

**Juho Kuorikoski**

# **FOTOGRAMMETRIA VR-YMPÄRISTÖSSÄ**

**Simuloituja tiloja valokuvien avulla**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Digitalisaation johtaminen  
Helmikuu 2022**



# TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Helmikuu 2022	<b>Tekijä/tekijät</b> Juho Kuorikoski
<b>Koulutus</b> Digitalisaation johtaminen		<input type="checkbox"/> AMK <input checked="" type="checkbox"/> YAMK
<b>Työn nimi</b> FOTOGRAMMETRIA VR-YMPÄRISTÖSSÄ. Simuloituja tiloja valokuvien avulla		
<b>Työn ohjaaja</b> Jari Isohanni	<b>Sivumäärä</b> 55	
<b>Työelämäohjaaja</b> Jari Isohanni		
<p>Tässä opinnäytetyössä käsitellään VR-ympäristön rakentamista fotogrammetrian avulla, jossa perinteinen 3D-mallinnus toteutetaan käyttämällä valokuvia aineistona. Fotogrammetriasovellus rakentaa kuvatun kappaleen tai ympäristön geometrian valokuvista kerätyn tiedon perusteella, joten tässä opinnäytetyössä testattiin, miten simulaatioympäristön rakentaminen onnistuu fotogrammetrian avulla.</p> <p>Menetelmää testattiin syksyn 2021 ja kevään 2022 aikana kahdessa kohteessa: RoboTry-hankkeelle toteutettiin Kruunupyssä toimivan Ab Ferromek Oy:n varastotilan fotogrammetriamallinnus ja kuljetusrobotisimulaatio, ja HIPPA-Remote-hankkeessa puolestaan mallinnettiin palveluasumisyksikön asunto haastavia tilanteita mallintavan skenaariotyökalun tarpeisiin.</p> <p>Tehdyt fotogrammetriamallit optimoitiin ja vietiin Unity-pelimoottorille, jossa niiden ympärille rakennettiin VR-ympäristössä toimiva simulaatio. Kohdealustana toimi Metan Oculus Quest 2.</p> <p>Opinnäytetyössä selvisi, että fotogrammetriamallinnus on toimiva työkalu VR-ympäristöjen rakentamiseen, mutta siinä on myös omat rajoitteensa. Ab Ferromek Oy:n varastorakennuksen mallinnus onnistui hyvin, koska tila oli hyvin valaistu ja riittävän iso ja pinnoissa oli tarpeeksi kontrastia. Kannuksessa sijaitseva Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön mallinnus puolestaan oli haastavampaa, koska valaistus oli tehottomampi ja kaikki pinnat olivat vaaleita.</p> <p>Fotogrammetriamallit ovat sellaisenaan varsin raskaita valokuvien tuottaman tarkkuuden vuoksi, mutta optimoimalla mallien geometriaa ja pudottamalla tekstuurien tarkkuutta etenkin Ab Ferromek Oy:n varastosta tehty mallinnus soveltui lähes sellaisenaan VR-simulaation käyttöön. Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön fotogrammetriamallista sen sijaan käyttöön jäi vain nahkasohva, huolimatta puolet suuremmasta kuva-aineistosta kuin Ab Ferromek Oy:n vastaavasta. Fotogrammetria on kuitenkin käyttökelpoinen työkalu erilaisten simulaatioiden ympäristöihin. Parhaimmassa tapauksessa se lähestulkoon automatisoi koko mallinnuksen, mutta tilojen on oltava hyvin valaistuja ja riittävän suuria.</p>		

