

Ville Kurimo

Virtuaalitudioratkaisu videotuotantoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikka

Insinööriyö

23.5.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Ville Kurimo
Otsikko: Virtuaalitudioratkaisu videotuotantoon
Sivumäärä: 35 sivua
Aika: 23.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Tieto- ja viestintätekniikka
Ammatillinen pääaine: Mediatekniikka
Ohjaaja: Lehtori Toni Spännäri

Opinnäytetyönä tehtiin pohjatutkimus ja -kuvaus virtuaalituotannon toteutukseen. Työn tavoitteena oli saavuttaa realistinen henkilön sijoittaminen täysin virtuaaliseen ympäristöön reaaliajassa seurantateknologian ja videoefektien avulla.

Opinnäytetyössä perehdyttiin yleisimpiin virtuaalituotannon tuotantotyyppeihin ja teknologioihin ja tehtiin yritysasiakkaalle virtuaalituotannon suunnittelu ja toteutus. Asiakkaalle toteutettiin alkuperäisestä suunnitelmasta poikkeava tuotantolinja. Ongelmaksi osoittautuivat varsinkin saatavuusongelmat maailmantilanteen takia. Tämän takia jouduttiin valitsemaan väliaikaista kalustoa ja olemaan joistain osista maahan-tuojaan yhteydessä, jotta osat voitiin toimittaa suoraan tehtaalta. Itse virtuaalitudion rakentamisessa ongelmaksi nousi tilan katto, jota varten tarvitsi tehdä mittatilausosia. Seurantajärjestelmien hankinnassa ongelma oli niin ikään budjetti, saatavuus ja käytötarkoituksen laajuus. Tämä ratkaistiin kilpailuttamalla useampi yritys ja tekemällä päätökset sen pohjalta.

Asiakasprosessin käytäntöönpanossa hyödynnettiin sitä, että asiakas pystyi antamaan kaikki toiveensa heti ja ne voitiin toteuttaa ennen varsinaista tapahtumaan valmiiksi. Toimintamalli toimi olosuhteisiin nähden hyvin. Ongelmaksi muodostui se, ettei asiakas ollut ottanut huomioon studion toiveita tilan koosta ja valaistuksesta. Tästä johtuvia kuvan vääristymiä pyrittiin korjaamaan linssin korjaavalla maskilla. Käytännön esimerkissä toteutetaan alkuperäisestä suunnitelmasta poikkeava tuotantolinja ja sen ongelmakohtien ratkaisu. Opinnäytetyön raportissa selvitetään myös asiakasprosessin käytäntöönpanoa ja uuden tuotantomallin toimivuutta koeympäristön ulkopuolella. Työssä korostetaan käytännönläheisiä ratkaisuja ja kustannustehokkuutta hankinnoissa. Kustannuksissa huolehdittiin tekemällä vertailua ja kilpailutuksia eri tuotteiden ja yritysten välillä. Virtuaalitudion rakensi asiakasyrityksen markkinointipäällikön oma urakointiyritys. Lisäksi pyrittiin hyödyntämään jo aiemmin hankittua kalustoa mahdollisimman paljon.

Työn lopputuloksena syntyi toimiva virtuaalitudioratkaisu ja tuotantolinja uusien asiakkaiden tuomiseen prosessiin. Tuotantolinja vaatii vielä optimointeja mahdollisimman suuren kuvausvapauden tavoittamiseksi ja uuden seurantajärjestelmän integraation studioon. Työ on ennen kaikkea soveltuvuus selvitys virtuaalituotannon mukaan tuomisesta perinteisen tuotannon rinnalle yrityksessä.

Avainsanat: virtuaalituotanto, pelimoottori, videotuotanto

Abstract

Author: Ville Kurimo
Title: Virtual studio solution for video production
Number of Pages: 35 pages
Date: 23 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information and Communications Technology
Professional Major: Media Technology
Supervisor: Toni Spännäri, Senior Lecturer

This thesis was a basic research and description for the implementation of virtual production. The aim of the study was to achieve a realistic placement of a person in a fully virtual environment in real time using tracking technology and video effects.

The thesis explored the most common types and technologies of virtual production and designed and implemented a virtual production for a corporate client. A production line was implemented for the client that deviated from the original plan. Availability problems, due to the global situation, proved to be an on-problem. As a result, temporary equipment had to be selected and, for some parts, the importer had to be contacted so that the parts could be supplied directly from the factory. The problem with the construction of the power substation itself was the roof of the space, for which custom-made parts had to be made. The procurement of monitoring systems was also a problem of budget, availability, and scope of use. This was solved by putting several companies out to tender and making decisions based on that.

The implementation of the customer process took advantage of the fact that the customer could give all his wishes immediately and they could be implemented before the actual event was completed. The approach worked well under the circumstances. The problem was that the client had not considered the studio's wishes regarding the size and lighting of the space. The resulting image distortions were corrected with a lens correction mask. In this practical example, a different support line from the original design is implemented and its problems solved. The thesis report also examines the implementation of the customer process and the functionality of the new production model outside the experimental environment. The thesis emphasizes practical solutions and cost-effectiveness in procurement. The virtual studio was built by the client's marketing manager's own contracting company. In addition, efforts were made to make maximum use of equipment already purchased.

The result of this study was a functioning virtual studio solution and a production line for bringing new customers into the process. The production line still requires optimization to achieve the highest possible shooting freedom and integration of the new monitoring system into the studio. This thesis is first and foremost a feasibility study on the introduction of virtual production alongside traditional production in a company.

Keywords: virtual production, game-engine, video production

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Virtuaalituotannon projektityypit	4
2.1	Täysin animoidut virtuaalituotannot	4
2.2	Live-action-virtuaalituotanto	5
3	Virtuaalituotannon eri tyypit	6
3.1	Visualisaatio	6
3.2	Liikkeentallennus	8
3.3	Hybridivirtuaalituotanto	10
3.4	LED-volyymien kameran sisäinen virtuaalituotanto	11
4	Tuotantolinjan toteutus	13
4.1	Virtuaalitudion rakennus	14
4.2	Laitteiston valinta	16
4.3	Ohjelmiston valinta	24
5	Tuotanto käytössä	25
5.1	Reaaliaikaisen lähetyksen valmistelu	26
5.2	Toimitusongelma ja ratkaisu	28
5.3	Lähetystilanne	35
6	Yhteenveto	37
	Lähteet	39

Lyhenteet

- VP: *Virtual Production* eli virtuaalituotanto yhdistää saumattomasti fyysiset ja virtuaaliset elementit ohjelmistotyökalujen avulla. Studiot voivat kuvata lavalla ja tarkastella virtuaaligrafiikkaa yhdessä reaaliaikaisesti. Ohjaajat, näyttelijät ja muut sidosryhmät näkevät lopulliset elokuvamateriaalit ja voivat tehdä muutoksia välittömästi.
- CGI: *Computer-Generated Imagery* eli tietokoneella tuotettu kuva on tietokonegrafiikan käyttöä kuvien luomiseksi tai tuottamiseksi taiteessa.
- VAD: *Virtual Art Department* tuottaa kaikki materiaalit, kuten hahmot, rekvisiitat ja lavasteet, matalalla resoluutiolla perinteistä pre-visio-, visuaaliset efektit-, jälki- ja virtuaalituotantoa varten.
- Pre-vis: *Pre-vis* on tuotantoa edeltävä prosessi, jossa elokuvan, mainoksen tai musiikkivideon kohtaukset kartoitetaan visuaalisesti ennen pääkuvausta.
- Stunt-vis: Tässä erityisessä pre-vis-muodossa käytetään 3D-materiaaleja live-action-temppujen suunnitteluun ja toteutukseen. Kutsutaan myös toimintasuunnitteluksi.
- Tech-vis: 3D-materiaalien käyttäminen kohtausten teknisen analyysin tekemiseen, eli kameratyyppi, objektiivit, etäisyydet, lavastusvaatimukset, stuntit ja kaikki muut tiedot, joita tarvitaan fyysiseen kuvaamiseen, ennen kuin kuvauspaikalle siirrytään.
- Post-vis: *Post-vis-prosessissa* visualisoidaan ja suunnitellaan elokuvan visuaaliset tehosteet sen jälkeen, kun live-action-elementit on kuvattu, alustavien kuvien luomiseksi, leikkauksen muodostamiseksi ja elokuvan koekuvaamiseksi, ennen kuin investoidaan lopullisiin visuaalisiin efekteihin.

1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena oli luoda yritykselle Cine-A toimiva virtuaalitudion tuotantolinja ja itse virtuaalitudion. Tavoitteena oli saavuttaa realistinen henkilön sijoittaminen täysin virtuaaliseen ympäristöön reaaliajassa seurantateknologian ja videoefektien avulla.

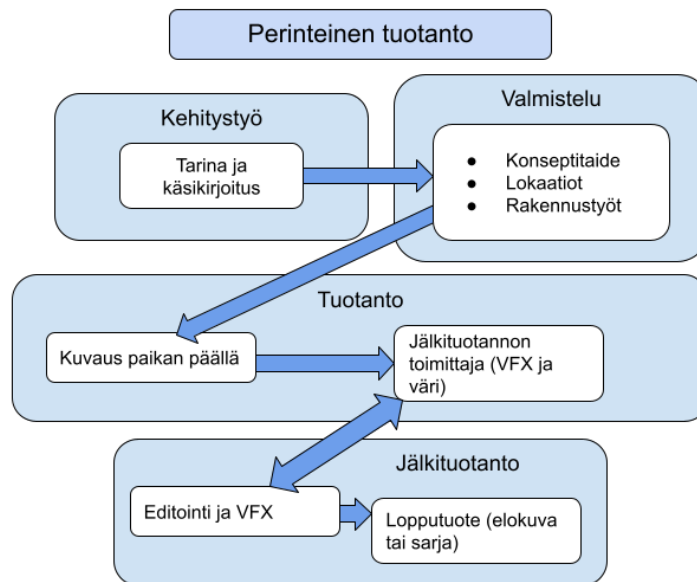
Virtuaalituotanto on laaja termi, jolla tarkoitetaan tietokoneavusteisen tuotannon ja visualisoinnin menetelmiä. Kyse ei ole vain itse teknologiasta, vaan myös menetelmistä, joilla sitä käytetään. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan sekä teknologiaa että virtuaalituotannon menetelmiä. Virtuaalituotannon tyypit, joita käsitellään tässä opinnäytetyössä, ovat visualisointi, performanssikaappaus, LED-seinät ja green screen -tuotanto. Virtuaalituotanto on ainutlaatuinen fyysisen ja digitaalisen elokuvantekemisen risteys: pelimootorit ja elokuvantekotekniikat yhdistyvät esi- ja tuotantoprosessissa.

Elokvien ja sarjojen tuottaminen on jatkuvasti kehittyvä taiteellinen ja teknologinen prosessi. Ei tarvitse katsoa kauas historiassa ensimmäiseen äänielokuvaan The Jazz Singer (1927) ja verrata sitä esimerkiksi James Cameronin Avatar-elokuvaan nähdäkseen hurjan teknologisen kehityksen tarinankerronnan työkaluissa. Vaikka nämä kaksi elokuvaa ovat asiasisällöltään ja tuotannoltaan todella kaukana toisistaan, näillä kahdella esimerkillä on kuitenkin yksi ja sama päämäärä: viihdyttää katsojaa hyvällä tarinalla.

Kun puhutaan virtuaalisesta tuotannosta ja sen tarjoamista eduista, puhutaan oikeastaan seuraavasta loogisesta kehitysaskelista tarinankerronnan työkaluissa Useimmissa nykyisin tuotetuissa suurissa elokuvissa ja televisiosarjoissa hyödynnetään jo jonkinlaista virtuaalituotantoa. Se voi olla pre-vis-, tech-vis- tai post-vis-menetelmää. Todennäköisesti virtuaalituotannon mahdollisuudet vievät tuotannon mahdollisuudet paljon nykykäyttöä pidemmälle.

