvattua ylä-, keski- ja alakulmat. Oma järjestelmämme koostui kolmesta järjestelmäkamerasta sekä pyörivästä valokuvamallialustasta. Kuvauksen periaate oli, että näyttelijä seisoi pyörivällä alustalla ja otimme noin 60 kuvaa yhden pyörähdyskierroksen aikana.

Näyttelijöiden valokuvaus järjestettiin kummallakin kuvausjaksolla elokuvan kuvauksien lomassa. Päätimme suorittaa valokuvauksen kuvauksien lomassa, jotta näyttelijöiden ai-

katauluihin ei erikseen tarvinnut järjestää erillistä kuvaussessiota. Rakensimme kuvausstudion LUME-studion maskeerausparvelle, jossa tilaa oli noin 4x4 metriä. Valaisuun saimme kaksi Kino Flo –valoa valotiimiltä.

Fotogrammetriassa käytetyistä valokuvista kannattaa syvätä tausta pois lopputuloksen tarkkuuden lisäämiseksi. Tiesimme, että käsiteltäviä kuvia kertyisi niin paljon, että niiden syväminen yksitellen olisi ajanhukkaa. Päätimme käyttää vihreää taustaa näyttelijöiden takana, jolloin tausta olisi mahdollista syvätä kuvista pois chroma keyllä.

### 5.3 Näyttelijöiden valokuvaus

Ensimmäinen kuvausjaksolla ohjasin kameroita kolmella erillisellä kaukolaukaisimella. Kameroiden ohjaaminen kaukolaukaisimilla osoittautui kuitenkin hyvin kömpelöksi ja epäkäytännölliseksi. Kuvien siirtäminen kameroiden muistikorteilta kovalevylle aiheutti sekin hankaluuksia ja epähuomiossa yhden kameran kuvien tuhoamiseen.



Kuvio 20. Näyttelijä valokuvattavana ensimmäisellä kuvausjaksolla.

Toista kuvausjaksoa varten kameroita ohjattiin etänä tietokoneeseen kytkettynä (kuvio 20). Tämä tapa osoittautui kaikin puolin helpommaksi tavaksi hallinnoida kameroita. Järjestelmäkamerat kytkettiin USB-kaapeleilla kannettavaan tietokoneeseen, jonka kautta ohjasin kameroita etälaukaisuohjelmalla. Käytin SmartShooter -nimistä ohjelmaa, mutta monet muutkin ohjelmistot, kuten Adobe Lightroom tukevat useamman kameran etäohjausta.



Kuvio 21. Näyttelijä skannattavana toisella kuvausjaksolla.

Hahmoja skannattiin kahden kuvausjakson aikana noin kolmekymmentä. Osa hahmoista oli saman näyttelijän eri kohtauksissa käytettäviä versioita. Valokuvat tallennettiin hahmon mukaan nimettyihin kansioihin jälkityöstöä varten. Valokuvia kertyi noin 180 kuvaa per hahmo (kuvio 21). Valokuvat otettiin high JPEG –asetuksella.

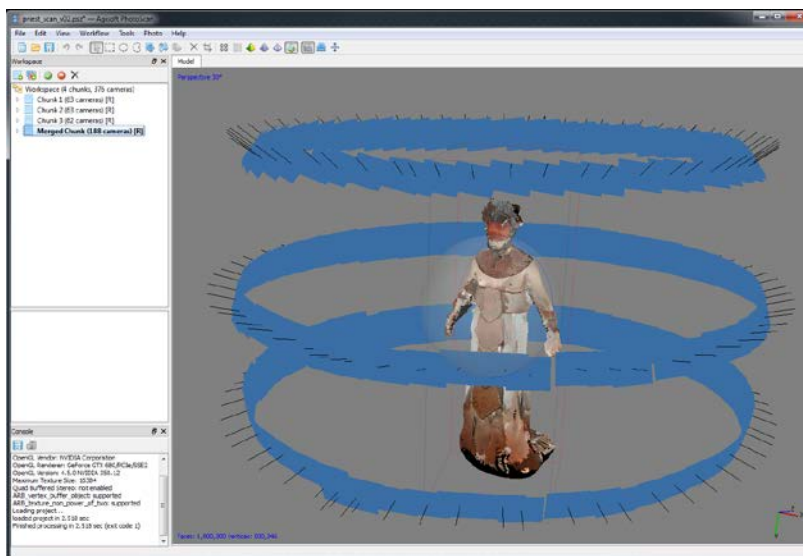
#### 5.4 Valokuvamateriaalin käsitteleminen

