

**Jaro Väisänen**

**Fotorealististen 3D-objektien renderointi ja kompositointi  
elokuvauksessa**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

26. huhtikuuta 2017

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikka

**Tekijä:** Jaro Väisänen

**Yhteystiedot:** jaro.j.s.vaisanen@student.jyu.fi

**Ohjaaja:** Marjaana Nokka

**Työn nimi:** Fotorealististen 3D-objektien renderointi ja kompositointi elokuvauksessa

**Title in English:** Photorealistic rendering and compositing of 3D objects in cinematography

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Sivumäärä:** 24+0

**Tiivistelmä:** Tämän tutkielman tarkoituksena on tarkastella fotorealististen 3D-objektien renderointia ja kompositointia elokuvauksessa. Tutkimuskysymys heräsi kiinnostuksestani elokuvauksessa käytettyihin visuaalisiin efekteihin ja siihen, miten elokuvauksen jälkituotannossa käytetyillä renderoinilla ja kompositoinnilla saadaan fotorealistisia lopputuloksia, kuvaruutuja. Vertailtuja renderointimenetelmiä ovat säteenseuranta ja kuvapohjainen valaistus, jotka kumpikin ovat käytettyjä menetelmiä fotorealismien saavuttamisessa. Säteenseuranta on suorituskyvyltään melko hidas, kun halutaan kuvaruutuun ehdotonta realismia. Sen edut ovat kuitenkin hyvässä laadussa, mikäli laskenta-aika ei ole ongelma. Kuvapohjaista valaistusta puolestaan on helppo hyödyntää 3D-objektien valaistuksessa, koska renderointiin saadaan täysin samat valonlähteet, joita kuvatussa kohtauksessa käytettiin. Nykypäivää ja tulevaisuutta ajatellen kuvapohjaisen valaistuksen periaatteet ovat yhä enemmän esillä, mutta säteenseurannan käyttö siirtyy yhä enemmän animaatioelokuviin.

**Avainsanat:** 3D-ympäristö, fotorealismi, kompositointi, renderointi, tietokonegrafiikka, valaistus

**Abstract:** In this Bachelor's thesis I discuss studies and my own personal views on photorealistic rendering and compositing of 3D objects in cinematography. The purpose of this thesis arose from my interest in visual effects used in movies. In this paper I surveyed how post-production in cinematography uses rendering and compositing to its advantage when the desired result is a photorealistic frame. The rendering methods compared in this thesis are ray tracing and image-based lighting. They are both prominent methods in achieving

photorealism and are used widely. Ray tracing faces performance issues in photorealistic rendering but it exceeds in quality if counting time is not an issue. Image-based lighting is fairly easy to use in illuminating 3D objects because the method takes advantage of the global illumination and lighting used in the live-action scene in question. At present and in the future image-based lighting is proving to be the best method in photorealistic rendering, but ray tracing tends to be more popular method in animated movies.

**Keywords:** 3D environment, photorealism, compositing, rendering, computer graphics, illumination

## **Kuviot**

Kuvio 1. Valopallomalli paikasta Uffizi Galleria, Firenze (Debevec 2005) .....	10
--	----

# Sisältö

1	JOHDANTO .....	1
2	VALAISTUS .....	4
	2.1 Globaali valaistus.....	5
3	FOTOREALISTINEN RENDEROINTI.....	6
	3.1 Renderoinnista yleisesti .....	6
	3.2 Säteenseuranta .....	8
	3.3 Kuvapohjainen valaistus (IBL) .....	9
4	RENDEROINTIMENETELMIEN VERTAILU .....	12
5	KOMPOSITOINTI .....	14
	5.1 Kompositoinnin vaiheet .....	14
6	YHTEENVETO.....	16
	LÄHTEET .....	18

# 1 Johdanto

Tässä tutkielmassa tarkastellaan, kuinka fotorealistisia 3D-ympäristöjä voidaan hyödyntää elokuvauksessa (kuten elokuvissa ja TV-sarjoissa), jotta saadaan aikaan tietokoneella renderoituja kuvaruutuja lopullista kompositointia varten. Fotorealistisuus tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, kuinka vakuuttavasti voimme luoda 3D-elementtien, kuten valaistuksen ja renderoinnin, avulla oikean kameran otoksia jäljitteleviä lopputuloksia. Realismi ja fotorealismi ovat tässä tutkielmassa kontekstiriippuvaisia. Esimerkiksi tuntemassamme maailmassa lohikäärmeet eivät ole realistisia, mutta puhutaan elokuvauksesta ja sen sisältämän maailman kontekstista, jolloin tässä hypoteettisessa fantasiamaailmassa pyritään luomaan sille fotorealistisia lohikäärmeitä. Aihe on sovellus tietokonegrafiikasta.

Aiheen valinta tuli kiinnostuksestani TV-sarjoissa käytettyyn CGI:hin (engl. computer generated imagery), ja aion nyt viedä kiinnostukseni pidemmälle tutkimalla aihetta tarkemmin. Kiinnostuin siitä, miten visuaalisilla efekteillä on mahdollista sulauttaa realistisen näköisiä kaupunkoja, linnoja, sekä mitä tahansa esineitä kuvattuihin kohtauksiin. Aihetta tarkastellaan eri näkökulmista lähdekirjallisuus tukena, ja vertaillaan sekä keskustellaan eri lähteiden kanssa keskenään. Tekstin lomassa tuon esille omaa näkökantaani käsiteltävään aiheeseen

Oma näkökulmani aiheeseen liittyy vahvasti siihen, kuinka saadaan ihmissilmälle riittävän realistista ja uskottavaa kuvaa, kun fotorealistiseen kuvaan yhdistetään lisättyä todellisuutta (engl. augmented reality). Kuinka pitkälle 3D-ympäristöjä pitää jalostaa ja jälkikäsitellä, jotta ne näyttäisivät realistisesti uskottavilta? Onko olemassa jokin yläraja, jolloin ihmisen käsitys realismista on tyydyttynyt, ja kaikki ylimääräinen on turhaa työtä ja renderoinnin sekä kompositoinnin suhteen ajanhukkaa? Muun muassa tämänkaltaisiin kysymyksiin tässä tutkielmassa perehdytään.