<b>Asiasanat</b> Fotogrammetria, virtuaalitodellisuus, pelimoottori
--

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> February 2022	<b>Author</b> Juho Kuorikoski
<b>Degree programme</b> Leadership in Digitalization		
<b>Name of thesis</b> PHOTOGRAMMETRY IN VR ENVIROMENT. Simulated environments with photographs		
<b>Centria supervisor</b> Jari Isohanni	<b>Pages</b> 55	
<b>Instructor representing commissioning institution or company</b> Jari Isohanni		
<p>In this thesis a two sets of photogrammetry models of spaces for the RoboTry and HIPPA-Remote projects where produced. These spaces were modelled by using photogrammetry software, and then these models were imported to Unity game engine, where a VR simulation was constructed for them. The first simulation was for Kruunupyy-based Ab Ferromek Oy, where a warehouse was modelled for the purpose of running a mobile robot simulation. The second model was constructed for the HIPPA-Remote project, and in this case an apartment modelled for the purpose of producing a scenario tool for challenging situations.</p> <p>Photogrammetry is a method where 3D modelling is done by feeding a set of photographs to an application, which calculates the space or object by using photographs as a base information for geometry. This method produces a highly accurate rendering of an object or a space, given that the circumstances are sufficient. The first photogrammetry model from Ab Ferromek Oy was a success, thanks to a reasonably large space, good lighting, and great contrast. The second model was constructed from a small apartment, which was not properly lit, and the space didn't have contrast. Despite a larger dataset of photographs, the second photogrammetry model didn't render correctly, and the only usable element was a leather couch.</p> <p>Photogrammetry is a good tool to automatize 3D modelling for a certain extent. The conditions of photography need to be very specific. In Ab Ferromek Oy's case it was possible to construct a very good digital twin of their warehouse just with photographs. After optimization this model proved to work extremely well on low-end VR glasses (Oculus Quest 2).</p> <p>The conclusion of this thesis is that photogrammetry is a suitable method for modelling spaces for simulation purposes in virtual reality, but the method does not work on all occasions. The conditions for a successful photogrammetry shoot require good lighting, big enough space and good contrast in furniture and architecture so that the photogrammetry software can find enough reference points to produce a functional model.</p>		

**Key words**

Photogrammetry, Virtual Reality, Game Engine

## **KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**

### **FOTOGRAMMETRIA**

Fotogrammetria on kohteiden kolmiulotteista mittausta ja mallinnusta kohteesta otetuilla valokuvilla.

### **PELIMOOTTORI**

Pelimoottori on digitaalisen pelin ohjelmistokehys, jonka päälle pelikehittäjät voivat rakentaa pelejä. Pelimoottori sisältää muun muassa renderointimoottorin kaksi- ja kolmiulotteiselle grafiikalle, fysiikkamoottorin tai törmäyksen tunnistuksen, äänet, komentosarjakielen, animoinnin, tekoälyn ja lokalisoitituen.

### **VIRTUAALITODELLISUUS**

Virtuaalitodellisuus on tietokonesimulaation avulla luotu keinotekoinen ympäristö. Virtuaalitodellisuuden ympäristöt perustuvat lähes kokonaan visuaaliseen vaikutelmaan, joka luodaan erityiselle stereoskooppiselle katselulaitteelle.

### **IMMERSIO**

Immersion tarkoitus on käyttäjän uppoutuminen simulaatioon ja läsnäolon tuntoa virtuaalisessa tilassa. Käyttäjä tuntee olevansa osa simulaation maailmaa.

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 FOTOGRAMMETRIA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Fotogrammetrian historia .....	6
2.2 Fotogrammetrian käyttökohteet .....	6
2.3 Fotogrammetriaprosessi .....	8
2.4 Käytettävä sovellus.....	9
<b>3 VIRTUAALITODELLISUUS .....</b>	<b>11</b>
3.1 Termistö .....	12
3.2 Virtuaalitodellisuuden historia .....	13
3.3 Virtuaalitodellisuuden käyttökohteet.....	14
3.4 Käytettävät laitteet ja sovellukset.....	16
<b>4 PELIMOOTTORI .....</b>	<b>17</b>
4.1.1 Humanoid Control VR .....	19
4.1.2 Dreamteck Splines.....	21
4.1.3 Playmaker .....	22
4.1.4 Dialogue System .....	23
<b>5 3D-MALLIN LUOMINEN, OPTIMOINTI JA VIENTI PELIMOOTTORIIN .....</b>	<b>26</b>
5.1 3D-mallinnuksen perusteet.....	26
5.2 Kuvaaminen.....	28
5.2.1 Ab Ferromek Oy .....	28
5.2.2 Ritarinkannus.....	31
5.3 Mallin rakentaminen .....	31
5.4 Mallin optimointi.....	35
5.5 Mallin vienti pelimoottoriin .....	37
<b>6 SIMULAATIOT .....</b>	<b>40</b>
6.1 Ab Ferromek Oy .....	41
6.2 Ritarinkannus.....	45
<b>7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>48</b>
7.1 Simulaatiot .....	49
7.2 Fotogrammetria ja digitaalisuus.....	50
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>53</b>