Perinteisen elokuvatuotannon rajoitukset

Monet elokuvat nykyään ovat monimutkaisia tuotantoja, joissa on paljon liikkuvia osia erittäin tiiviissä aikataulussa. Prosessi on tyypillisesti liukuhihnaa muistuttava, ja se sisältää kehitystyön, esituotannon ja tuotannon. Usein tuotantoprosessi on loppuvaiheessa irtautunut eri toimipisteisiin ja alihankkijoihin, jolloin resurssit ovat yhteensopimattomia. Perinteisessä tuotannossa (kuva 1) iterointiprosessi tuhlataan usein yhteisen lähtökohdan etsimiseen sen sijaan, että jalostettaisiin yhteistä visiota.



Kuva 1. Perinteisen elokuvatuotannon kulku.

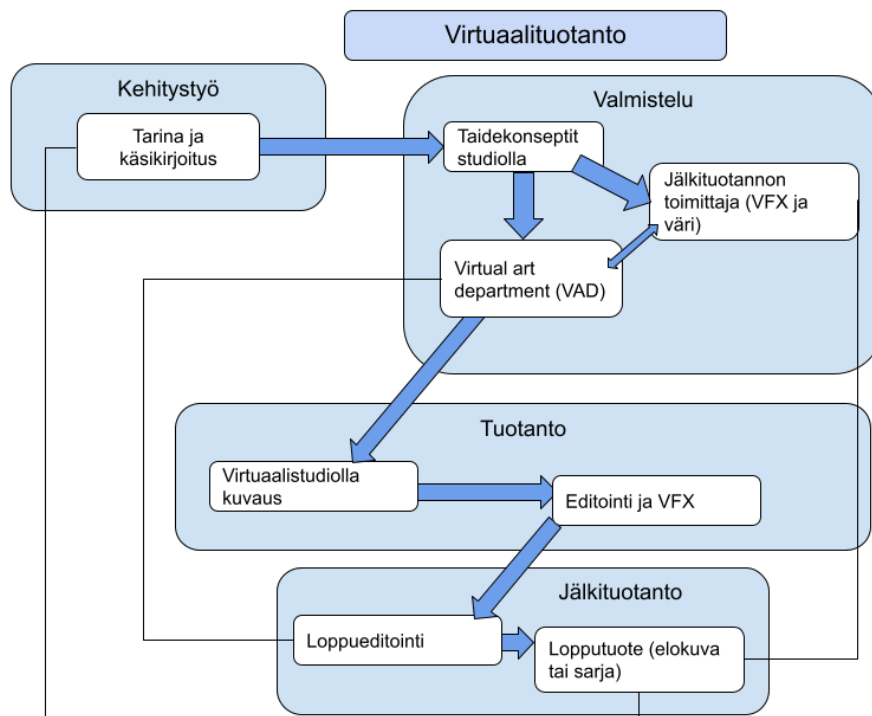
Tämä dilemma ilmenee elokuvantekijöiden epävarmuutena. Epävarmuutta esiintyy silloin, kun valaisijan on arvattava valaistuksen värisävy ja voimakkuus vastaamaan näkymätöntä green screenin tilalle tulevaa elementtiä tai kun elokuvantekijä ei tiedä tarkalleen, miltä kohtauksessa oleva olento näyttää.

Kuten kuvassa 1 näkyy, jälkituotanto on kokonaisprosessi, joka tuntuu irralliselta ja joka ratkeaa vasta, kun kaikki otokset on saatu valmiiksi. Visuaalisen erillisyyden vuoksi kaikkia tuotantoon tuotuja ammattitaitoja ei välttämättä

hyödynnetä prosessissa täysin. Viimeistely tehdään jälkituotantoprosessin loppuvaiheessa, jolloin suuret iteratiiviset korjaukset ovat parhaimmillaan kohtuuttoman kalliita ja pahimmillaan mahdottomia tiukan julkaisu-aikataulun vuoksi.

Virtuaalituotannon tarjoama ratkaisu

Perinteisistä tuotantotekniikoista poiketen virtuaalituotanto painottuu iteratiivisempaan yhteistyöhön perustuvaan prosessiin. Kuten kuvassa 2 näkyy, se antaa elokuvantekijöille mahdollisuuden muokata visuaalisia yksityiskohtia yhteistyössä juuri nyt.



Kuva 2. Elokuvan virtuaalituotannon tuotantoketju.

Virtuaalituotannossa iterointi alkaa paljon aikaisemmin tuotantoaikataulussa kuin perinteisessä tuotannossa. Reaaliajassa pyörivän pelimoottorin kanssa voidaan tuottaa korkealaatuista kuvaa alusta alkaen. Sen sijaan, että eri tiimit loisivat yhteensopimattomia, toisistaan erillään olevia resursseja, resurssit ovat riittävästi yhteensopivia ja käyttökelpoisia visualisoinnista lopputulokseen asti. Merkittävää visuaalisia tehosteita sisältäviä otoksia ja jaksoja on mahdollista editoida

samalla tavalla kuin perinteisiä kohtauksia ilman tehosteita. Editoiija tekee leikkauksia pääkuvauksen aikana, jotta kuvausryhmä voi välittömästi kuvata korjauksia tai tehdä korjauksia kuvausten aikana sen sijaan, että se saisi tietää ongelmista vasta pääkuvauksen päätyttyä. Näin voidaan säästää kuvauspäiviä. Tuloksena on paljon parempi jatkuvuus, johdonmukaisuus ja kuvauspaikan hallinta. Lavasteet voidaan rakentaa tarkempien määrittelyjen mukaan, ja ne vastaavat paremmin elokuvantekijöiden näkemystä. Stuntit ja erikoistehosteet voidaan valmistella etukäteen ja toteuttaa turvallisemmin, ja visuaalisten tehosteiden integrointi voidaan toteuttaa mahdollisimman tehokkaalla tavalla. Visuaalisten efektien tiimit voivat myös tehdä suoraa yhteistyötä, koska reaaliaikaiset resurssit ja efektikuvat voivat käyttää samaa perusmallia.

Hyödyntämällä virtuaalisia tuotantotekniikoita pelimoottorin avulla verkostosarjat, suoratoistotuotannot ja indie-elokuvat voivat kaikki saada aikaan korkealaatuisia kuvamateriaalia ja paljon suurempaa laajuutta. Pelimoottori voi poistaa monia budjetointiin ja kehitysaikaan liittyviä ongelmia, jotka voivat estää pienempiä tuotantoja tuottamasta kuvamateriaalia, joka on samaa luokkaa suurten elokuvien kanssa.

2 Virtuaalituotannon projektityypit

Hankkeita ja projekteja, jotka soveltuvat virtuaalituotantoon, on kaikenlaisia ja kaikenkokoisia. Periaatteessa ei ole elokuvaprojektia, joka ei voisi käyttää virtuaalituotannon joitakin tekniikoita hyväkseen; tuotantotyypit voivat skaalautua todella pienellekin budjetille sopiviksi. Budjetti on yleensä muutenkin suurin projektin laajuutta rajoittava tekijä, jolloin settikustannusten eli setin rakentamiseen liittyvät kustannukset ja kuvauskohteiden karsiminen vaikuttaa järkevältä vaihtoehdolta.

2.1 Täysin animoidut virtuaalituotannot

Virtuaalisesti esitysten kaappaaminen on jo nyt muuttanut merkittävästi monien elokuva-alalla työskentelevien tapaa tehdä animaatioelokuvien tuotantoa.

Varhaisissa käsin piirretyissä elokuvissa animaattorit käyttivät referenssimateriaalia saadakseen aikaan elävämpää animaatiota. Rotoscoping on tekniikka, jossa videomateriaalin yksittäisiä ruutuja jäljitetään realistisen liikkeen luomiseksi (Bennett & Carter 2014: 584). Menetelmän keksi alun perin vuonna 1915 Max Fleischer, jonka Fleischer Studios sovelsi sitä animaatiohahmoihin, kuten Betty Boopiin, Kippariin ja Teräsmieheen. Disney käytti tämän prosessin muunnelmaa kuvaamalla näyttelijöitä, jotka näyttelivät kohtauksia viitteellisesti, ja käyttämällä sitä sitten animaation liikkeiden ohjaamiseen, vaikka niitä ei jäljitettykään tarkasti ruutukohtaisesti. Tekniikan avulla animaattorit saivat aikaan elävän liikkeen, mutta eivät olleet jäykästi sidottuja elävän toiminnan kuvamateriaaliin (Bouldin, Koivunen & Paasonen 2001: 48–54).

Performance capture eli liikkeentallennus on rotoscoping-tekniikan virtuaalinen vastine, jossa näyttelijän vartalon ja kasvojen liikkeet tallennetaan tarkasti, jotta ne voidaan siirtää digitaalisiin hahmoihin ja ympäristöihin. Liikkeentallennuksen avulla animaatioelokuvat saadaan paljon realistisemmiksi ja elävämmiksi, ja itse animaatio tapahtuu paljon nopeammin ja kustannustehokkaammin verrattuna manuaalisiin animaatioprosesseihin. Liikkeentallennukseen yhdistetään usein virtuaalikameroihin, jolloin elokuvantekijät luovat kameraliikkeitä käyttämällä robotisoituja kamerarigejä tai muita seurantalaitteina kameran liikkeiden tallentamiseksi, jotka voidaan sitten jäljitellä virtuaalisessa ympäristössä. Monissa animaation erikoistuneissa yrityksissä, kuten Pixarissa, Dreamworksissa ja Illuminationissa, hahmot on edelleen animoitu manuaalisesti keyframe-animaation avulla. (Ansara & Joslin, 2017: 137–147.)

2.2 Live-action-virtuaalituotanto

Virtuaalituotantoa on käytetty useiden suurten elokuvien kuvien suunnitteluun tai suoraan parantamiseen. Tyypillisesti virtuaalituotanto on yleisempää visuaalisia tehosteita sisältävissä elokuvissa, mutta se voi sisältää myös tehosteita perinteisempiin tai muihin kuin tehosteita sisältäviin elokuviin.

Viime vuosikymmenen aikana suuret visuaalisten efektien elokuvat ovat tukeutuneet eniten virtuaalituotantoon, ja tämä riippuvuus kasvaa jatkuvasti. Virtuaalituotanto auttaa jo suunnitteluvaiheessa pitch-vis- ja pre-vis-prosessien myötä. Se jatkuu suorituskyvyn tallentamisessa, stuntvis-, tech-vis- ja post-vis-prosesseissa. Esimerkkejä suurista elokuvista, joissa virtuaalituotantoon turvaudutaan voimakkaasti, ovat Disneyn Marvel-elokuvat, Avatar, Star Wars, Taru sormusten herrasta, Jurassic World, Pirates of the Caribbean, Harry Potter, Transformers ja monet muut.

Käsitystä voidaan laajentaa kattamaan myös hankkeet, jotka eivät välttämättä ole efektipainotteisia, mutta jotka silti tukeutuvat vahvasti virtuaalituotantoon. Tällaisia ovat elokuvat, joissa virtuaalituotantoa käytetään mahdottoman tilanteen tai ympäristön kuvaamiseen todenmukaisesti. Esimerkkeinä mainittakoon Rent, Jarhead, Life of Pi, Mad Max: Fury Road, Logan, Bohemian Rhapsody, Welcome to Marwen, Rocketman ja monet muut.

3 Virtuaalituotannon eri tyypit

3.1 Visualisaatio

Visualisointi on luultavasti virtuaalituotannon käyttötarkoituksista se, jonka useimmat elokuvantekijät tuntevat parhaiten. Visualisointi on prototyypikuvaa, joka on luotu kertomaan kaikille olennaisille henkilöille kohtauksen tai otoksen tarkoitus ja miljöö. Yksinkertaisimmillaan visualisointi on yksinkertainen piirros paperille, mutta teknologian kehittyessä prosessi on kasvanut laajuudeltaan. Visualisointi jakautuu useimmiten seuraaviin alalajeihin: pitch-vis, pre-vis, post-vis, tech-vis ja stuntvis (Okun & Zwerman 2020: 38–40). Näistä käyttökelpoisimmat puhtaaseen virtuaalituotantoon viherseinää vasten ovat pitch-vis, pre-vis ja post-vis.