Kaikki kuvat täytyivät syvätä ennen kuin niitä pystyi käyttämään fotogrammetriaan. Käytin After Effectsiä kuvasarjojen syväämisen työvaiheen nopeuttamiseksi (kuvio 22). Jokaista kuvaa varten luotiin mustavalkoinen maskitiedosto, jolla rajataan taustan pois näyttelijän ympäriltä. Maskitiedostot lisättiin PhotoScan-ohjelmaan parantamaan lopputuloksen tarkkuutta.



Kuvio 22. Syvätytä valokuvia näyttelijöistä.

Fotogrammetriaan käytin Agisoft PhotoScan -ohjelmaa. Valokuvat tuotiin ohjelmaan ja niille lisättiin aikaisemmin luodut maskit. Itse mallin luominen on kaksivaiheinen: ensin ohjelma laskee kuvien perusteella kameroiden paikat suhteessa muihin kameroihin ja asettaa ne paikoilleen. Tässä vaiheessa on helppo havaita ja korjata mahdolliset virheet ja ongelmia aiheuttavat kuvakulmat. Kaikkien kuvakulmien laskeminen yhdessä kerralla osoittautui hyvin hitaaksi prosessiksi. Huomasimme, että prosessia nopeutti huomattavasti, kun kohdistimme ensin yhden kameran ottamat kuvakulmat keskenään omassa osiossaan (Chunk) ja tämän jälkeen kolme osiota yhdessä (kuvio 23). Tässä vaiheessa poistetaan virheelliset pisteet, jotta ne eivät vaikuta geometrian laskentaan.



Kuvio 23. Meshin generointi Agisoft Photoscanissa.

Kuvien kohdistamisen jälkeen lasketaan mesh. Laskemiseen kuluva aika riippuu käytössä olevan koneen tehoista ja laskettalle meshille asetetusta tarkkuudesta. Prosessi voi kestää muutamasta tunnista useaan kymmeneen tuntiin. Yksi fotogrammetrian ohjelmistovaatimus tietokoneelle on suuri välimuistin määrä. Välimuistia tarvitaan paljon, kun halutaan päästä kymmenien miljoonien polygonien tarkkuuteen (Agisoft 2014). Meshien laskemiseen kului useita kymmeniä tunteja, mikä on hyvä ottaa huomioon jälkityöstön aikataulutuksessa.

### 5.5 Lopullisen mallin tuottaminen

Oma tekninen toteutuksemme ei harmiksemme tuottanut kovin tarkkaa 3D-mallia. Näyttelijöiden liikehdintä valokuvatessa johti epätarkkuuksiin kameroiden kohdistamisessa. Epätarkoilla pisteillä laskettu geometria oli hyvin karkea, eikä tarkkoja yksityiskohtia saatu muodostettua juuri lainkaan. Onneksi suuret muodot, kuten vaatteiden laskokset saatiin muodostettua.

Photoscan-prosessiin joka tapauksessa kuuluu viimeistely ulkopuolisessa ohjelmassa. Jatkoimme mallien työstöä ZBrushilla (kuvio 24). Fotogrammetriaan käytetty valokuvamateriaali tuotiin referenssiksi taustalle. Laskettu 3D-mallin tallennettiin OBJ-tiedostona jatkotyöstöä varten. Lopullinen digital double luotiin käyttäen ZBrushin mallinnustyökaluja, retopologiontia ja tekstuurimaalausta ZBrushissa ja MARIssa.



Kuvio 24. 3D-mallin geometrian työstäminen.