Fotorealismista ja siihen tähtäävistä menetelmistä löytyy hyvin kirjallisuutta, joista vanhimmat ovat jo ennen 1990-lukua, mutta uudempaa tutkimusta tehdään jatkuvasti. Usein tukimateriaalina ja vertauskohteena käytetään jotain siihen liittyvää elokuvaa tai TV-sarjaa, joka on toteutettu tutkimuksen kyseessä olevaa menetelmää käyttäen (usein hyvänä vertauskohteena esitetään elokuva *Iron Man 2*, jossa oli tämän tutkielman esittämät menetelmät käytössä)

(Snow 2010). Näin tehtiin esimerkiksi elokuvassa *Autot (2006)*, jossa käytettiin Pixarin kehittämää uutta säteenseurantamenetelmää renderointikone RenderManissa (Christensen ym., Sept 2006). Siinä tuleekin selväksi, että 3D-ympäristöissä valaistus ja renderointi (ko. artikkelissa säteenseuranta) ovat tärkeimmässä osassa fotorealisticen kuvan luomisessa.

Agusanto ym. 2003 kirjoittamassa artikkelissa *Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination* on tutkittu lisätyn todellisuuden sulauttamista kuvattuihin kohtauksiin. Tämä on oleellinen aihe, sillä elokuvauksessa pyritään nimenomaan saamaan saumattomasti sulautettua tietokonegrafiikkaa kohtaukseen. Tutkimus tarkastelee renderointitekniikoita, kuten kuvapohjaista valaistusta ja ympäristön valaisukarttoja. Kuvapohjaisessa valaistuksessa käytetään reaali maailman globaalien valaistuksen mitattuja arvoja, joiden avulla valaistaan 3D-objekteja. Valaisukartat saadaan kuviin pohjautuvista valaistuksista ja ne pitävät sisällään tiedon jokaisen tulevan säteen heijastuskohdista. Kunkin pikselin arvo pitää sisällään tiedon suorista valaistuksista sekä heijastuksien kautta tulevista epäsuorista valaistuskohdista. Näitä säteilykarttoja voidaan hyödyntää 3D-kappaleiden fotorealisticissa valaisemisessa. Yllä kuvailtuihin aiheisiin perehdymme tarkemmin tämän tutkielman myöhemmissä luvuissa.

Suuri osa kuvapohjaisen valaistuksen tutkimuksesta on Paul Debevecin (Etelä-Kalifornian yliopisto, Luovan teknologian instituutio) käsialaa. Hänellä on takanaan paljon tutkimusta valaistuksesta ja renderoinnista, sekä erityisesti omaa tutkimusta kuvapohjaisessa valaistuksessa, johon hän on kehittänyt nykyisin käytetyn menetelmän fotorealisticisuuden parantamiseksi (Debevec 2008).

Tarkastellaan, kuinka fotorealisticuus on mahdollista saavuttaa tietokoneella luodulla grafiikalla. Toisin sanoen puhutaan todellisuuden muokkaamisesta tietokonegrafiikan avulla. Mitä pitää tehdä, jotta tämä on mahdollista? Mitä menetelmiä on olemassa, ja kuinka renderointia voitaisiin tehostaa? Tarkoituksena on tarkastella valaistuksen sekä renderoinnin tehokasta käyttöä, kun haluttuna lopputulemana on mahdollisimman realistisen näköinen 3D-ympäristö sulautettuna kuvausvaiheen filmimateriaaliin.

Ensimmäisenä perehdytään valaistukseen yleisesti sekä globaaliin valaistukseen, joka on avainasemassa fotorealisticien kuvaruutujen renderoinnissa. Valaistuksen jälkeen tutustutaan

renderointiin yleisesti, sekä tehdään katsaus tämän tutkielman renderointimenetelmiin. Tarkasteltuja renderointimenetelmiä tässä tutkielmassa ovat säteenseuranta ja kuvapohjainen valaistus. Näiden jälkeen vertaillaan kyseisiä renderointimenetelmiä. Lukujen 3 ja 4 jälkeen käytetään niissä käsiteltyä asiaa hyödyksi, kun kootaan informaatiota lopullista vaihetta, kompositointia, varten. Tutkielman lopuksi aiheesta on yhteenveto sekä lähdeluettelo.



## 2 Valaistus

Tässä luvussa perehdytään valaistukseen osana fotorealistista 3D-ympäristöä. Valaistus (engl. lighting, illumination) on yksi tärkeimmistä elementeistä fotorealistisen kuvan luomisessa, ja sen realistinen jäljitteleminen tarvitsee paljon laskemista. Valaistus yhdessä varjostuksen kanssa määrittävät, kuinka kirkkaat värit ovat kussakin lopputuloksen pikselissä. Kun tämä saadaan oikeilla menetelmillä täsmälliseksi luonnonvaloa jäljitteleväksi, käsillä on ihmissilmää miellyttävä lopputulos. 3D-ympäristön valaistukseen eräs keskeinen käsite on globaali valaistus, joka on verrattavissa esimerkiksi aurinkoon luonnonvalona. Tämän toteuttamiseen vertailtavana on erilaisia lähestymistapoja.

Valaistus lukeutuu ehdottomasti tärkeimpiin elementteihin, kun yritetään luoda mahdollisimman fotorealistista kuvaa. Ympäristön valaistuksen rooli korostuu yhä, kun liitetään 3D-ympäristö lisätynä todellisuutena osana elokuvaa. Elokuvan kuvausvaiheessa kameralle tallentuu luonnollisesti kyseisessä tilassa loistavat valonsäteet, joita tulee jäljitellä todenmukaisesti 3D-ympäristöä tehdessä. Valolla on suunta ja suuruus, ja valonlähteitä saattaa olla useita, jolloin huomioonotettavia tekijöitä on paljon (Joon, Hui ja Chan 2008).