Pitch-vis

Pitch-vis on kuvamateriaalia, joka luodaan, jotta kehitteillä oleva projekti saisi luvan tuotantoon studioilta tai kiinnostaisi mahdollisia sijoittajia. Esitys voi sisältää ehdotetun projektin suurempia, tärkeämpiä kohtauksia ja kuvia tai kokonaisen trailerin, joka auttaa välittämään elokuvantekijöiden vision (Stolz, Atkinson & Kennedy, 2020: 6).

Pre-vis

Pre-vis on laajimmin tunnettu virtuaalisen tuotannon muoto, sillä sitä esitellään säännöllisesti kulissien takana olevissa klipeissä ja ennen/jälkeen-visuaaliefektien esityksissä suosituista elokuvista (kuva 3). Pre-vis voi sisältää musiikkia, äänitehosteita ja dialogia, jotka on suunniteltu lähentämään alkuperäisten kohtauksen ulkoasua ja tunnelmaa. Pre-visin etuna on se, että sen avulla elokuvantekijät voivat kokeilla erilaisia lavastus- ja taideohjausvaihtoehtoja, kuten valaistusta, kameran sijoittelua ja liikettä, lavastusta ja leikkausta, ilman että varsinaiseen tuotantoon liittyvät kustannukset nousevat. (Stolz, Atkinson & Kennedy, 2020: 7.)



Kuva 3. Pre-vis Game of Thrones -sarjan suunnitteluvaiheessa (Previs in Game of Thrones Season 8 "Game Revealed").

Post-vis

Post-vis-prosessissa luodaan kuvia, joissa yhdistetään live-elementtejä ja tilapäisiä visuaalisia efektejä tai luodaan uusia CG-kuvia (Computer Generated) väliaikaiseen käyttöön. Post-vis tarjoaa ohjaajalle ja leikkaajalle visuaalisesti kehittyneempiä kohtauksia, jotka ohjaavat heidän työskentelyään. Se toimii apuna myös visuaaliseen kommunikointiin, jonka avulla ohjaaja voi keskustella visuaalisten tehosteiden tiimin kanssa tarkemmin. (Seal 2017: 7–9.)

3.2 Liikkeentallennus

Liikkeentallennus on lyhyesti näyttelijän kehon liikkeiden, kasvojen ilmeiden sekä äänen tallentamista. Tallenteen avulla voidaan tuottaa entistä tarkempia ja vaikuttavampia animaatioita, mihin ennen on pystytty.

Liikkeenkaappauksessa tallennetaan esineiden ja/tai näyttelijöiden liikkeet, ja näin tallennettua dataa käytetään digitaalisten hahmojen ja mallien animointiin. Kun näyttelijän kasvojen liikkeet ja hienovaraisemmat ilmeet otetaan mukaan tallenteeseen, silloin menettelyä kutsutaan usein performance captureksi. Vartalokaappaus toteutetaan useimmiten siten, että näyttelijä pukeutuu pukuun, joka on peitetty seurantapisteillä, joita erityiskamerat seuraavat, tai pukuun, jossa on sisäänrakennettuja antureita ja gyroskooppeja (Tirakoat, 2011: 117–120). Kasvojen kaappaukseen käytetään joko syvyysanturikameroita seurantapisteettömässä kasvojen kaappauksessa tai tavallisia kameroita, jotka vaativat näyttelijän kasvoihin seurantapisteiden lisäämisen (kuva 4).

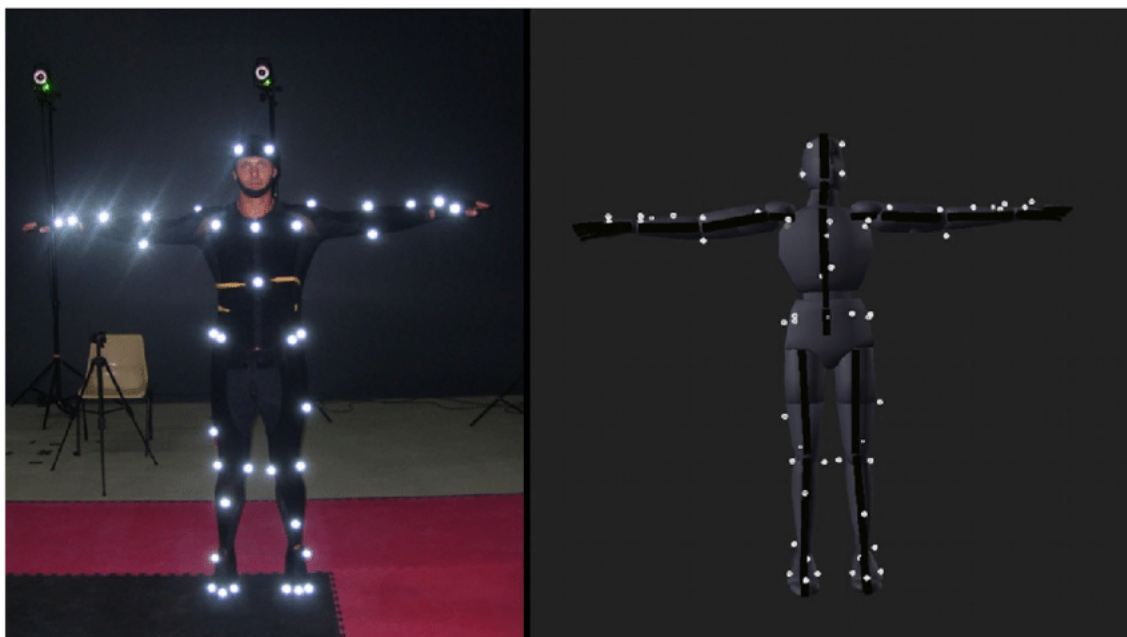
Kasvokuvaus on esityksen kaappausta, joka koskee ensisijaisesti kaappausta näyttelijän kasvojen liikkeistä. Tätä tietoa käytetään heidän esityksensä siirtämiseen toiseen hahmoon, joko ihmiseen tai muuhun kohteeseen. Vaikka kokovartaloon animaatio usein sisältää kasvojen kaappauksen, joskus tarvitaan pelkkää kasvojen kaappausta tai se voidaan tehdä pelkästään kasvojen kaappauksella, erillään vartalon esityksestä (Chen, Wu, Shi, Tong & Chai 2013: 3615–3622).

Kokovartaloanimaatio siirtää näyttelijän koko liikkeen toiselle hahmolle (kuva 5). Tähän liittyy yleensä jonkinlainen uudelleenkohdistus tai skaalaus, erityisesti jos animaation kohteena olevan hahmon vartalon geometria poikkeaa huomattavasti animaation kohteena olevasta hahmosta näyttelijään verrattuna (Bennett & Carter 2014: 10).



Kuva 4. Andy Serkis liikkeenkaappauspuvussa esittäessään Klonkkua Taru sormusten herrasta -elokuvan kuvausten aikana: Kaksi tornia (Wigant 2021).

Jos elokuva on kokonaan tietokoneilla toteutettu, kuvaaminen tapahtuu erityisellä kaappauslavalla. Kaappausalueen etuna on se, että kameraa ei tarvitse asettaa lopullisiin asemiin kuvaushetkellä. Kun näyttelijöiden liiketiedot on saatu talteen, kohtaus voidaan renderöidä uudelleen mistä tahansa kameran näkökulmasta. Vaikka prosessi liikkeenkaappaukseen on kehittynyt vuosien aikana, sen juuret ovat 2D-rotoscopingissa, jossa näyttelijät kuvataan videolle ja sitten animaatio jäljitetään käsin vastaamaan heidän esitystään (kuva 5).



Kuva 5. Vasemmalla näyttelijä, jolla on puku optista liikkeenkaappausta varten. Oikealla virtuaalinen hahmo, joka seuraa markkerien sijaintitietoja. (Hordyj 2015.)

3.3 Hybridivirtuaalituotanto

Hybridivirtuaalituotanto on kameranseurannan käyttöä, jolla yhdistetään green screen -elokuvamateriaalia ja CG-elementtejä. Tämä luodaan joko live-esikatseluna ohjaajalle ja kameraoperaattorille ja viimeistellään jälkituotannossa tai se on tarkoitettu lopulliseksi pikseliksi kamerassa. Tämän tyyppistä virtuaalista tuotantoa on käytetty jonkin aikaa suorissa lähetyksissä, erityisesti urheilussa, mutta se on myös yleistynyt yhä enemmän elokuvien ja tv-sarjojen jaksosten tuotannossa. Hybridimuotoisen virtuaalituotannon kaksi ensisijaista tapaa ovat reaaliaikainen ja jälkituotettu. (Foster 2014: 116.)

Reaaliaikainen virtuaalituotanto

Reaaliaikainen hybridivirtuaalituotanto vihreillä näytöillä esiintyi ensimmäisen kerran uutislähetysten säätiedotuksissa, joissa säähenkilö on sovitettu suorassa lähetyksessä ennusteen sisältävän kartan päälle. Nämä tuotannot ovat tyypillisesti välttäviä laadultaan, kun kamera on lukittu, eikä niiden ole koskaan

tarkoitus lähestyä elokuvatason laatua. Ratkaisujen tuotantolaatu on kuitenkin parantunut huomattavasti viime vuosina nopeampien näytönohjainten ja pelimoottoreiden kehityksen myötä. (Foster 2014: 117–119.)

Jälkituotettu virtuaalituotanto

Jälkikäteen tuotetussa hybridivirtuaalituotannossa käytetään kameraseuranta-tietoja, jotta voidaan tuottaa reaaliaikaista, kameran sisäistä komposiittikuvaa, kun kuvataan green screeniä. Live-komposiitti on tyypillisesti proxy-resoluutiolla eli matalammalla esikatseluresoluutiolla. Se on tarkoitettu referenssiksi, jonka avulla voidaan tuottaa kuva, kun näyttelijöitä ja rekvisiittaa kuvataan green screenin edessä (Stoll, Hasler, Gall, Seidel & Theobalt 2011: 951–953). Sen tarkoituksena on auttaa ohjaajaa, kuvaajaa ja kameramiestä ymmärtämään paremmin virtuaalisten elementtien, kuten hahmojen ja kameroiden sekä lavasteiden asemista, jotta jälkikäsitellyssä käytettävät visuaaliset tehosteet voidaan integroida paremmin.

3.4 LED-volyymin kameran sisäinen virtuaalituotanto

Virtuaalituotannon uusinta kehitystä edustaa pelimoottorin reaaliaikaisen LED-seinän kuvantuotto yhdessä kameraseurannan kanssa lopullisen pikselikuvan tuottamiseksi täysin kameran sisällä. Näyttelijöiden taakse projisoidun elävän kuvan edut ovat valtavat. Jossain mielessä se on myös kaiken aikaisemman virtuaalituotannon alalla tehdyn kehitystyön huipentuma.

Green screen -toteutukseen verrattuna näyttelijöihin ja kuvausryhmään ei kohdistu epävarmuutta. Kaikki näkevät tarkalleen, mitä kuvassa on, kun se renderöidään reaaliajassa taustalle. Kameramies voi kuvata kuten mitä tahansa todellista kohdetta, ja näyttelijät voivat reagoida mielikuvituskuva esittävän markkerin sijasta todelliseen lopulliseen kuvaan. Kaikki heijastukset ja taustasta tuleva valaistus lisäävät kuvien realistisuutta, kun taas perinteisemmässä virtuaalituotannossa joudutaan käyttämään paljon aikaa, jotta vältettäisiin green screenin värin vuotamista kohteeseen ja heijastusten uudelleenluominen jää

jälkituotannon harteille melkein kokonaan. (Nebelin, Rajara, Wu, Cheng, & Herskovitz 2021: 52–58.)