Fotogrammetrialla tuotettu 3D-malli oli kuitenkin erittäin hyödyllinen, vaikka se olikin hyvin karkea. Mittasuhteet oli helpompi hahmottaa 3D-mallin avulla. Myös vaatteiden laskokset, joita olisi ollut vaikea tulkita valokuvista, olivat tallentuneet fotogrammetrian avulla. Näyttelijöiden 3D-mallien käyttötarkoitus oli laajoissa kuvissa, joissa hahmot olivat kaukana eikä yksityiskohtia erottanut kovinkaan hyvin, joten Photoscanista saatavien 3D-mallien karkea laatu ei koitunut suureksi vastoinkäymiseksi.



Kuvio 25. Valmis näyttelijän 3D-malli ZBrushissa.

Yksi fotogrammetrian eduista on, että 3D-mallin laskemiseen käytettyjä valokuvia voitiin käyttää myös tekstuurien projisointiin (kuvio 25). The Foundryn tekstuurimaalausohjelma MARI sekä Autodeskin Mudbox tukevat kameroiden tuomista ohjelman sisään, jossa 3D-graafikko voi hyödyntää niitä tarkkojen ja yksityiskohtaisten tekstuurien maalaamiseen. Sama lopputulos olisi ollut paljon vaivalloisempaa saavuttaa käyttäen Photoshopia.

## 6 Pohdinta

Tekniikan ja tietokoneiden laskentatehon kehitys on tuonut markkinoille yhä monipuolisemman valikoiman erilaisia 3D-skannauslaitteita. Laser-3D-skannauksen rinnalle on kehitetty valkoista valoa hyödyntäviä tekniikoita, joilla skannaus on huomattavasti nopeampaa kuin laseria käyttävillä. Lähifotogrammetria on myös nykyään varteenotettava 3D-skannaustekniikka laskentatehon ja ohjelmistojen kehityksen ansiosta. Kuluttajajärjestelmäkameroilla voidaan tuottaa yhtä tarkkoja lopputuloksia kuin muilla 3D-skannaus-

laitteilla. 3D-skannaukseen vaadittava tekniikka on myös yhä edullisempaa. 3D-printteiden saapuminen kuluttajamarkkinoille on vaikuttanut kuluttajille suunnattujen 3D-skannereiden yleistymiseen. Edullisia, Artec EVAn kaltaisia skannereita, on ilmestynyt markkinoille alkuvuodesta 2015, ja suuret IT-jätit, kuten Google ja Intel, kehittävät omia vastaavia tekniikoitaan - kevyitä, edullisia, kuluttajille suunnattuja ja hyvin mobiileja. Hyvinkin pian voi olla täysin arkipäiväistä pystyä tuottamaan tarkkoja 3D-malleja älypuhelimien avulla.

3D-skannaus on nykyään hyvin yleinen työkalu viihdeteollisuudessa. Lavasteiden ja kuvauspaikkojen skannaus on yleistä efektipainotteisille elokuville. Myös peliteollisuus on ottanut 3D-skannauksen käyttöön. The Astronautsien *The Vanishing of Ethan Carter* -pelin ympäristö luotiin lähes kokonaan fotogrammetrian avulla.

Viimeisen kymmenen vuoden aikana on tapahtunut myös merkittäviä edistysaskelia ihmisen digitoimisen puolella. Paul Debevecin uraa uurtava Light Stage -tekniikka on kehitetty alun perin Avatar elokuvaa varten ja on ollut siitä lähtien laajasti käytössä eri elokuvatuotannoissa. Lee Perry Smithin perustama Infinite Realities on vuorostaan luonut kaupallisesti kilpailukykyisen 3D-skannausjärjestelmän lähifotogrammetriaa hyödyntämällä. Hänen kehittämänsä järjestelmä käyttää järjestelmäkameroita ja lähifotogrammetriaohjelmistoa mallin luomiseen. Tekniikkaa on hyödynnetty paljon pelien cinematic trailerien teossa.

Fotogrammetrian käyttämisessä 3D-mallin tuottamisessa on yksi merkittävä etu muihin 3D-skannaustekniikoihin nähden. Sen avulla on tarkan geometrian lisäksi mahdollista tuottaa myös erittäin korkealaatuiset tekstuurit kuvattavasta kohteesta. Tämä on erittäin tärkeää viihdeteollisuuden sovelluksissa, joissa mallin tekstuurin tekemisen automatisointi säästää huomattavasti tuotannon resursseja.