Tunwattanapong ja Debevec 2009 esittävät menetelmän, jolla saadaan korkeatasoista valaistusta yhdistelemällä pienempiä valonlähteitä, jotka ovat pistemuodossa. Menetelmässä valituilla pisteillä on kullakin valon suunta, väri ja voimakkuus. Pisteitä voidaan sitten yhdistää säteittäin laskemalla interpolaatio jokaisesta valopisteestä. Menetelmä antaa paljon vapauksia valon käyttöön, mutta juuri tämä saattaa tehdä siitä hieman vaikeakäyttöisen 3D-ympäristöjen luontiin elokuvauksessa. Elokuvauksessa kameralle usein tallentuu globaaleita valonlähteitä, sekä toki pienempiä lähteitä, jotka eivät ole niin vallitsevassa roolissa. Yllä kuvattu menetelmä sopinee siis paremmin tarkempien kohteiden valaisuun. Seuraavaksi tarkastelemme globaalia valaistusta ja sen efektejä, joita käytetään fotorealististen kuvien renderointiin.

## 2.1 Globaali valaistus

Globaali valaistus poikkeaa tavallisesta suorasta valaistuksesta siten, että jokainen valonsäde, heijastuminen ja taittuminen vaikuttaa kaikkiin objekteihin kuvassa. Jokaisen pisteen valon voimakkuus ja suunta lasketaan siis kaikkien siihen heijastuvien valonsäteitä käyttäen (Pessoa ym. 2008). Erilaiset valonlähteet lukeutuvat globaaliin valaistukseen, kuten esimerkiksi sisätilan valaiseva ikkunasta tuleva taivaan ja auringon valo, katosta tulevan valaisimen valo, sekä huoneen seinistä heijastuva epäsuora valo (heijastus sisältää väriarvoja) (Debevec 2005). Ympäristöstä heijastuva epäsuora valo on tärkeä fotorealismien kannalta, sillä epäsuorista lähteistä kimpoileva ja heijastuva valo vuotaa väriarvojaan ympärillä oleviin objekteihin (Robbins 2014). Valonlähteitä voi olla myös globaalissa valaistuksessa lukematon määrä riippuen käytetyistä renderointimenetelmistä, joihin tutustutaan myöhemmin seuraavassa luvussa. Globaali valaistus on ensisijainen ratkaisu, kun halutaan sulauttaa synteettisiä tietokoneella luotuja 3D-objekteja kuvattuun reaali maailman kohtaukseen.

Bloom on globaalin valaistuksen efekti, joka ilmenee, kun objektia tarkastellaan valoa vasten, ja sen varjon lävitse pääsee vuotamaan valoa (Pessoa ym. 2008). Bloomin vaikutusten ansiosta objektit näyttävät selkeämmiltä eivätkä ole täysin varjossa vastakkaiselta puolelta, kun niihin kohdistuu kirkas valo. Yleisesti bloomien tarkoituksena on matkia elokuvauksessa käytettävien linssien funktionaalisuutta, joka toteutetaan artistin luovuuden ja silmän rajoissa. Bloomin käyttö on usein ajateltu toissijaiseksi, mutta se tulisi ottaa huomioon renderoinnissa, jotta valonvastaiset varjot ilmenisivät realistisempina.

Glare on erittäin kirkkaan valon luoma heijastus, joka kohdistuu katsojan silmään. Suurimmillaan glare aiheuttaa kuvaruutuun liian suurta kontrastia, mikä ei ole suotavaa, koska oleelliset objektit peittyvät kirkkaan valon heijastukseen (Talvala ym. 2007). Glarea voidaan verhottaa (engl. veiling), jolloin kirkkaan heijastuksen takana piilevät objektit tulevat paremmin esiin (Talvala ym. 2007). Verhotus saatetaan joutua tekemään, mikäli käytettävänä renderointimenetelmänä käytetään kuvapohjaista valaistusta. Kuvatussa kohtauksessa valonsäteet saattavat kohdistua katsojan (kameran) silmään, mikäli elokuvauksessa kyseistä kuvakulmaa päätetään käyttää. Kuvapohjaista valaistusta käyttäen 3D-objektit valaistaan reaali maailmasta saadulla valolla, jonka mukana tulevat kaikki globaalin valaistuksen efektit. Tähän menetelmään perehdytään myöhemmin luvussa 3.3.

### **3 Fotorealistinen renderointi**

Tässä luvussa käsitellään renderointia osana fotorealistista 3D-ympristöä. Renderointi on 3D-mallien muuntamista 2D-kuvaksi, sekä globaalin valaistuksen simulointia tietokoneohjelmalla. Tässä tutkielmassa keskitytään tarkemmin esirenderointiin (engl. pre-rendering), joka on niin sanottua kaikessa rauhassa tapahtuvaa offline-renderointia. Tällaisen esirenderoinnin vastapuolen tutkimuskohteena esiintyy tunnetusti peleissä käytetty reaaliaikainen renderointi, johon tarvitaan nopeaa laskenta-aikaa, mutta karsimista realismisuudesta. Tästä tutkielmasta jätetään pois reaaliaikaisen renderoinnin tarkastelu, ja keskitytään ainoastaan offline-renderointiin. Offline-renderointi tarkoittaa siis renderointia, jossa laskenta-aika on epäoleellinen, ja käytetään aikaa lähes niin paljon kuin ikinä tarvitsee tarpeeksi fotorealistisen lopputuloksen saamiseksi. Usein saatetaan käyttää useampia renderointitekniikoita yhdessä, jotta saadaan todella vaikuttavia fotorealistisia kuvaruutuja. Renderoinnin lopputuloksena saadaan yksi kuvaruutu, 2D-kuva, joka muodostuu reaali maailmassa kuvatusta filmiaineistosta sekä tietokoneella luoduista malleista.