Näyttelijöiden taakse projisoitu kuva ei ole uutta. Filmiprojektoreiden kautta tapahtuva takaprojisointi periytyy 1930-luvulle asti, ja niitä käytettiin säännöllisesti ajoneuvojen ajokuvissa sekä studioon sidottujen tuotantojen laajentamiseen (kuva 6). Tällä tekniikalla saavutetaan korkeatasoinen kuvanlaatu, ainoana poikkeuksena on, että perspektiivi on pysyvä, eikä se muutu suhteessa kameran liikkeeseen. Näin ollen tekniikka on hyvin rajoittava kuvaussuunnittelun kannalta, ja se soveltuu yleensä parhaiten kohtauksiin, jotka kuvataan pääosin etualta, jolloin parallaxin puute ei tule selkeästi ilmi.



Kuva 6. Bond-elokuvien klassikko Aston Martin takaa-ajokuvan aikana (Basse 2020).

Pelimoottorin käyttäminen LED-seinään tarkoitetun kuvamateriaalin luomisessa on valtava harppaus, sillä toisin kuin esirenderöidyn kuvamateriaalin taakse heijastamisessa, kuvamateriaalin perspektiivi muuttuu, mikä taas tuo synkronoidun parallaxin kameraan nähden. Tämän seurauksena lopputulokset ovat niin uskottavia, että on vaikea sanoa, mihin lavasteet loppuvat ja mistä valkokangas alkaa (kuva 7).



Kuva 7. Kuvaaja Greig Fraser kokeilee kuvakulmaa StageCraft-volyymissa, Mandalorean-sarjan kuvauksissa. Lopullinen kameran sisäinen otos kohtauksesta oikealla alhaalla. (Studio Mandalorean set.)

4 Tuotantolinjan toteutus

Insinööriyössä tehtiin koko tuotantolinjan suunnitelma, jossa otettiin huomioon mahdollisimman monen loppukäyttäjän mielipiteet ja tarpeet. Tuotantolinjan suunnittelun täytyi olla käytännönläheinen ja kaikille toimiva. Mukana oli paljon erilaisia liikkuvia osia ja eri henkilöitä, joilla kaikilla oli omat tarpeet ja mielipiteet toteutustavoista. Jokaisen pisteen kohdalla jouduttiin miettimään tarkasti loppukäyttäjää ja sitä, kuinka nopeasti uusi henkilö saa kiinni studion eri ohjelmien ja laitteiden käytöstä. Studiossa oli myös suuri rakennusurakka edessä, ja sen käytännön koordinoiminen oli markkinointipäällikön vastuulla. Hänellä oli onneksi oma urakointiyritys, joten suunnitelma green screenin rakennelmasta kehittyi nopeasti.

Saatavuusongelmien takia rakentaminen aloitettiin puurungosta ja cycloraman pohjasta. Muuta tuotantolinjaa miettiessä piti ottaa maailmantilanteen takia huomioon toimitusajat ja saatavuus ylipäätään. Olemassa ollut perinteinen tuotantolinja koostui pääosin Blackmagic Designin tuotteista, 4K- ja 6K-kameroista sekä 4K Atem -videomikseristä kameroille. Kaluston ongelmana oli yhteensopimattomuus aikakoodin kanssa. Aikakoodi syötetään äänilaitteistoon ja

kuvauslaitteistoon, jotta synkronaatio olisi yksinkertaista ja aina kohdallaan editoitaessa. Valitettavasti aikakoodi ei kulje HDMI-standardia pitkin, joten uusi kamerakalusto virtuaalistudioon oli nopeasti hankintalistalla.

4.1 Virtuaalistudion rakennus

Cine-A:n studio sijaitsee Helsingin Kruunuhaassa korkeimman talon ylimmässä kerroksessa Meritullinkadun päässä. Talo on todella vanha, ja sisäkaton kaltevuus on ongelmallinen, koska ulkokatto on mansardikatto. Suurimmat laakeat tilat ovat jo käytössä perinteisessä tuotannossa, joten virtuaalistudio päätettiin rakentaa aikaisemmin teatterin harjoittelukäytössä olleeseen n. 100 neliömetrin tilaan. Suunnitteluvaiheessa huomioon piti ottaa museoviraston toiveet tilan rakenteellisista muutoksista, mutta onneksi rajoitukset koskivat pääosin julkisivua ja talon yleisilmettä. Joka tapauksessa edettiin suunnitelmalla, jossa kiinteistön rakenteisiin ei kajottaisi ollenkaan.

Cyclorama

Cyclorama, tai englanniksi lyhenne ”CYC”, on rakennelma, jossa seinän ja lattian välille rakennetaan pehmeä kulma, jotta valaisun kanssa saadaan vaikutelma reunattomasta studiotilasta. Valo- ja videokuvauksessa rakennelma yleensä maalataan erittäin himmeällä ja värikylläisellä maalilla. Tähän työhön liittyvässä käyttötarkoituksessa rakennelma maalattiin kyllästetyllä vihreällä chromakeytä varten.

Mahdollisia rakennusmateriaaleja cycloraman toteutukseen oli useita, mutta kannattavimpia vaihtoehtoja olivat puu ja vakuumimuotoiltu muovi sekä niiden yhdistelmät. Saatavuussyistä päädyttiin puurakennelmaan (kuva 8).



Kuva 8. Cycloraman rungon rakennusvaiheet.

Rakennelman valmistuttua annettiin puun ja tasoitteiden kuivua useamman päivän ajan, jotta maali ei ratkeilisi puun asettuessa. Asettumisen jälkeen puu sai kolme kerrosta himmeää harmaata pohjamaalia ja sen jälkeen useamman kerroksen vihreää laimentamatonta maalia. Perinteisesti maalit sävytetään valkoisesta pohjamaalista muuhun sävyyn. Vaikka perinteisesti sävytetyn maalin ja chromakeyhyn tarkoitetun maalin ero ei näy suuresti silmälle, korkeampi värisaturaatio tekee keystä paremman (kuva 9).



Kuva 9. Perinteisen maalin ja laimentamattoman videomaalin ero histogrammissa (How Green Is Your Green Screen? Comparing DIY Keying Paint vs. Rosco Chroma Key Paint 2019).

Trussirakennelma

Cycloraman valmistuttua jäätiin odottamaan trussirakennelmaa, johon oli tarkoitus kiinnittää tilan valaistus, kiinteä ääniratkaisu sekä liikkeenseurantajärjestelmä kameroille sekä henkilöille. Toimitusvaikeuksien takia trussit saapuivat vasta maaliskuun 2022 lopussa, muutama kuukausi itse cycloraman valmistuksen jälkeen. Kalteva katto tuli uudestaan haasteeksi rakennelmaa tehdessä ja vaati muutaman 45°:n mittatilauspalan valmistuksen.

4.2 Laitteiston valinta

Laitteiston valinta oli kohtalaisen kriittistä lopputuloksen kannalta, varsinkin reaaliaikaisessa ympäristössä. Latenssi kuvan ja äänen välillä nousi varsinkin suureksi huolenaiheeksi eri laitteita verrattaessa. Synkroniaa tukevat laitteet

tuntuivat olevan kaikki niin sanotun ”pro”-leiman alla, mikä vaikeutti saatavuuden ja kustannusten kannalta aikataulua huomattavasti.

Kamerakalusto

Aikakoodin tarpeellisuus valmiin renderöidyn kuvan ja äänen synkronoinnissa rajasi kameravalikoiman niihin, jotka pystyvät antamaan kuvamateriaalia SDI-standardia pitkin. SDI, eli Serial Digital Interface, on kompressoimatonta digitaalisignaalia, joka kulkee BNC-liittimien kautta päätelaitteesta toiseen. Koska signaali on kompressoimatonta, kuvan purku tapahtuu vastaanottavassa päässä ja voi olla resurssi-intensiivistä kuvan bittisyvyydestä ja pikselimäärästä riippuen. Ylimääräisten resurssien tarve kuvan purkuun selittää, miksi signaalityyppi ei koskaan yleistynyt kuluttajalaitteiston puolella HDMI:n tapaan.

Koska haluttiin pysyä Blackmagic Designin tuoteperheessä, muun tuotannon ollessa sitä kohti rakennettu, vaihtoehtoiksi tuli joko iso kameran runko, Blackmagic URSA Mini Pro 12K (kuva 10) tai enemmän studiokuvaukseen suunnattu Blackmagic Studio Camera 4K Pro (kuva 11).

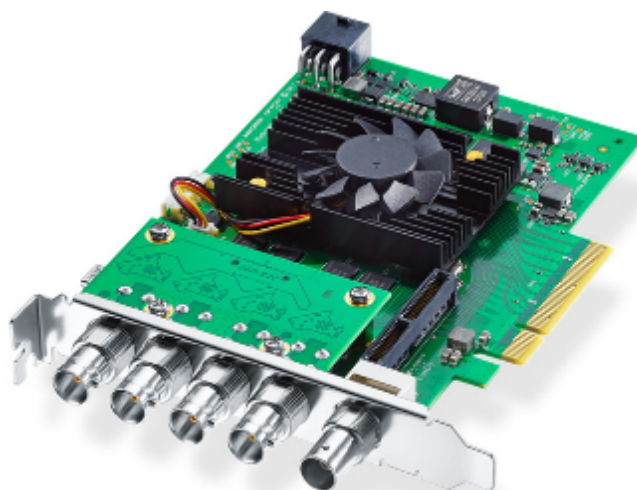


Kuva 11. Blackmagic Studio Camera 4K Pro (Blackmagic Studio Camera 4K Pro).

Kamerakalustoa miettiessä jouduttiin olemaan yhteydessä Blackmagicin maahantuojaan puolijohdepuolan ollessa pahimmillaan. Loppujen lopuksi päädyttiin Blackmagic Studio -kameroiden hankintaan, pääosin toimitusaikojen takia, mutta tiedossa oli, että ei voida hyödyntää 12K-kuvaa reaaliaikaisessa renderöinnissä ilman lisäpäivityksiä tietokonepäähän.

Tietotekniikka

Renderöintikoneeksi valikoitui yllättäen aikaisemmin editointikoneena ollut pöytäkone. Reaaliaikaisen renderöinnin kanssa tehtiin useita kokeiluja, ja kone suoriutui hyvin HD-tasoiseen loppukuvaan ray-tracing päällä. Tärkeimmät komponentit renderöinnin kannalta ovat näytönohjain ja prosessori, ja käytössä olleessa pöytäkoneessa oli nestejäähdytetty Nvidia RTX3090- ja AMD 5950X - prosessori. Tietokone vaati vielä SDI-sisääntulon suoraan emolevyyn, jotta latenssit kuvan siirrossa ja purussa pysyivät mahdollisimman alhaalla. Onneksi kameroiden valmistajalla oli suoraan ratkaisu tähän, ja valikoimasta löytyi lisäkortti PCIe-väylään, DeckLink 8K Pro (kuva 12).



Kuva 12. Blackmagic DeckLink 8K Pro PCIe-väylään (Blackmagic DeckLink 8K Pro).

Kameran ja henkilön seurantajärjestelmä

Seurantajärjestelmän hankkiminen osoittautui haastavimmaksi tehtäväksi studiota suunnitellessa. Kuten aikaisemmin mainituissa hankinnoissa, budjetti, saatavuus ja käyttötarkoitusten laajuus painoivat kaikki valintoja tehdessä.