Fotogrammetria osoittautui erittäin hyödylliseksi ja mielenkiintoiseksi tekniikaksi *Gontherion*-projektissa. Tekniikan avulla pystyimme nopeuttamaan 3D-mallintamis- ja teksturointivaiheita huomattavasti. Säästimme myös resursseja kuvauksien aikana, kun erillistä referenssikuvaustilannetta näyttelijöille ei tarvinnut järjestää. Vaikka fotogrammetrialla tuotetut 3D-mallit eivät olleet kovinkaan tarkkoja ja vaativat paljon putsausta, oli niistä silti paljon hyötyä. Ne antoivat hyvän referenssin hankalien muotojen tekemiseen, kuten vaatteiden laskoksien skulptaamiseen.

Fotogrammetrian käyttäminen vaatii kuitenkin paljon panostusta kuvaustilanteeseen. Ymmärrys ja kokemus valokuvaamisesta ovat erittäin tärkeitä. Paljon studiotilaa, tasainen valaistus, useampi kamera ja näyttelijän paikallaan pitäminen olisivat tuottaneet huomattavasti paremman lopputuloksen. Fotogrammetriassa millienkin liikahdus tarkoitti virhemarginaalin reipasta kasvua laskentavaiheessa. Ensimmäisellä kuvauskerralla käytetty green screen osoittautui sekin enemmän haitaksi kuin hyödyksi kuvien käsittelyvaiheessa. Käytössä ollut valokalusto ei myöskään riittänyt valaisemaan kohdetta tarpeeksi voimakkaasti, joten näyttelijän syvääminen taustasta chroma key -menetelmin ei onnistunut niin automaattisesti kuin toivoin.

Suuri lähifotogrammetriaan liittyvä haaste on kamerakaluston ja valaistuksen etäohjaimisen järjestäminen. Kymmenien kameroiden ja salamien yhtä aikaa laukaiseminen ei onnistu tuosta vain, vaan se vaatii järjestelyitä ohjelmiston ja elektroniikkalaitteiden osalta. USB-kaapeleiden käyttö johtaa valitettavasti viiveeseen kameroiden laukaisussa. Ohjelmisto ei pysty laukaisemaan ja lataamaan kuvia kameroilta samanaikaisesti, vaan kamerat laukeavat sarjassa noin puolen sekunnin viiveellä. Kameroita olisi pitänyt ohjata kameroiden remote-release socketin kautta, jotta kamerat saataisiin laukaistuksi samanaikaisesti.

Fotogrammetria osoittautui kaikesta huolimatta erittäin hyödylliseksi ja joustavaksi työkaluksi näyttelijän 3D-mallin tuottamisessa. Fotogrammetrian käyttö ei lopulta vaadi muuta kuin järjestelmäkameran, ohjelmiston ja tietokoneen sekä tekniikkaan perehtymisen. Siinä mielessä fotogrammetria on ylivertainen muihin 3D-skannaustekniikoihin nähden, jotka vaativat erillisten erikoislaitteiden hankkimisen.

## Lähteet

2h3D 2013. Technology. <<http://www.2h3dscanning.com/#!technology/c20x9>> (Luettu 11.4.2015)

3DSYSTEMS 2014. Geomagic Capture. <[http://geomagic.com/files/2014/1823/4234/Capture\\_Design\\_EN\\_Web.pdf](http://geomagic.com/files/2014/1823/4234/Capture_Design_EN_Web.pdf)> (Luettu 11.4.2015)

Abrams, Bryan 2013. USC's Paul Debevec's Role In The Matrix, Avatar, Gravity & More. The Credits. <<http://www.thecredits.org/2013/10/uscs-paul-debevec-s-role-in-the-matrix-avatar-gravity-more/>> (Luettu 20.4.2015)

Acute3D 2014. Smart3DCapture. <<http://www.acute3d.com/smart3dcapture>> (Luettu 14.4.2015)

Agisoft 2014. Tips and Tricks. <[http://www.agisoft.com/pdf/tips\\_and\\_tricks/PhotoScan\\_Memory\\_Requirements.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/PhotoScan_Memory_Requirements.pdf)> (Luettu 4.11.2014)