Seuraavassa luvussa avataan renderointia yleisellä tasolla, minkä jälkeen vertailemme aiemmin mainittuun globaalin valaistukseen perustuvia renderointimenetelmiä, säteenseurantaa sekä kuvapohjaista valaistusta. Kummallakin niistä on omat algoritminsa, mutta niiden perusideat ovat samanlaisia valaistuksen käsittelyyn liittyen.

#### **3.1 Renderoinnista yleisesti**

Fotorealistisen renderoinnin tehtävänä on luoda kullekin kuvaruudulle edellytykset kompositointiin, joka koostuu kuvatusta kohtauksesta sekä tietokoneella luodusta grafiikasta. Renderointi on aikaavievä prosessi, johon tarvitaan paljon laskentatehoa tietokoneelta. Prosessiin kuuluu artistin kädenjälkeä, jotta saadaan renderoinnin kaikki palaset oikeisiin paikkoihin. Tämä tarkoittaa renderointiparametrien säätämistä ja testaamista, jotta saadaan haluttu fotorealistinen lopputulos. Esimerkiksi 'The Digital Emily' -projektissa (Alexander ym. 2009) yhdeltä renderointiartistilta kului kolme kuukautta parametrien säädössä, jotta saatiin haluttu lopputulos. Projektissa luotiin todella aidon näköinen digitaalinen näyttelijä, jonka ilmeet ja

kasvojen pinta oli sensorikuvattu realistisen lopputuloksen takaamiseksi. Tämänkaltaisessa offlinerenderoinnissa (ihon) pinnan heijastuksia ei kannattaisi jättää varjostuksen armoille, vaan artistin tulisi itse värittää heijastuva valo peiliominaisuuden mukaan kussakin tilanteessa.

Renderoinnin vaatimukset elokuva-alalla ovat todella tiukat, ja varsinkin toteuttaessa fotorealistisia renderointeja vaatimukset korostuvat entisestään. Tarkastellaan seuraavaksi yleisiä elokuvien renderointivaatimuksia. Kohtauksen geometriset objektit ovat tessellaation (engl. tessellation: tehdään kulmikkaista suorasegmenteistä pyöristettyjä käyriä) jälkeen aivan liian suurikokoisia mahtuakseen tietokoneen muistiin. Seuraavan luvun säteenseurantaa koskien huomataan, että se on tehokasta ja järkevää toteuttaa vain, jos kohtausta mahtuu muistiin. Tessellaation osat, eli polygonit, tulee siis säilöä siten, että niitä voidaan renderoidessa käyttää tarpeen vaatiessa halutulla tarkkuudella. (Christensen ym., Sept 2006).

Muistiongelmia renderoinnissa tuottaa myös tekstuurien määrä (varsinkin täydellä resoluutiolla), jolloin pitäisi ottaa huomioon myös kunkin säteen törmäyspisteen heijastusparametrit. Lisäksi valonlähteitä voi olla tuhansia, mikä ainakin säteenseurannassa aiheuttaa vajetta suorituskykyyn. Fotorealistisessa renderoinnissa kuitenkin suorituskyky on toissijainen arvo, sillä nykyään laskentatehoa on helppo lisätä, ja laittaa kuvan laatu ensi sijalle. Dachsbacher ym. 2014 esittävät edellä mainitulle, suurelle määrälle valonlähteitä, vaihtoehtoisen toteutustavan uuden menetelmän avulla. Sen mukaan renderointi toimii hyvin valon skaalautuvuuden suhteen, suurella materiaalivalikoimalla sekä tärkeimpänä renderointiaika on hyvin ennustettavissa.

Renderointia voidaan tehostaa hyvin laskenta-ajan puitteissa, kun jaetaan renderoitava kohtausta niin moneen pienempään palaseen kuin mahdollista. Näitä pienempiä palasia ovat muun muassa varjot, syvyysaste, värit, spekulaaisuus, heijastus ja okkluusio. Tällöin jokaista fotorealistiseen lopputulokseen vaikuttavaa osaa voidaan muokata ja hioa ilman, että tarvitsee renderoida koko kohtausta joka kerta uudestaan. (Robbins 2014). Tämä osiin jakaminen on hyvin hyödyllistä elokuvauksessa, sillä artistit käsittelevät valtavia kokonaisuuksia. Samalla saadaan suorituskykyä tietokoneen muistin suhteen, kun käsitellään pienempiä kokonaisuuksia, eikä tietokoneen koko laskentateho mene pitkäksi aikaa yhteen suureen renderointiin. Suurissa kokonaisuuksissa kertarenderointi ei välttämättä ole edes mahdollista, kun muis-

tin yläraja tulee vastaan. Yllä kuvattua menetelmää kutsutaan moniajorenderoinniksi (engl. multi-pass rendering) (Robbins 2014).

## 3.2 Säteenseuranta

Säteenseuranta (engl. ray tracing) on hyvin yleinen globaaliin valaistukseen perustuva renderointimenetelmä (Joon, Hui ja Chan 2008), jossa kutakin kohtauksen pikseliä kohden lähetetään säde. Säteelle seurataan sen törmäyspisteitä, jotka ovat 3D-objektien pinnalla. Näin saadaan haettua pinnan materiaali, ja seurattua sädettä saadun arvon perusteella eteenpäin. Säde kimpoilee yleensä ennaltamäärätyn arvon verran luoden heijastuksia ympäröiviin objekteihin, joihin säteet osuvat.

Seuraava osa on pseudokoodi säteenseuranta-algoritmille (Matusik, Lehtinen ja Durand 2012), jossa edetään säteiden heijastuksia rekursiivisesti niin pitkälle kuin asetettu ehto sallii. Lisäksi tarkistetaan joka säteelle, onko osunut pinta peilipinta tai läpinäkyvä, ja kutsutaan rekursiota sen mukaisesti.