Ensin kartoitettiin yleisimmät seurantajärjestelmät, joita renderöintiohjelmat tukevat ilman lisäkoodia välissä. Kameran seurantajärjestelmiä tuottavista

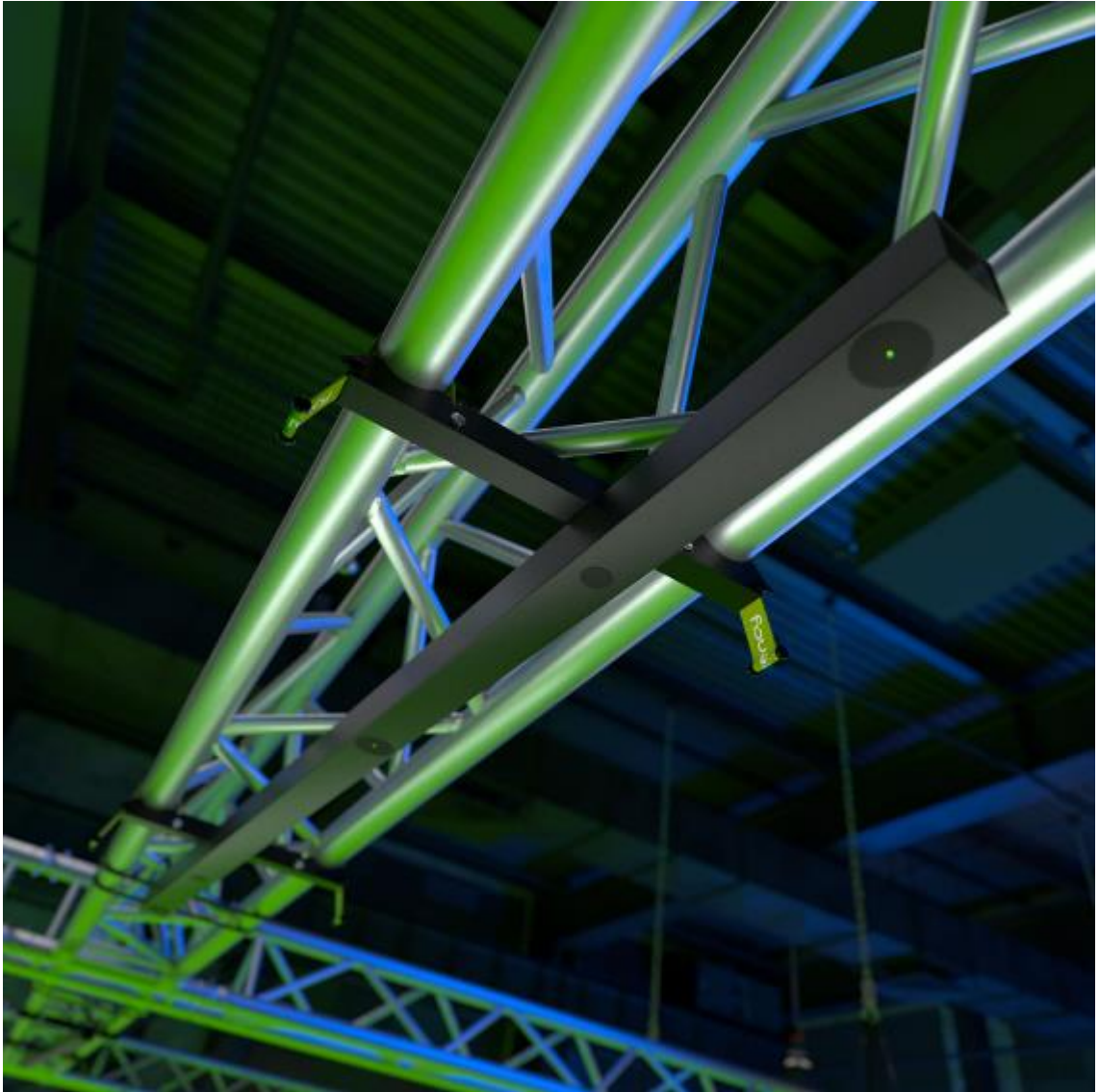
yrittäjistä valikoituivat seuraavat: Stype, Mo-Sys, Optitrack ja Antilatency. Tarjouspyyntöjen kohteiden valinta perustui tuotteiden suosion ja käyttötarkoitusten kattavuuteen:

- Stype – RedSpy (<https://stype.tv/redspy/>)
 - ei langaton
 - optinen seuranta, ulkoiset seurantapisteen ja sisäinen kamera
 - ei kiinteää rakennelmaa seuraamiseen, seurantapisteen asennetaan kattoihin ja muihin rakenteisiin studiossa
 - ei linssidataa seurannan yhteydessä
 - korkea hinta
- Mo-Sys – Startracker (<https://www.mo-sys.com/product/camera-tracking/startracker/>)
 - ei langaton
 - optinen seuranta, ulkoiset seurantapisteen ja sisäinen kamera
 - ei kiinteää rakennelmaa seuraamiseen, seurantapisteen asennetaan kattoihin ja muihin rakenteisiin studiossa
 - linssidata syötetään seurantadatan mukana aikakoodin kanssa tietokoneelle
- Optitrack – Prime (<https://optitrack.com/applications/virtual-production/>)
 - ei langaton
 - optinen seuranta, ulkoiset kamerat kohti trakkeria
 - kiinteä rakennelma seuraavia kameroita varten
 - ei linssidataa seurannan yhteydessä
 - todella korkea hinta
- Antilatency – Alt (https://developers.antilatency.com/Hardware/Alt_en.html)
 - langaton mahdollisuus
 - optinen seuranta, ulkoiset seurantapisteen ja sisäinen kamera
 - kiinteä rakennelma seuraavia kameroita varten
 - ei linssidataa seurannan yhteydessä
 - edullisin vaihtoehto

Jokaiselta yritykseltä saatiin tarjous, ja pelkästään niiden tarjousten perusteella päädyttiin Antilatencyn ratkaisuun. Antilatencyn hinta oli edullisin, ero oli seuraavaksi halvimpaan Mo-Sysin ratkaisuun noin 200 000 euroa.

Antilatencyn ratkaisussa itse seurantalaitte Alt on pieni ja kevyt 6DoF-paikannuslaite. Se pystyy määrittämään sijaintinsa ja suuntansa avaruudessa alle millimetrin tarkkuudella ja pienellä viiveellä. Laite käyttää seurantaan anturifuusion lähestymistapaa: inertiamittausyksikkö (IMU) tuottaa inertiatietoja, joita korjataan reaaliaikaisesti optisiin tietoihin perustuvalla IMU-korjauksella. Seuranta tapahtuu viitepistemerkinnöistä koostuvalla seuranta-alueella. Linssi, jonka näkökenttä on 230 astetta, pystyy havaitsemaan merkit, vaikka seurantalaitte ei olisi suunnattu suoraan niihin. Alt antaa mahdollisuuden tietojenkäsittelyyn sensorin päässä. Tällä tavalla USB-bussin kuormitus pysyy alhaisena, jolloin suurikaan määrä seurantalaitteita ei ruuhkauta kommunikaatiokanavia.

Seurantajärjestelmän optinen puoli tarvitsee referenssialueen, joka kiinnitetään trusseihin. Seuranta-alue koostuu IR-merkeistä, jotka on sijoitettu ennalta konfiguroidun järjestelmän mukaisesti. Kolmen IR-merkin sarja, jotka on sijoitettu suhteellisesti toisiinsa nähden, muodostaa referenssipalkin (kuva 13). Trussiin kuvion mukaan kiinnitetyt palkit ovat näkyvissä koko huoneen kattavalla alueella, jolloin kameran ja henkilön seuranta tapahtuu samassa avaruudessa, samaan aikaan (Truss tracking area).

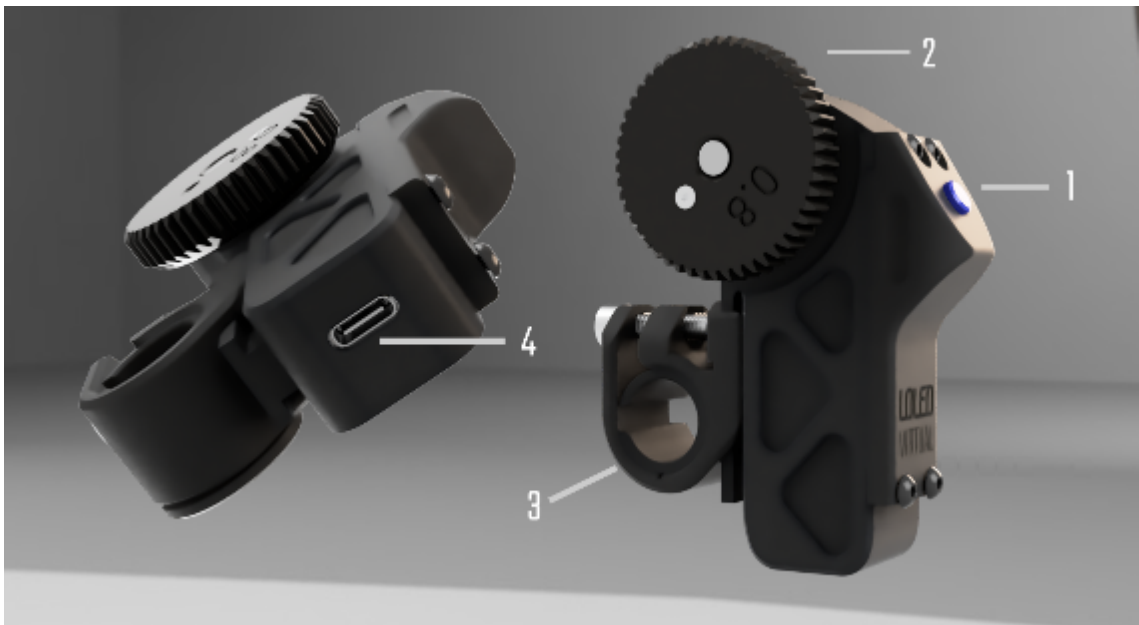


Kuva 13. Trussiin kiinnitetty referenssipalkki (Truss tracking area 2021).

Linssin kooderi

Seurantajärjestelmän lisäksi tarvitaan linssidataa, jotta kameroiden zoomi ja tarkennus peilaantuu tarkasti pelimoottoriin. Tähän tarkoitukseen on periaatteessa kaksi eri lähestymistapaa, joko kameran toimittama data linssistä SDI-signaalia pitkin tai ulkoisen linssin kooderin käyttö. Jotta kameran toimittama data olisi käypää, rajattiin käyvien objektiivien alue melkein täysin digitaalisesti operoitaviin laseihin, mikä tarkoittaisi melkein kaiken vanhan inventaarion poissulkemista. Tämän takia lähdettiin tutkimaan ulkoisten datalähteiden valmistajia.

Ulkoisen objektiividatan koodereita sai ainoastaan kahdelta valmistajalta, LOLED Virtual ja Arri. LOLED Virtualin Indiemark 3 teki käytännössä täysin saman kuin Arrin linssien kooderit mutta puoleen hintaan, joten hankintapäätös oli helppo. Indiemark objektiivin kooderi muunsi objektiivin tynnyrin pyörimisen dataksi, jota virtuaalitudion ohjelmistoa voi käyttää. Indiemarkin kooderissa oli vielä USB-väylään liittämisen etu, jolloin linssidata voi kulkea seurantajärjestelmän datan kanssa samaa kaapelia pitkin (kuva 14).



Kuva 14. Indiemark-kooderi, jossa 1 - Nollapainike, käytetään nollaamaan kooderi, 2 - Linssiratas, vaihdettavat liittännät objektiiviin, 3 – Sauvakiinnike, vakio-mallinen 19 mm:n kiinnike, jossa on 15 mm:n vähennysholkki, 4 - USB-portti, joka antaa virran ja dataväylän kooderille. (Kuva: Loled Virtual.)

4.3 Ohjelmiston valinta

Ohjelmistoa valittaessa haluttiin priorisoida avointa kehitysympäristöä, jotta ei osuttaisi rajoituksiin esimerkiksi asiakkaan toimittaman 3D-datan kanssa. Peli-moottoreita tutkiessa kävi nopeasti ilmi, että Unreal Engine on helppokäyttöisin, varsinkin virtuaalituotantoon. Ohjelmistovaihtoehtoja, jotka helpottavat tuotantoa, oli monta, mutta harva oli täysin avoin muokkausmahdollisuuksiltaan. Helppokäyttöisistä Unreal Engineen pohjautuvista ohjelmista kärkeen nousivat Zero Densityn Reality (<https://www.zerodensity.tv/euen/products/reality-virtual->

studio/) ja Aximmetry technologiesin Dual Engine -ratkaisu (<https://aximmetry.com/>).