Alec 2015. Shining EinScan-S portable 3D scanner to launch on Kickstarter end of this week. <<http://www.3ders.org/articles/20150128-shining-einscan-s-desktop-3d-scanner-to-launch-on-kickstarter-end-of-this-week.html>> (Luettu 11.4.2015)

Artec 3D 2014. How it Works. <[http://www.artec3d.com/hardware/artec-eva/how\\_it\\_works/](http://www.artec3d.com/hardware/artec-eva/how_it_works/)> (Luettu 20.4.2014)

Autodesk 2013. TERMS OF SERVICE for 123Dapp.com. <<http://www.autodesk.com/company/legal-notices-trademarks/terms-of-service-autodesk360-web-services/terms-of-service-for-123dapp>> (Luettu 20.5.2015)

Autodesk 2015. <<https://memento.autodesk.com/about>> (Luettu 20.4.2015)

Biggs, John 2013. The Makerbot Digitizer Is Nearly Magic. TechCrunch. <http://techcrunch.com/2013/10/17/the-makerbot-digitizer-is-nearly-magic/> (Luettu 20.4.2015)

Center for Photogrammetric Training 2008. History of Photogrammetry. <<https://spatial.curtin.edu.au/local/docs/HistoryOfPhotogrammetry.pdf>> (Luettu 8.4.2015)

Creaform 3D 2015. Portable 3D Scanners: Handyscan 3D. <<http://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/portable-3d-scanner-handyscan-3d>> (Luettu 20.4.2015)

Failes, Ian 2013. Zombie warfare: World War Z. FXGuide. <http://www.fxguide.com/featured/zombie-warfare-world-war-z/> (Luettu 11.4.2014)

Finance, Charles; Zwerman, Susan 2010. The Visual Effects Producer - Understanding the Art and Business of VFX. Oxford: Focal Press

Fry, Garrett 2014. Matte Painting Photogrammetry Workflow - MARI Tutorial by Garrett Fry. <<http://youtu.be/qvHiNfQobKs>> (Katsottu 14.10.2014)

Gerig, Guido 2012. 3D Computer Vision. <<http://www.sci.utah.edu/~gerig/CS6320-S2012/Materials/CS6320-CV-S2012-StructuredLight.pdf>> (Luettu 4.4.2015)

Gutierrez, John 2011. 7 Films That Got Stuck In The Uncanny Valley. Topless Robot. <[http://www.toplessrobot.com/2011/03/7\\_films\\_that\\_got\\_stuck\\_in\\_the\\_uncanny\\_valley.php](http://www.toplessrobot.com/2011/03/7_films_that_got_stuck_in_the_uncanny_valley.php)> (Luettu 20.4.2015)

Hackengineer 2012. Structured Light vs Microsoft Kinect. Computer vision. <<http://www.hackengineer.com/structured-light-vs-microsoft-kinect/>> (Luettu 15.4.2014)

Hall, Charlie 2015. What do Star Wars Battlefront and The Vanishing of Ethan Carter have in common? Polygon. <<http://www.polygon.com/2015/4/20/8459181/what-do-star-wars-battlefront-and-the-vanishing-of-ethan-carter-have>> (Luettu 20.4.2015)

Hoffman, Vasco 1998. A Brief History of 3D Scanning. 3D Scanners. <[http://vr.is-dale.com/3DScanners/3d\\_scan\\_history/history.htm](http://vr.is-dale.com/3DScanners/3d_scan_history/history.htm)> (Luettu 10.4.2015)

Infinite Realities, 2014a. Learning the ways of the force. <<http://ir-ltd.net/learning-the-ways-of-the-force/>> (Luettu 14.10.2014)

Infinite Realities, 2014b. Cracking the black box of photogrammetry scanning. <<http://ir-ltd.net/cracking-the-black-box-of-photogrammetry-scanning/>> (Luettu 14.10.2014)

Luhmann, Thomas; Robson, Stuart; Kyle, Stephen & Harley, Ian 2006. Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. Dunbeath: Whittles Publishing.