---

```
trace ray
    Intersect all objects
    color = ambient term
    For every light
        cast shadow ray
        color += local shading term
    If mirror
        color += color_refl * trace reflected ray
    If transparent
        color += color_trans * trace transmitted ray
```

---

Yllä olevan pseudokoodin rekursion syvyys määräytyy säteiden kimpoilujen määrän mukaan. Rekursio voidaan myös pysäyttää, mikäli jokin heijastus on epäoleellisen heikko, eikä näy tarpeeksi. Tällöin säästetään laskenta-aikaa, kun ei turhaan seurata säteitä, jotka eivät luo mitään uutta kuvaan. Tämä on optimointikysymys, jota tulee tarkastella elokuvauksessa aina tilannekohtaisesti. Rekursion haluttu syvyys riippuu kuvatusta kohtauksesta, valon

renderoinnin gammakorjauksesta (kuinka pimeä tai äärimmäisen kirkas kohta on), sekä tietysti pinnan heijastavuudesta.

Oikeaa elämää jäljiteltäessä heijastuksissa tulee ottaa huomioon likaisuus ja sumeus (engl. blur). Kaikki pinnat eivät heijasta täydellisesti, joten säteidenkään ei tarvitse seurata jokaista heijastumista täydellisesti. Näin säästetään kallisarvoista suoritusaikaa renderoinnin suhteen. Tämän perusteella voidaan myös määrittää säteenseurajalle yläraja sille, kuinka kauas heijastukset (kiiltävistä) pinnoista osuvat (Christensen ym., Sept 2006).

Fotorealismien suhteen säteenseurannalla renderoitu kuva on sitä realistisempi ja parempilaatuisempi, mitä enemmän säteitä kutakin pikseliä kohden seurataan.

### **3.3 Kuvapohjainen valaistus (IBL)**

Kuvapohjainen valaistus (engl. Image-based lighting) on todella hyvä renderointimenetelmä, kun halutaan sulauttaa tietokoneella luotua grafiikkaa reaali maailman otokseen. Tällöin käytetään reaali maailman kuvaus session valaistusta, jota mitataan ja josta tehdään valaisukarttoja. Valaisukartat pitävät pallon muotoisessa kuvassa tiedon valon oleellisista pisteistä ja tulokulmista. Näitä valaisukarttoja hyödynnetään 3D-mallinnusohjelmissa, jotta saadaan yhteinen globaali valaistus koko kohtaukselle. (Pessoa ym. 2008). Tarkastellaan tämän menetelmän hyötyä tässä luvussa.

Kuvapohjaisen valaistuksen ensimmäiset merkittävimmät valkokankaalla esiintyvät elokuvat ovat lähtöisin 1990-luvulta. Tällöin esimerkiksi elokuvassa Jurassic Park käytettiin kuvapohjaista valaistusta, mutta sen realismi ei yllä 2000-luvun tasolle (Snow 2010). 2000-luvun alkupuoliskolla Debevec 2008 esitti menetelmään huomattavaa parannusta renderoinnin fotorealismien kannalta, kun hän toi mukaan HDR-kuvauksen (engl. High Dynamic Range imaging) globaalin valaistuksen rinnalle. Tänä päivänä kuvapohjaisessa valaistuksessa yksi hyödyllisimmistä ominaisuuksista on sen kyky kaapata HDR-kuvan arvoja. HDR-kuvassa oleellista on mitata kirkkauden tasoja kohtauksen eri kohdissa, mikä toisin sanoen tarkoittaa kuvan tummimpien ja kirkkaimpien kohtien välistä kontrastisuhdetta (Pessoa ym. 2008). HDR-kuvittamista käytetään nimenomaan realismien saavuttamiseen, ja se sopii hyvin käytettäväksi elokuvauksessa, jossa täytyy yhdistää synteettisiä objekteja kuvattuun kohtaukseen.

Kuvaillaan seuraavaksi kuvapohjaisen valaistuksen 4-vaiheinen toimintaperiaate. Menetelmän ensimmäinen vaihe on yllä kuvatun HDR-kuvan luominen siten, että jäljitellään reaali maailman valaistusta omnidirektionaalisesti (engl. omnidirectional: havainnollistetaan ympäristöä 360° kuvakulmasta). Valoarvoja tallennetaan siten pallon muotoisen mallin mukaisesti. Toinen vaihe on valaistuksen kartoittaminen tietokoneella luotuun 3D-kohtaukseen, joka tarkoittaa omnidirektionaalisen HDR-kuvan asettamista kohtaukseen. Kolmas vaihe on ympäristön luonnin jälkeen kohtauksessa käytettävien 3D-objektien sijoittaminen edellä luotuun 3D-ympäristöön. Neljäs ja viimeinen vaihe on toteutusvaihe, eli ympäristön valon simulointi. Omnidirektionaalista valomallia simuloitaessa valaistaan 3D-objektit ympäristössä. (Debevec 2005).

Yllä kuvatun kuvapohjaisen valaistuksen ensimmäisen vaiheen HDR-kuvaa kutsutaan niin sanotusti valopalloksi (engl. light probe). Valopallon luonti on tärkeä vaihe, koska hyvin määriteltynä se helpottaa valaistusmallin asettamista kohtaukseen. Valmiita HDR-kuvia valopalloista löytyy julkisesti saatavilla, mutta Debevec määrittelee valopallon luonnin vaiheet seuraavasti. (Debevec 2010).

1. Kohtauksen keskellä olevasta heijastavasta pallokappaleesta otetaan kaksi HDR-kuvaa
2. Rajataan kuvat pallon ääri viivojen mukaisesti
3. Paikannetaan kuvien koordinaatit niiden yhdistämistä varten
4. Poistetaan kuvien vääntymiset ja käännetään, jotta panoraamat täsmäävät
5. Yhdistetään panoraamakuvat

Näin tehtynä lopputuloksena on valopallo, joka näyttää esimerkiksi seuraavanlaiselta.