Vertailun jälkeen päädyttiin Aximmetryn ratkaisuun, koska ohjelmisto käytti Unreal Enginen omaa koodipohjaa. Tämä mahdollisti kaiken UE4:lle kehitetyn lisäosien ja karttojen käytön ilman mitään muutosprosessia. Hinta tuli myös mukaan harkintaan, mutta molemmista ohjelmista oli yleisökehitystä varten ilmainen versio. Aximmetry otti Windowsille kehitetyn UE4-projektin ja kontrolloi sinne tehtyä virtuaalista kameraa. Henkilön sijoitus ympäristöön toimi kahdella tavalla. Unreal-karttaan asetettiin joko kiinteä, liikkumaton taso, johon video väriävainnetaan (erikoistehostemenetelmä, jossa yhdistetään kuvia värierottelumenetelmällä) tai sitten taso paritetaan seurantaan kiinni seurantalaitteeseen ja se liikkuu virtuaalimaailmassa kohdehenkilön mukana samassa avaruudessa kuin seurattut kamerat.

5 Tuotanto käytössä

Tuotannon peruskulku standardistudiolähetyksissä on yksinkertainen. Ensin asiakas ottaa yhteyttä, jolloin sovitaan tuotantopalaveri. Tässä palaverissa sovitaan yleinen tuotantoaikataulu ja asiakkaan muut toiveet. Melkein väistämättä tämän jälkeen tuotanto jatkuu perinteisillä menetelmillä ja melkein samalla kaa-valla, oli sitten kyseessä reaaliaikainen tapahtuma tai jälkituotettu tallenne. Virtuaalitudiota varten jouduttiin kehittämään uudentyyppisen tuotantosuunnitelman. Käytössä käytettiin samantapaista kulkua kuin standarditapahtumissa oli jo käytössä, mutta siihen lisättiin heti alkuun iterointikierrroksia maailman suunnitteluun ja hyväksyntäprosessiin. Tavoitteena oli hyödyntää virtuaalisten lavasteiden ennalta rakentaminen ja yhteistyön mahdollisuus heti ensimmäisestä asiakkaasta lähtien.

Virtuaalitudion ensimmäiseksi asiakkaaksi osui Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. Yhtiö oli jo tuottanut suurimman osan liiton isommista tapahtumista vuodesta 2019 alkaen, joten kokeellinen yhteistyö oli matalan kynnyksen kysymys. Tapahtuma oli WDBE 2022 -julkistamistilaisuus, ja käytössä olisi

aikaisempaan tapahtumaan tuotettu Unreal Engine -projekti (KIRAHub, <https://kirahub.org/en/wdbe/>).

Asiakkaan toiveina oli futuristisen kuvitelman Helsingistä integroiminen virtuaalitudion miljööksi ja etäpuhujien osallistuminen omalla green screenilläään Tallinnasta. Maailmaan piti myös lisätä suuri näyttö, jossa kulkisi paikan päältä ajettu diaesitys. Lähetykseen ajettiin myös ennaltanauhoidettuja videoita asiakkaan toimittamana.

5.1 Reaaliaikaisen lähetyksen valmistelu

Projekti aloitettiin katsomalla, kuinka toimitettu projekti toimi reaaliaikaisessa lähetyksympäristössä, ja nopeasti huomattiin, että kartta oli optimoimaton suorituskykyyn. Render-koneessa oli 16-ytiminen prosessori ja Nvidian RTX 3090 -näytönohjain, mutta kartta pyöri vasta noin 5–12 kuvaa sekunnissa. Suorituskykyä vaativat eniten noin 1 000 animoitua ihmishahmoa ja noin 30 000 animoitua kasvia ympäri karttaa. Tekstuurit olivat myös optimoimattomat reaaliaikaiseen käyttöön, eli koko ei pienentynyt mitä kauemmas kamera meni (kuva 15).



Kuva 15. Muokkaamaton kartta asiakkaan toimittamana.

Kartan optimointi aloitettiin syöttämällä jokaiseen malliin ja tekstuuriin LOD. LOD (Level of Detail) on tekniikka, jolla mallien ja tekstuurien monimutkaisuutta vähennetään, kun kohteet etääntyvät näkökulmasta. LOD vähentää prosessoitavan geometrian määrää, mutta se myös välttää mikrokolmioiden tuottavan värilyöngelman ja näyttää paremmalta, kun kohteet on sijoitettu kauemmaksi kartassa. Tämä vähensi kuormaa huomattavasti mutta vakaata hyvälaatuiseen lähetykseen tarvittavaa 25 kuvaa sekunnissa ei vielä saatu. Asiakkaalta kysyttiin, olisiko mahdollista poistaa henkilömäästä ja kasveja, kun niitä ei näytettäisi reaaliaikaisessa kuvassa juurikaan, vaikka mallit olisivatkin kartassa. Asiakas suostui tähän ratkaisuun.

Asiakas toivoi myös 3D-mallien tuottamista tapahtuman logosta ja värimaailman muuttamista enemmän tapahtuman grafiikan suuntaan. Logo toimitettiin vektorimuodossa ja logoon syötettiin lisäksi syvyyttä. Uusille sivupinnoille annettiin uusi materiaali ja rakennettiin UV-kartat pelimoottoria varten. UV-kartoitus on 3D-mallinnusprosessi, jossa 2D-kuva projisoidaan 3D-mallin pintaan tekstuurikartoitusta varten. Maailman taustana toimii pallo, jonka sisäpinnalle projisoidaan kuva. Kuvan väriavaruus taitettiin purppuraan ja laskettiin uudet heijastukset ja valo korjattiin lähemmäksi 4000:ta kelviniä, jotta studion ja kartan valaistus olisi lähempänä toisiaan (kuva 16).



Kuva 16. Muokattu kartta eri värityksillä ja tekstuuri- ja mallioptimoinnilla.

5.2 Toimitusongelma ja ratkaisu

Kameran seuranta on äärimmäisen tärkeää realismin kannalta. Venäjän hyökkäys Ukrainaan ja siitä seurannut kauppasaarto osui suoraan tämän projektin toimitukseen. Antilatency on alun perin venäläinen startup-yritys, ja vaikka omistus on nykyään pääosin Yhdysvalloissa, komponenttien lopullinen kokoaminen on tapahtunut Venäjän rajojen sisäpuolella. Antilatency ratkaisi kuljetuksen saapumisen Suomeen lähettämällä tuotteet suoraan Kiinan valmistajaltaan eteenpäin, mutta kuljetus venyi viikkoja tapahtuman aikataulun yli. Tämä tarkoitti uuden lähestymistavan löytämistä lyhyessä ajassa ja pienellä budjetilla.

Indie-virtuaalituotantopiireissä on käytetty HTC-vivea ja muita vastaavia VR-taroituksiin valmistettuja tuotteita. Unreal Engine tukee myös suoraa open VR:n koodipohjaa, joten seuranta oli mahdollista teoriassa. Nopean hankinnan jälkeen studion kulmiin asennettiin kaksi tukimajakkaa ja studiolle hankittiin kaksi Vive trackeria.

Koska OpenVR-kirjasto oli tuotettu pelimaailmaa tukemaan, helpoin tapa asentaa se koneelle oli Steamian kautta. SteamVR ei valitettavasti tue pelkkää kohde-seurantaa ja sen datan hyödyntämistä suoraan asennettuna, joten tarvitsi suorittaa esimerkkikoodin 1 mukaiset ajurimuutokset OpenVR:n ohjeistuksista (VVVV.org).

```
SteamDirectory\steamapps\common\SteamVR\drivers\null\resources\settings\default.vrsettings
```

Esimerkkikoodi 1. Ajurimuutokset OpenVR:n ohjeistuksista.

Esimerkkikoodin "enable" muutetaan "true", ja seuraavaksi avataan äsken luotu konfiguraatiodosto (esimerkkikoodi 2).

```
SteamDirectory\config\steamvr.vrsettings
```

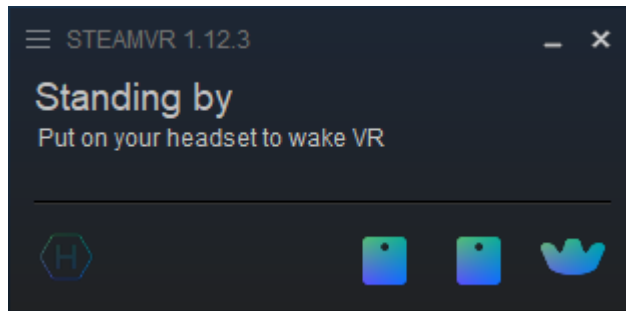
Esimerkkikoodi 2. Luotu tiedosto.

Nämä konfiguraatiorivit syötetään edellä mainittuun tiedostoon (esimerkkikoodi 3).

```
"forcedDriver": "null",  
"activateMultipleDrivers": "true",
```

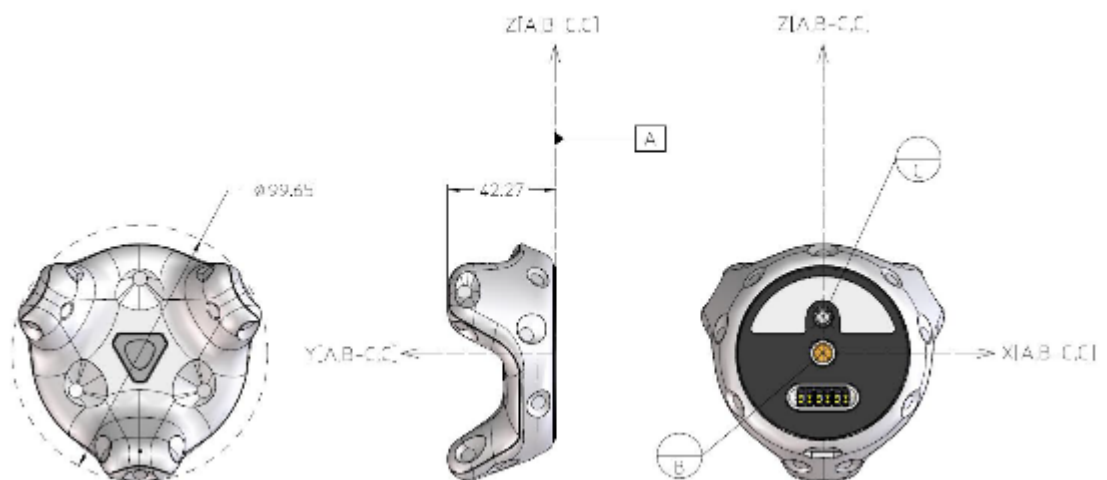
Esimerkkikoodi 3. Konfiguraatit generoituun tiedostoon.

Tässä kohtaa asennettiin ajuritiedosto, ja muutaman uudelleenkäynnistyksen jälkeen trackerit näkyivät koko järjestelmälle SteamVR:n läpi (kuva 17).



Kuva 17. SteamVR ja paritettu tracker näkyvissä.

Seuraavaksi tehtiin sovite Unreal Engineen, jotta voitiin määrittää keskipiste Aximmetryn tuotanto-ohjelman kautta kesken lähetyksen. Tämä osoittautui todella hyödylliseksi lähetyksessä, koska testeissä ilmeni trackerin liukuminen hieman eri asentoon koordinaatistossa (Michael, Caselitz, Sundram, Van Look & Burgard 2021: 9). Vive tracker antaa sijaintinsa x-, y- ja z-koordinaatteina, joiden lisäksi vielä w, joka on akselin kierto (kuva 18).



Kuva 18. Vive Trackerin akselisto ja dimensiot (Vive seurantajärjestelmä).