Mapvision 2015. Why 100% x 100%. <<http://www.mapvision.fi/en/benefits/>> (Luettu 15.3.2015)

Okun, Jeffrey A.; Zwerman, Susan 2010. Visual Effects Society Handbook: Workflow and Techniques. Oxford: Focal Press

Pelovitz, Jordan 2014. What's the Right 3D Scanner for You? Lagoa Blog. <<http://home.lagoa.com/2014/04/whats-the-right-3d-scanner-for-you/>> (Luettu 11.4.2015)

Platige Image 2013. Cyberpunk 2077. Behance. <https://www.behance.net/gallery/6573211/Cyberpunk-2077> (Luettu 11.4.2015)

Occipital 2015. Structure Sensor. <<https://store.structure.io/store>>

Riegl 2015.

<<http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/5/>> (Luettu 20.4.2015)

Seymour, Mike 2012. Pointcloud9 – a LIDAR case study. <<http://www.fxguide.com/featured/pointcloud9-a-lidar-case-study/>> (Luettu 20.4.2015)

The Astronauts 2014. Visual Revolution of The Vanishing of Ethan Carter <<http://www.theastronauts.com/2014/03/visual-revolution-vanishing-ethan-carter/>> (Luettu 15.10.2014)

Tilbury, Richard 2012. Interview with Infinite Realities. <[http://www.3dtotal.com/index\\_interviews\\_detailed.php?id=24#.VV5E0UamwU1](http://www.3dtotal.com/index_interviews_detailed.php?id=24#.VV5E0UamwU1)> (Luettu 11.4.2015)

Ten24 2015. Mobile Scanning. <[http://www.ten24.info/?page\\_id=296](http://www.ten24.info/?page_id=296)> (Luettu 20.4.2015)

Tong, Thomas 2011. 3D Scanners: Laser Versus White Light. 3D Scanning and inspection Blog. <<http://marketing.lmi3d.com/3d-scanners-laser-versus-white-light>> (Luettu 10.4.2015)

Wikipedia 2014a. Structured-light 3D scanner.

<[http://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light\\_3D\\_scanner](http://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light_3D_scanner)> (Luettu 11.4.2014)

Wikipedia 2014b. 3D Scanner. <[en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner)> (Luettu 11.4.2014)

Wikipedia 2014c. Photogrammetry. <<http://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry>> (Luettu 11.4.2014)

Wikipedia 2014d. Charge-Coupled Device. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled\\_device](http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device)> (Luettu 14.4.2015)

Wikipedia 2014e. Lidar. <<http://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>> (Luettu 14.4.2015)

Wilson, Jeffrey Ian 2014. Single Camera Head Scanning with Agisoft Photoscan. <<https://vimeo.com/98638688>> (Katsottu 11.4.2015)

## **Kuvalähteet**

Kuva 2. Laser-skannauksen periaate.

<[http://cdn.arstechnica.net/wp-content/uploads/2013/04/ScanBeauty\\_600px.jpg](http://cdn.arstechnica.net/wp-content/uploads/2013/04/ScanBeauty_600px.jpg)> (Luettu 27.4.2015)

<<http://www.buildlog.net/blog/wp-content/uploads/2010/08/3dscanner.jpg>> (Luettu 27.4.2015)

Kuva 3 Lidar-laite ja pistepilvi.

<<http://home.lagoa.com/wp-content/uploads/2014/04/timeofflightscanner.jpg>> (Luettu 15.4.2015)

Kuva 4. Unit C 2015. Lidarin tuottama pistepilvi yhdestä skannauspisteestä.

Kuva 5. Tarkentuva mustavalkoinen kuvio, joka projisoidaan kohteen pinnalle.

<<http://home.lagoa.com/wp-content/uploads/2014/04/structuredlightbands.jpg>> (Luettu 15.4.2015)

<http://hackengineer.files.wordpress.com/2012/02/conventionalgray.png> (Luettu 17.4.2015)

Kuva 6. Artec EVA ja Occipital Structure Sensor.

<<http://www.artec3d.com/upload/iblock/b50/artec-illustrations-3.jpg>> (Luettu 13.4.2015)

<<http://bm.img.com.ua/berlin/sto->

[age/orig/7/21/b2c2f43494a345fb58edc558be4b1217.jpg](http://bm.img.com.ua/berlin/sto-)> (Luettu 13.4.2015)

Kuva 7. Fotogrammetrian periaate.