Kuvio 1. Valopallomalli paikasta Uffizi Galleria, Firenze (Debevec 2005)

Tällä menetelmällä tehtynä vain yksi valopallo on riittävä koko kohtauksen valaisemiseen. Useamman valopallon käyttäminen vaatisi tutkimusta sen todellisista hyödyistä, joita ei tämänhetkisen näkemyksen mukaan ole tarpeen käyttää. Debevec 2010 esittämän menetelmän heikkoudet ovat todella pienet. Ainoat ongelmat valopallomallin käytössä ovat kaukaiset valonlähteet suhteessa valopallon sijaintiin, kun kaapataan HDR-kuva. Ne saattavat mallintua valopalloon väärällä tavalla, mikä tarkoittaa, että valaistus näissä pikseleissä on joko heikko tai muuten reaali maailman valosta poikkeava. Tosin tämä virhe on niin pieni, että se ei vaikuta lopputulokseen fotorealismien kannalta. (Pessoa ym. 2008).

Valopallon luonnin jälkeen jäljellä olevat kuvapohjaisen valaistuksen vaiheet ovat yksinkertaisia, ja vaiheiden yksinkertaisuuden vuoksi emme käsittele niitä tässä tutkielmassa. Kun valopallo on tehty, HDR-kuva ja sen sisältämiä arvoja käytetään tietokoneohjelmassa, jossa valaistaan 3D-objektit kohtausta varten. Seuraavassa luvussa vertaillaan käytyjä renderointimenetelmiä.



## 4 Renderointimenetelmien vertailu

Tässä luvussa vertaillaan aiemmin esiteltyjä renderointimenetelmiä, joita ovat säteenseuranta ja kuvapohjainen valaistus. Esitetään kummallekin menetelmälle sopivat käyttötarkoitukset, sekä yhtäläisyydet ja erot fotorealismien kannalta elokuvauksessa. Vertailun pohjana ovat yllä käydyt kunkin menetelmän ominaisuudet, sekä tuon lähteiden ja vertailun lisäksi omaa näkökantani esille. Molemmat aiemmin esitetyt renderointimenetelmät hyödyntävät aiemmin mainittuja globaalien valaistuksen periaatteita. Menetelmiä voidaan renderoijasta riippuen joko yhdistellä tai käyttää sellaisenaan vain toista.

Säteenseurannan ja kuvapohjaisen valaistuksen suorituskykyä on vaikea verrata yksiselitteisesti, sillä suorituskyky riippuu vahvasti renderoijan (ohjelma, joka suorittaa renderoinnin) toteutuksesta ja algoritmeista. Säteenseurannasta voidaan kuitenkin todeta, että elokuvauksessa sen suoritusajaksi ei tule yltämään menetelmän parhaimmiston, sillä elokuvissa renderoidut suuret kohtaukset eivät mahdu kerralla muistiin. Renderointi hidastuu muistinhallinnan takia, jolloin suoritusajan suuruusluokka kasvaa moninkertaiseksi (Christensen ym., Sept 2006). Kuvapohjaisessa valaistuksessa osa ajankäytöstä kuluu valaistumallien luomiseen ja jäljittämiseen, mutta menetelmä tarjoaa säteenseurantaan verrattuna helpomman lähestymistavan, sillä valonsäteiden suunnat ovat tällöin tiedossa HDR-kuvassa (Lyytinen 2011). Fotorealismien vaatimusten suhteen nähdään selvästi, että kuvapohjainen valaistus on suorituskyvyltään parempi menetelmä näistä kahdesta.

Molemmat esitetyt renderointimenetelmät pyrkivät kuitenkin toteuttamaan moniajorenderoinnin viitekehystä (Agusanto ym. 2003), joten uudet menetelmät antavat enemmänkin vaihtoehtoja toteutustapoihin, kuin uusia tehokkaampia ja fotorealistisempia menetelmiä.

Säteenseurannan suorituskyky ei tänä päivänä ole toivotulla tasolla elokuvauksessa, mutta menetelmää käytetään silti laajasti. Tulevaisuudessa säteenseuranta saattaa nousta suosituimmaksi renderointimenetelmäksi, sillä tietokoneet ja muu laitteisto kehittyvät jatkuvasti. Tällä hetkellä ongelmana on ainoastaan muistinhallinta, johon on ehdotettu vaihtoehtoisia apumenetelmiä (Christensen ym., Sept 2006) säteenseuranta-algoritmien tehostamiseksi. Algoritmit käsittelevät renderointiyhtälön (Kajija 1986) soveltamista, mihin emme tässä tutkiel-

massa perehdy sen matemaattisen vaativuuden vuoksi. Kuvapohjainen valaistus puolestaan mielletään nykyisin erinomaiseksi menetelmäksi sen kätevyyden vuoksi. Sillä voidaan suhteellisen helposti matkia reaalimaailman kohtauksen valaistusta 3D-objektien valaisemiseen.

## 5 Kompositointi

Kompositointi on elokuvan kuvauksissa saadun filmin ja fotorealististen 3D-objektien yhdistämistä yhdeksi 2D-kuvaksi, jossa voi olla useita video- tai kuvatasoja päällekkäin (Afifi ja Hussain 2015). 3D-objekteja sisältävän kohtauksen kompositoinnin tarkoituksena on koota luvussa 4.1 mainitun moniajorenderoinnin kaikki ajot ja asettaa ne sopivilla parametreilla oikeisiin syvyystasoihin kolmiulotteisen avaruuden (xyz) z-suunnassa siten, että artistin kädenjälki on elokuvan kohtauksen mukainen (Kontkanen 2013). Kompositointi voi toki koostua myös useista reaali maailman kuvaus session videoista, joita laitetaan päällekkäin tietokonegrafiikan kanssa. Mikäli joku osa kuvasta vaatii lisähiomista, sitä on helppoa muuttaa, koska lopullinen kuva koostuu pienistä palasista, joihin päästään hyvin käsiksi. Tämän jälkeen vaaditaan vain uusi kompositointi tietokoneohjelmalla, ja tätä prosessia jatketaan, kunnes ollaan ihmissilmällä tyytyväisiä fotorealistiseen lopputulokseen. Tämänkaltainen menetelmä on tehokasta myös suorituskyvyn kannalta, sillä saadaan huomattavia voittoja muistinvarauksen suhteen. Tarkastellaan seuraavaksi kompositoinnin prosessin eri vaiheita.