Trackerin dataa yritettiin saada kuljetettua UE4-blueprintina, mutta koordinaatiston keskipisteen muuttaminen ei onnistunut reaaliajassa (esimerkkikoodi 4).

```

void ATracker::BeginPlay()
{
    Super::BeginPlay();

    APlayerController* playerController = UGameplayStatics::GetPlayerController(this, 0);
    EnableInput(playerController);
    playerController->SetViewTargetWithBlend(this, 0);
    fieldOfView = cameraComponent->FieldOfView;
    cameraOffset = cameraComponent->RelativeLocation;
    cameraRotation = cameraComponent->RelativeRotation;
}

vr::HmdMatrix34_t ATracker::UpdateTracker(int id)
{
    //Get Tracker Pose
    vr::VRControllerState_t *state = new vr::VRControllerState_t();
    vr::TrackedDevicePose_t *pose = new vr::TrackedDevicePose_t();
    vrSystem->GetControllerStateWithPose(vr::ETrackingUniverseOrigin::TrackingUniverseStanding, id, state, sizeof(vr::VRControllerState_t), pose);

    vr::HmdMatrix34_t posMat = pose->mDeviceToAbsoluteTracking;
    if (trackerID != -1)
    {
        float w = FGenericPlatformMath::Sqrt(1.0 + posMat.m[0][0] + posMat.m[1][1] + posMat.m[2][2]) / 2.0;

        float w4 = (4.0 * w);
        float x = (posMat.m[2][1] - posMat.m[1][2]) / w4;
        float y = (posMat.m[0][2] - posMat.m[2][0]) / w4;
        float z = (posMat.m[1][0] - posMat.m[0][1]) / w4;

        sceneComponent->SetWorldLocationAndRotationNoPhysics(
            FVector(-posMat.m[2][3] * 100, posMat.m[0][3] * 100, posMat.m[1][3] * 100),
            FQuat(z, -x, -y, w).Rotator());
    }

    return posMat;
}

```

Esimerkkikoodi 4. Osa tason luokkaa, jossa näkyy trackerin koordinaatiston tuominen näkyviin kameraobjektille.

Tämän jälkeen seurantalaitteelta haetaan uusi sijainti, jolla päivitetään kameran suhteellista sijaintia tasossa Level Blueprintin avulla (esimerkkikoodi 5).

```

void ATracker::Tick(float DeltaTime)
{
    Super::Tick(DeltaTime);
    if (trackerID == -1)
    {
        for (uint32_t i = 1; i <= 8; i++) {
            vr::HmdMatrix34_t posMat = UpdateTracker(i);

if (posMat.m[0][3] != 0 && posMat.m[1][3] != 0 && posMat.m[2][3] != 0)
            {
                trackerID = i;
                break;
            }
        }
    }
    else
    {
        UpdateTracker(trackerID);
    }
}

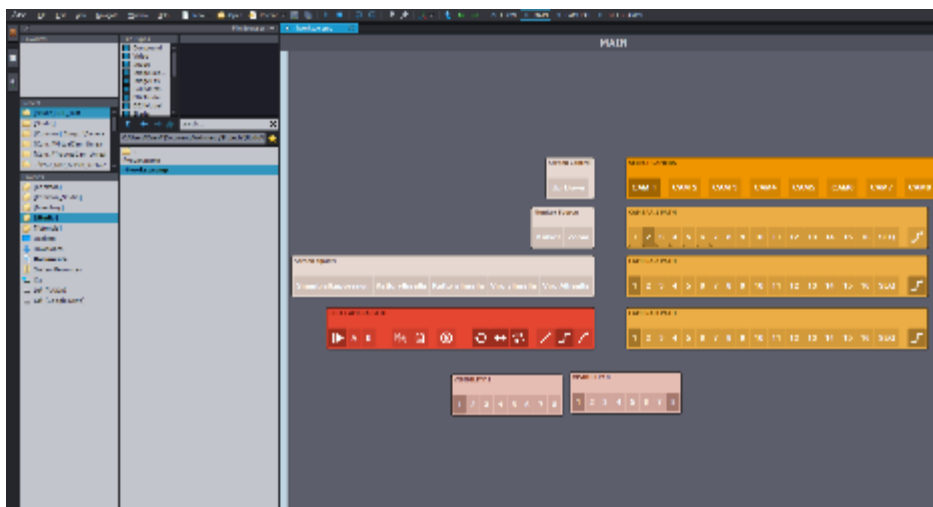
```

Esimerkkikoodi 5. Seurantalaitteelta haetaan uusi sijainti, jolla päivitetään kameran suhteellista sijaintia tasossa.

Koodi toimii pääosin, mutta välillä USB-laite meni lepotilaan, mikä nollassi trackerin oman ID:n Unrealin sisällä. Lopullinen ratkaisu käytti osaksi Aximmetryn omaa tukea Vive-seurantalaitteistolle ja esimerkkikoodissa näkyvää koodia kartoittaakseen keskipisteen studiolle ja Unreal-kartalle.

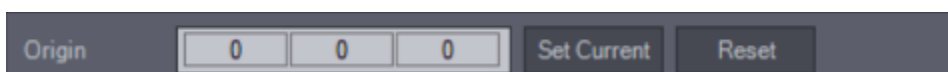
Aximmetryn ohjelmassa kontrollerit tehtiin noodipohjaisella käyttöliittymällä studion seuratuille kameralle ja täysin virtuaalisille kamera-ajoille. Luotiin

yksinkertaisen käyttöliittymä virtuaalisen näyttöelementin liikuttamiseen ja tulolähteen vaihdolle (kuva 19).



Kuva 19. Aximmetryyn luotu yksinkertainen käyttöliittymä.

Aikaisemmin tehty koordinaatisto tuotiin keskipisteen liikuttajan projektiin ja yritettiin tehdä käyttöliittymä, jossa hiirellä voi siirtää tiettyä akselia edestakaisin, mutta tämä ei valitettavasti onnistunut tarpeeksi tarkalla hienosäädöllä. Tyydyttiin numeropohjaiseen valikkoon, jossa keskipistettä pystyi liikuttamaan numero- ja nuolinäppäimillä (kuva 20).

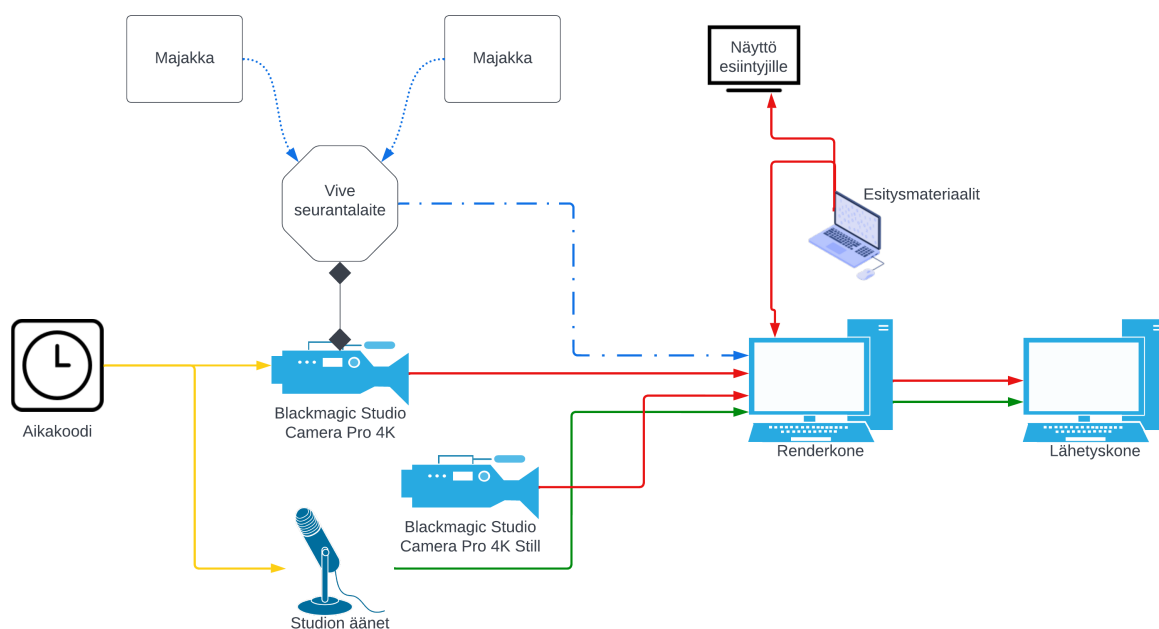


Kuva 20. Aximmetryyn tuotu yksinkertainen keskipisteen säätö.

Kameran kalibroiminen oli suoraviivainen prosessi: helppouden toi virtuaalituo-
tantaan suunnattu ohjelma, jossa oli kalibroimiseen tarvittavat työkalut jo mu-
kana. Linssin kalibroiminen kävi nopeasti koodereiden mukana tulleen ohjelman
mukana. Kooderille osoitetaan molemmat hammasrullan ääripisteet ja näille ää-
ripisteille annetaan virtuaalikamerassa vastaavat luvut, jotta tarkennus ja poltto-
välin muutto mallintuisi mahdollisimman tarkasti pelimoottoriin. Trackerin asetta-
minen kameraan oli myös yksinkertainen prosessi, koska Vive Trackerin

pohjassa on standardi valaisu- tai kamerajalustan kierteet. Valitettavasti kalibroinnissa ilmeni ongelmia juuri koordinaatiston liukumisen takia. Jos VR-palvelun käynnisti uudelleen, koko prosessin aloitettiin alusta. Selvisi, että tämä johtuu itse VR-lasien puutteesta: tracker valitsee keskipisteen aina ensimmäisen tukiaseman löydyttyä ja asettaa sen aina uuteen paikkaan eikä suhteessa lasiin.

Lähetystilanteen kannalta koordinaatiston liikkuminen oli huolta aiheuttava ongelma. Päätettiin asettaa toinen paikallaan oleva kamera kuvaamaan kohdetta neutraalista kuvakulmasta, noin vyötärön korkeudelta. Tälle kameralle kartoitettiin täysin virtuaalinen kamera, eli kamera ei ole sidoksissa mihinkään koordinaattiin tai linssiin. Virtuaalisen kameras avulla pystyttiin määrittelemään ennakkoon tilassa fyysisellä kameralla mahdottomia kamera-ajoja. Virtuaaliselle kameralle tehtiin turvalliset peruskuvat, jota voitiin leikata lähetystilanteessa, jos väliaikainen seurantaratkaisu toisi ongelmia pääkameran kanssa. Lopullinen tuotantoketju oli nyt valmis (kuva 21).

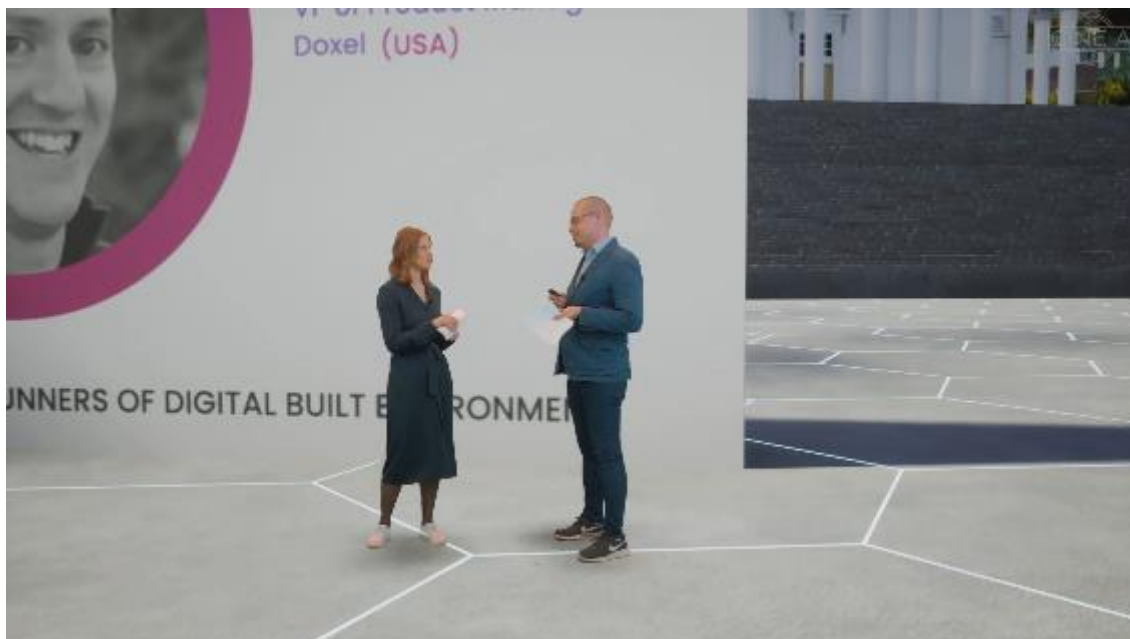


Kuva 21. Virtuaalitudion tuotantoketjun pelkistetty kaavio.