<[http://www.clemson.edu/restoration/wlcc/\\_files/photogrammetry.jpg](http://www.clemson.edu/restoration/wlcc/_files/photogrammetry.jpg)> (Luettu 24.4.2015)

Kuva 8. 3D-malli näyttelijän kasvoista taistelukohtausta varten Avatar-elokuvassa.

<<http://www.sciencefriday.com/images/cached/IMAGE/photo/000/000/012/12289-v1-490x.JPG>> (Luettu 18.11.2014)

<[http://vignette3.wikia.nocookie.net/jamescameronsavatar/images/1/15/Hey\\_Sully\\_HD.png/revision/latest?cb=20101011031552](http://vignette3.wikia.nocookie.net/jamescameronsavatar/images/1/15/Hey_Sully_HD.png/revision/latest?cb=20101011031552)> (Luettu 18.11.2014)

Kuva 9. Zombie-hahmojen pohjana olleita 3D-skannauksia.

<[http://www.3dscanningtechnologies.com/cms3d/uploads/2h3D\\_WWZ\\_Body-Costume\\_Artec1.jpg](http://www.3dscanningtechnologies.com/cms3d/uploads/2h3D_WWZ_Body-Costume_Artec1.jpg)> (Luettu 18.2.2015)

Kuva 10. The Astronauts valokuvaamassa luontoa fotogrammetriaa varten.

<<http://i.imgur.com/0mAcCW6.jpg>> (Luettu 14.11.2014)

Kuva 11. Fotogrammetrialla tuotettu pala oikeaa luontoa.

<<https://p3d.in/Cadwc>> (Luettu 14.11.2014)

Kuva 12. The Vanishing of Ethan Carter –pelin pelimaailmaa.

<<http://www.theastronauts.com/wordpress/wp-content/uploads/2014/03/EdgePhotogrammetryShot.jpg>> (Luettu 14.11.2014)

Kuva 13. Näyttelijän 3D-skannaus ja lopullinen skannauksen pohjalta tehty 3D-malli.

<<https://m1.behance.net/rendition/modules/51491645/hd/033a4a09b2c2ca13deb318301e2e9504.jpg>> (Luettu 14.11.2014)

<<https://m1.behance.net/rendition/modules/50876463/disp/5033944b994014ebac6aa9c0994e68a8.jpg?cb=167735546>> (Luettu 14.11.2014)

Kuva 14. Kuvakaappaus Cyberpunk 2077 teaseristä.

<<https://m1.behance.net/rendition/modules/50875893/hd/06bf168845d9fcd0691c32d72d85a4d7.jpg>> (Luettu 14.11.2014)

Kuva 15. Infinite Realitiesin fotogrammetrialla tuottama näyttelijän 3D-malli.

<[http://www.ir-ltd.net/wp-content/uploads/2012/04/Joc-01\\_01a.jpg](http://www.ir-ltd.net/wp-content/uploads/2012/04/Joc-01_01a.jpg)> (Luettu 18.11.2014)

Kuva 16. Infinite Realitiesin fotogrammetriajärjestelmä.

<[http://www.3dtotal.com/admin/new\\_cropper/interview\\_content\\_images/24\\_tid\\_02.JPG](http://www.3dtotal.com/admin/new_cropper/interview_content_images/24_tid_02.JPG)> (Luettu 18.4.2014)

## **Muut kuvat**

Kuvat 17-19. Testirendauksia Gonthrion-lyhytelokuvan kohtauksista.

Clutch Productions 2013

Kuvat 20-25. Kuvamateriaalia näyttelijöiden valokuvaamisesta ja 3D-mallien työstämisestä.

Clutch Productions 2013



## **Fotogrammetrialla tuotettu 3D-malli**

Liite 1. Liitetiedosto sisältää lyhyen kuvankaappausvideo fotogrammetrialla tuotetusta näyttelijän 3D-mallista Agisoft PhotoScanissa.

## **Näyttelijän 3D-mallin tuottaminen**

Liite 2. Kuvasarja Pappi-hahmon 3D-mallin tuottamisesta.