### 5.1 Kompositoinnin vaiheet

Afifi ja Hussain 2015 määrittelee artikkelissaan kompositoinnin 4-vaiheisen prosessin, jonka vaiheita kuvaillaan seuraavaksi. Ensimmäinen vaihe on maskin luominen, minkä tarkoituksena on erottaa tietokonegrafiikan yhteyteen haluttu osa kaikesta muusta taustasta. Tähän tarkoitukseen käytetyin menetelmä elokuvauksessa on ehdottomasti chroma key (väriavainus). Chroma key -menetelmässä käytetään ympäristöstä ja näyttelijöistä suuresti poikkeavaa värikangasta, joka tunnetaan paremmin nimellä green screen tai blue screen (Afifi ja Hussain 2015). Tällöin voidaan tietokoneohjelmalla poistaa kyseinen vihreä tai sininen väri, jotta saadaan näyttelijä sijoitettua joko tietokoneella luotuun 3D-ympäristöön tai toiseen kuvattuun kohtaukseen.

Kompositoinnin toinen vaihe on jäljitys, joka tarkoittaa kameran tai muun liikkuvan objektin liikkeen seuraamista. Liikkeenseurantaan ei perehdytä tässä tutkielmassa enempää, jätetään se maininnan tasolle. Liikkeen estimoinnin jälkeen kolmas vaihe on liikkeenseurannalla

kaapatun näyttelijän tai muun liikkuvan objektin sulauttaminen muihin 3D-ympäristöihin. Tässä fotorealismiin saavuttaminen vaatii menetelmiä, joissa kopioidaan valitut sulautettavat pikselit kuvasta toiseen. Pikseleitä kopioitaessa saatetaan välttää kompositoinnin prosessin viimeinen vaihe, joka on värien korjaus. Värien korjauksessa ideana on saada sulautetut kuvat näyttämään siltä, kuin ne olisivat kuvattu samassa kohtauksessa. Tämä tarkoittaa siis värien muuttamisen kannalta valaistuksen korjaamista yhtenäiseksi kaikille kompositoinnin eri kerroksille. (Afifi ja Hussain 2015).

Värien korjaukselta saatetaan välttyä, jos käytetään renderoinnista lähtien kuvapohjaista valaistusta kohtauksen valaisemiseen (Debevec 2005). Tällöin mitä todennäköisimmin käsittelemme samaa valonlähdettä koko prosessin ajan, mikä on edukasta ajan ja resurssien käytön suhteen fotorealismiin saavuttamisen kannalta. Toisaalta säteenseurantaa käytettäessä värien korjauksen saattaa joutua tekemään, koska valonlähde ei ole kaapattu reaali maailmasta, vaan se on puhtaasti tietokoneella simuloitua (Joon, Hui ja Chan 2008). Kompositointia ajatellen kuvapohjaista valaistusta kannattaa käyttää, jos kohtauksia kuvattaessa reaali maailman valonlähde on voimakas globaali valo, kuten auringon valo. Elokuvaüksessa tulee muistaa kohtausten kontekstisidonnaisuus, mutta valaistuksen jäljittelemisessä kuvapohjaisella valaistuksella saatetaan selvitä vähemmällä työmäärällä.

## 6 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin fotorealististen 3D-objektien renderointia ja kompositointia elokuvauksessa. Elokuvauksella tarkoitettiin elokuva-alaa, jolla on oma sijansa tutkimusalueena fotorealistisessa tietokonegraafikassa. Fotorealistisia 3D-ympäristöjä luodessa lopputuloksessa luotetaan aina tietokoneohjelmaa käyttävän artistin silmään. Elokuvauksessa kaikki on hyvin kontekstisidonnaista laadun suhteen, ja parempi kompositointi on taattu, kun käytetään ihmisen harkintakykyä fotorealistisuudesta sen sijaan, että parametrit laskettaisiin olemassa olevilla kaavoilla (Afifi ja Hussain 2015). Sama pätee valaistukseen ja renderointiin; tietokoneella laskettuihin arvoihin ei voida luottaa sokeasti, vaan esimerkiksi juuri moniajorenderoinnin kaltaiset toimintamallit asettavat säännöksi parametrien hienosäädön sekä useat iteraatiot.

Fotorealismien saavuttaminen elokuvauksessa edellyttää globaalien valaistuksen menetelmien käyttöä. Tässä tutkielmassa käytyt renderointimenetelmät, säteenseuranta ja kuvapohjainen valaistus, toteuttavat globaalien valaistuksen periaatteita. Säteenseurannassa seurataan valonsäteitä ja niiden heijastuksia kaikkiin kuvan objekteihin nähden kullekin kuvan pikselille. Kuvapohjaisessa valaistuksessa valaistusta mallinnetaan reaali maailmassa kuvatusista kohtauksista HDR-kuvan avulla.

Renderointimenetelmistä kuvapohjainen valaistus osoittautuu tänä päivänä käyttökelpoisimmaksi sen helppokäyttöisyyden vuoksi. Sen suoritusaika on parempi säteenseurantaan verrattuna, ja se on paljon käytetty menetelmä elokuvissa. Kuvapohjaisella valaistuksella saadaan varmasti samansävyistä valaistusta kuin kuvatussa kohtauksessa videolle tallentunut valaistus, ja helpottaa näin 3D-objektien sulauttamista kohtaukseen. Säteenseuranta on menetelmistä suorituskyvyltään hitaampi, mutta sillä saadaan valaistua 3D-objekteja hyvin tarkasti. Säteenseuranta näkyy tänä päivänä yhä enemmän animaatioelokuvien renderointimenetelmänä (Christensen ym., Sept 2006).