5.3 Lähetystilanne

Ennen lähetystilannetta otettiin yhteys Tallinnan studioon, jossa Viron vastaavat järjestäjät tapahtuman järjestäjätahosta olivat paikalla. Aiemmin käytiin läpi heidän teknikkonsa kanssa Suomen puolen tarpeet green screenin ja kuvan kannalta. Heiltä toivottiin hyvin valaistua kuvaa ja kameran asettamista kokovartalo-kuvan keskelle, jotta kuvakoot olisivat mahdollisimman lähellä Suomen puolen kuvaustilannetta. Tallinnan studion tilat green screenille eivät olleet riittävät, minkä takia heidän kameransa oli paljon laajemmalla linssillä varustettu, ja tämä aiheutti kuvan laidoilla vääristymistä ja venymistä. Linssin vääristymiä kompensoitiin asettamalla tulevaan kuvaan vääristymää korjaavaa maski. Kuva tuli avoimen peer to peer -palvelun kautta, joka otettiin Open Broadcasting Softwaren (OBS) avulla vastaan pienimmällä mahdollisella viiveellä. OBS taas otti korjatun kuvan ja lähetti sen eteenpäin NDI-protokollaa käyttäen antaen sille oman aikakoodin. NDI-protokolla oli käytännössä sama kuin SDI mutta kuva ja ääni liikkuu puhtaasti verkon läpi ja kuvan purku oli päätelaitteen vastuulla. NDI oli pakollinen muunnos sisään tulevaan kuvaan, jotta Aximmetryn ohjelmisto osasi syöttää kuvan Unreal Engineen oikealla tahdilla ja ajoituksella.

Studioon viritettiin näyttö ja tietokone kalvosarjaa varten. Tallinnan puhujat liittyivät Zoom-kokoukseen, jotta saatiin ääniyhteys molempiin suuntiin ja valmis lähetyskuva reaaliajassa heille nähtäväksi, jotta esiintyjät pystyivät puhumaan toisilleen ja reagoimaan oikeisiin aikoihin (kuva 22). Lähetystilanne kasaantui valmiiksi ilman mainittavia ongelmia; trackereille kalibroitiin keskipiste viisi minuuttia ennen lähtöä, jotta koordinaatiston liukuminen olisi lähtökohtaisesti pienimmillään. Lähetyksen alkaessa toinen teknikko ajoi itse lähetystä ja ulosmenevää kuvaa ja toinen virtuaalitudion operoimiseen. Kamerahenkilölle kommunikoitiin radiopuhelimen välityksellä ohjeita, milloin karttaan ilmestyy suuri näyttö esitysmateriaaleja varten ja milloin Tallinnan studion kuva tulee näkyviin paikan päällä olevien viereen.



Kuva 22. Seuratun kameran kuvaa.

Lähetyksen keskivaiheilla huomattiin, että seuratun kameran kuva osoitti kasvavissa määrin enemmän oikealle alapäin, seurantalaitteen koordinaatisto alkoi liukua juuri kesken pitkän paikan päällä kuvatun osion keskellä. Ongelmasta ilmoitettiin lähettävälle teknikolle ja kamerahenkilölle samalla, kun keskipistettä yritettiin liikuttaa tehdyn kontrollerin avulla takaisin oikeaan paikkaan. Lopuksi vaihdettiin virtuaalitudion ulosmenevän kuva aikaisemmin varmuuden vuoksi viritettyyn virtuaalikameran kuvaan ja odotettiin hyvää hetkeä asettaa koordinaatiston keskipiste uudelleen. Koordinaatiston liikuttajakomponentti ei kompensoinut kiertoa akselilla, joten virheellistä kallistusasettoa ei saatu korjattua reaaliajassa kokonaan. Onneksi tapahtumaan oli aikataulutettu ennalta nauhoitettua materiaalia, jonka aikana tehtiin uusi kalibrointi seuratulle kameralle (kuva 23).



Kuva 23. Virtuaalikameran kuvaa, Tallinnan etäpuhujat samassa kuvassa.

Lähetys meni katsojan näkökulmasta oikein hyvin, äänet pysyivät ajallaan ja seuratun kameran kuva oli oikein hyvää. Vaikka seuranta ei ollut niin luotettavaa, kuin olisi suotavaa pidemmissä reaaliaikaisissa tuotannoissa, oli ratkaisu kuitenkin hintaansa ja aikatauluun nähden oikein toimiva.

6 Yhteenveto

Virtuaalituotanto oli järjestyttävän suuri muutos koko elokuva-alalla. Tässä työssä se antoi uutta elämää pieneen, lähes käyttämättömään tilaan ja mahdollisti eri valtioissa olevien henkilöiden esiintymisen samalla lavalla, heille tärkeän viestin toimittamiseen. Näyttää vahvasti siltä, että pelimoottoreiden kanssa toteutettu tuotantomalli tulee olemaan suuressa osassa kaikkea elokuvan ja sarjojen tuotantoa. Kansainvälisen yhteistyön lisääminen suhteelliseen pieneen alaan Suomessa tuottaa varmasti kasvuvirtaa.

Insinööriyön alkuperäisen suunnitellun seurantajärjestelmän saapuminen ratkaisee suurimmat ongelmat nykyisessä studiossa. Linssien kooderit toimivat juuri niin kuin piti, ja virtuaalikameran lisä mahdollisti pienen tilan kasvattamisen

suureksi kuva-alaltaan. Linssin kartoitus on vielä vajavainen, ja vuosien varrella kertynyt valikoima eri elokuvalaseja pitää kartoittaa tarkasti ohjelmistoon, jotta ei ilmaannu rajoituksia linssivalinnoissa virtuaalitudion käytössä. Onneksi konfiguraatitiedostot, jotka muodostuvat linseistä, ovat erillinen osa kamera- ja sensorikonfiguraatiota, eli kameran ja linssin voi vaihtaa määrittämisen jälkeen nopeasti vaihtamalla vain konfiguraatitiedoston.

Projektin lopputulos, eli uusi virtuaalitudio on käytännössä loputon studion jatke, jolla yritys voi kasvattaa asiakaskuntaansa huomattavasti. Jo ensimmäisen tapahtuman aikana huomattu brändäysetu tulee olemaan vahva myynnin painopiste tulevaisuudessa. Prosessin optimointia jatketaan vielä pidemmälle etsimällä kehityskohteita, varsinkin nopeassa värin ja valotuksen muutoksessa.

Lähteet

Agarwala, A.; Hertzmann, A.; Salesin, D.H. & Seitz, S.M. 2004. Keyframe-based tracking for rotoscoping and animation. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 23(3).

Ansara, R. R. & Joslin, C. 2017. Adding Cartoon-like Motion to Realistic Animations. Teoksessa *VISIGRAPP (1: GRAPP)*.

Alt. Verkkoaineisto. Antilatency. <https://developers.antilatency.com/Hardware/Alt_en.html> Luettu 2.4.2022.

Truss tracking area. Verkkoaineisto. Antilatency. <https://developers.antilatency.com/Hardware/TrackingAreaTrusses_en.html> Luettu 2.4.2022.

Bassey, Amardeep, 2020. 6 Classic Bond Car Chases: Where Was He Really Going? Verkkojulkaisu. <<https://www.walesonline.co.uk/news/uk-news/6-classic-bond-car-chases-18032673>> Luettu 4.4.2022.

Bennett, Joel & Carter, Chris. 2014. Adopting virtual production for animated filmmaking. Teoksessa *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Computer Games, Multimedia and Allied Technology. (GSTF)*, Singapore.

Blackmagic Studio Camera 4K Pro Blackmagic Studio Camera 4K Pro. Verkkoaineisto. Blackmagic Design. <<https://www.blackmagicdesign.com/fi/products/blackmagicstudiocamera>> Luettu 2.4.2022.

Blackmagic URSA Mini Pro 12K. Verkkoaineisto. Blackmagic Design. <<https://www.blackmagicdesign.com/fi/products/blackmagicursaminipro>> Luettu 2.4.2022.

Bouldin, J.; Koivunen, A. & Paasonen, S. 2001. The body, animation and the real: Race, reality and the rotoscope in Betty Boop. *Proceedings of affective encounters: rethinking embodiment in feminist media studies*.

Chen, Y.L.; Wu, H.T.; Shi, F.; Tong, X. & Chai, J. 2013. Accurate and robust 3d facial capture using a single rgbd camera. Teoksessa *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*.

Hordyj, Jacek. 2015. Inverse Kinematics of anthropomorphic structures for vision systems applications. Master's Thesis. AGH University of Science and Technology. Saatavilla verkossa: https://www.researchgate.net/publication/283152771_Inverse_Kinematics_of_anthropomorphic_structures_for_vision_systems_applications.

How Green Is Your Green Screen? Comparing DIY Keying Paint vs. Rosco Chroma Key Paint. 2019. Verkkoaineisto. Rosco. <<https://www.rosco.com/spectrum/index.php/2016/08/diy-paint-vs-rosco-chroma-key-paint/>> Luettu 3.4.2022.

Vive seurantajärjestelmä. Verkkoaineisto. HTC Vive. <<https://www.vive.com/us/accessory/tracker3/>> Luettu 2.4.2022.

Indiemark. Verkkoaineisto. Loled Virtual. <<https://www.loledvirtual.com/indiemark/>> Luettu 12.4.2022.

Krawez, Michael; Caselitz, Tim; Sundram, Jugesh; Van Loock, Mark & Burgard, Wolfram. 2021. Real-Time Outdoor Illumination Estimation for Camera Tracking in Indoor Environments. IEEE Robotics and Automation Letters 6, no. 3.

Nebeling, M.; Rajaram, S.; Wu, L.; Cheng, Y. & Herskovitz, J. 2021. Xrstudio: A virtual production and live streaming system for immersive instructional experiences. Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems.

Okun, Jeffrey A. & Zwerman, Susan. 2020. The VES Handbook of Visual Effects: Industry Standard VFX Practices and Procedures. Routledge.

OpenVR. Verkkoaineisto. VVVV. <<https://vvvv.org/contribution/vvvv.openvr>> Luettu 18.4.2022.

Previs in Game of Thrones Season 8 “Game Revealed”. Verkkoaineisto. The Third Floor Inc. <<https://thethirdfloorinc.com/3240/3240/>>. Luettu 3.4.2022.

RedSpy. 2021. Verkkoaineisto. Stype. <<https://stype.tv/redspy/>> Luettu 12.4.2022.

Seal, Joshua Brent. 2017. Improving Animatic Creation in Maya. Master’s thesis. Texas A & M University. Saatavilla verkossa: <https://hdl.handle.net/1969.1/161574>.

Studio Mandalorean set. 2020. Verkkoaineisto. StageCraft. <<https://www.ilm.com/stagecraft/>> Luettu 3.4.2022.

Stoll, C.; Hasler, N.; Gall, J.; Seidel, H.P. & Theobalt, C. 2011. Fast articulated motion tracking using a sum of gaussians body model. Teoksessa 2011 International Conference on Computer Vision (s. 951-958). IEEE.

Stolz, Alex; Atkinson, Sarah & Kennedy, Helen. 2021. The Future of Film Report 2021. London: Future of Film.

Stratracker. Verkkoaineisto. Mo-Sys. <<https://www.mo-sys.com/product/camera-tracking/startracker/>> Luettu 12.4.2022.

Tirakoat, S. 2011. Optimized motion capture system for full body human motion capturing case study of educational institution and small animation production. Teoksessa 2011 Workshop on Digital Media and Digital Content Management.

Virtual Production. Verkkoaineisto. OptiTrack. <https://optitrack.com/applications/virtual-production/> Luettu 12.4.2022.

WDBE 2022. Verkkoaineisto. KIRAHub. <<https://kirahub.org/en/wdbe/>> Luettu 8.4.2022

Wigant Hannah. 2021. 'LOTR': How Much Was Andy Serkis Paid To Bring Gollum To Life? Verkkoaineisto. <<https://www.thethings.com/lotr-how-much-was-andy-serkis-paid-to-bring-gollum-to-life/>> Luettu 28.3.2022.