Vielä tukeudutaan siis vahvasti artistien ammattitaitoon ja harkintakykyyn nähdä ihmissilmällä, milloin kukin kuvaruutu (engl. frame) täyttää fotorealismien vaatimukset. Tulevaisuudessa tulee oletettavasti olemaan algoritmeja, jotka kykenevät laskemaan ja määrittelemään

itsenäisesti fotorealistisen kuvaruudun. Näiden tulee ottaa huomioon laskenta-aika. Vaikka elokuvauksessa puhutaan vielä offline-renderoinnista ja kompositoinnista, ja laitteiden suorituskyvyt kasvavat jatkuvasti, mutta tekoälylliset algoritmit eivät silti saa jäädä hiomaan renderoinnin tiettyä kohtaa järjettömän pitkäksi aikaa. Kuten todettua, elokuvaus on hyvin kontekstisidonnaista, ja sen tulee noudattaa ohjaajien ja tietokonegrafiikkajohtajien näkemyksiä kohtauksista, mihin tekoäly lähitulevaisuudessa tuskin kykenee. Voimme kuitenkin luottaa tulevaisuuden tuovan tietokoneiden tehokkuuden kehityksen myötä uusien menetelmien syntyä, jotka mahdollistavat fotorealististen renderointien säätämistä yhä lähempänä reaaliaikaa. Reaaliaika on varteenotettava visio, myös elokuvauksessa.

## Lähteet

- Affi, Mahmoud, ja Khaled F. Hussain. 2015. “What is the Truth: A Survey of Video Compositing Techniques” [kielellä English]. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing; Hong Kong* 7, numero 8 (heinäkuu): 13–27. doi://dx.doi.org/10.5815/ijigsp.2015.08.02. <http://search.proquest.com/docview/1769786815/abstract/2612EDE9F84C459EPQ/1>.
- Agusanto, K., Li Li, Zhu Chuangui ja Ng Wan Sing. 2003. “Photorealistic rendering for augmented reality using environment illumination”. Teoksessa *Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings. The Second IEEE and ACM International Symposium on*, 208–216. IEEE, lokakuu. doi:10.1109/ISMAR.2003.1240704.
- Alexander, O., M. Rogers, W. Lambeth, M. Chiang ja P. Debevec. 2009. “Creating a Photoreal Digital Actor: The Digital Emily Project”, 176–187. doi:10.1109/CVMP.2009.29.
- Christensen, P. H., J. Fong, D. M. Laur ja D. Batali. Sept 2006. “Ray Tracing for the Movie ‘Cars’”. Teoksessa *Interactive Ray Tracing 2006, IEEE Symposium on*, 1–6. IEEE, 18-20 Sept. 2006. doi:10.1109/RT.2006.280208.
- Dachsbacher, Carsten, Jaroslav Křivánek, Miloš Hašan, Adam Arbree, Bruce Walter ja Jan Novák. 2014. “Scalable Realistic Rendering with Many-Light Methods”. *Computer Graphics Forum* 33 (1): 88–104. ISSN: 1467-8659. doi:10.1111/cgf.12256. <http://dx.doi.org/10.1111/cgf.12256>.
- Debevec, Paul. 2005. “Image-based Lighting”. Teoksessa *ACM SIGGRAPH 2005 Courses. SIGGRAPH ’05*. Los Angeles, California: ACM. doi:10.1145/1198555.1198709. <http://doi.acm.org/10.1145/1198555.1198709>.
- . 2008. “Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography”. Teoksessa *ACM SIGGRAPH 2008 classes*, 32. ACM.
- . 2010. *Creating a Light Probe*. <http://ict.debevec.org/~debevec/HDRShop/tutorial/tutorial5.html>.

- Joon, J. S., S. E. Hui ja Y. M. Chan. 2008. "Understanding the Technicalities of Photorealistic 3D Environments to Support Cinematography and Composition for Film and Animation". Teoksessa *2008 Fifth International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualisation*, 49–54. ID: 1. doi:10.1109/CGIV.2008.28.
- Kajiya, James T. 1986. "The rendering equation". Teoksessa *ACM Siggraph Computer Graphics*, 20:143–150. 4. ACM.
- Kontkanen, Pekka. 2013. *Kompositointi 3D-liikegrafikassa* [kielellä fi]. <http://www.theseus.fi/handle/10024/65351>.
- Lyytinen, Jukka-Pekka. 2011. *TELEVISIOMAINOKSEN JÄLKIKÄSITTELY*.
- Matusik, Wojciech, Jaakko Lehtinen ja Fredo Durand. 2012. *Ray Tracing*.
- Pessoa, Saulo A., Eduardo L. Apolinário, Guilherme de S. Moura ja João Paulo S do M Lima. 2008. "Illumination techniques for photorealistic rendering in augmented reality". *X Symposium of Virtual and Augmented Reality*.
- Robbins, Russell W. 2014. "Computer graphics and digital visual effects".
- Snow, Ben. 2010. "Terminators and Iron Men: Image-based lighting and physical shading at ILM". part of "*Physically Based Shading Models in Film and Game Production*," *SIGGRAPH*.
- Talvala, Eino-Ville, Andrew Adams, Mark Horowitz ja Marc Levoy. 2007. "Veiling glare in high dynamic range imaging". Teoksessa *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26:37. 3. ACM.
- Tunwattanapong, Borom, ja Paul Debevec. 2009. "Interactive Lighting Manipulation Application on GPU", 85:1–85:1. New York, NY, USA: ACM. doi:10.1145/1599301.1599386. <http://doi.acm.org/10.1145/1599301.1599386>.