## **KUVIOT**

KUVIO 1. Fotogrammetrian toimintaperiaate .....	5
KUVIO 2. VR-lasien toimintaperiaate.....	10

## **KUVAT**

KUVA 1. Humanoid Control -lisäosan hahmomalli.....	19
KUVA 2. Palveluasumisyksikön asukkaan liikkumisreitti.....	20
KUVA 3. Esimerkki Playmakerilla toteutetusta tilakoneesta.....	22
KUVA 4. Editorinäkymä Dialogue Systemin vuoropuhelusta .....	24
KUVA 5. Esimerkki Samsung Galaxy A51:llä kerätystä fotogrammetriamallinnuksen datasetistä.....	29
KUVA 6. Esimerkki GoPro Insta360:lla kerätystä fotogrammetriamallinnuksen datasetistä.....	29
KUVA 7. Esimerkki tiheästä pisteverkosta .....	31
KUVA 8. Ab Ferromek Oy:n optimoimaton fotogrammetriamalli .....	32
KUVA 9. Esimerkki fotogrammetriamallin katto- ja lattiamallinnuksesta .....	32
KUVA 10. Esimerkki epäonnistuneesta fotogrammetriamallista.....	33
KUVA 11. Fotogrammetriamallinnus yksittäisestä huonekalusta.....	34
KUVA 12. Optimoidun ja optimoimattoman fotogrammetriamallin erot .....	35
KUVA 13. Esimerkki suorista pinnoista fotogrammetriamallissa.....	36
KUVA 14. Fotogrammetriamalli Unityssa .....	37
KUVA 15. Valokuva Ab Ferromek Oy:n varastotilasta .....	37
KUVA 16. Kuvakaappaus VR-simulaatiosta Oculus Quest 2 -VR-laseilla .....	41
KUVA 17. Kuvakaappaus MIR-kuljetusrobotin toiminnasta VR-simulaatiossa .....	42
KUVA 18. Kuvakaappaus simulaation toimintalogiikasta .....	43
KUVA 19. Esimerkki käyttäjäopastuksesta VR-simulaatiossa .....	45

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. Tilojen kuvaamiseen käytetyt laitteet sekä otettujen kuvien määrä .....	28
---	----

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin, miten fotogrammetriaa voidaan soveltaa tilojen mallintamiseen ja simulointiin virtuaalitodellisuudessa. Fotogrammetrialla tarkoitetaan menetelmää, jossa kolmiulotteinen malli rakennetaan hyödyntämällä valokuvia. Kolmiulotteisen mallin data kerätään eri kuvakulmista otetuista valokuvista, jotka sen jälkeen syötetään mallinnuksen tekemään sovellukseen, joka lopulta laatii kuvien perusteella kolmiulotteisen mallin kuvatusta tilasta tai kappaleesta. Opinnäytetyössä fotogrammetriaa hyödynnettiin tilojen mallintamiseen. Syksyn 2021 ja kevään 2022 välisenä aikana RoboTry- ja HIPPA-Remote-hankkeiden tarpeisiin mallinnettiin kaksi tilaa: Ab Ferromek Oy:n varastohalli sekä Ritarinkannuksessa sijaitseva kehitysvammaisille henkilöille tarkoitettu asumisyksikön asunto.

Tässä opinnäytetyössä käydään läpi fotogrammetriamallinnuksen ohella myös itse simulaatioiden laadinta sekä niiden käyttökohteet. Fotogrammetriamallit vietiin Unity-pelimoottorille, jossa niiden ympärille rakennettiin kahteen eri käyttötarkoitukseen soveltuva simulaatio. Ab Ferromek Oy:n varastossa testattiin mobiilirobotin avulla automatisoitua varastohallintaa, kun taas Ritarinkannuksen 3D-malli loi pohjan HIPPA-Remote-hankkeen skenaariotyökalulle, joka mahdollistaa ikäihmisten, kehitysvammaisten ja mielenterveyskuntoutujien arjessa kohtaamien haastavien tilanteiden sekä niiden helpottamiseen tarkoitettujen teknisten ratkaisujen mallinnuksen. Unityssa simulaatiot laadittiin toimimaan Metan Oculus Quest 2 -virtuaalilaseilla, ja näiden avulla tulokset esiteltiin asiakkaille.

Fotogrammetriamallin rakentamiseen kerättiin aineisto ensimmäisestä kohteesta (Ab Ferromek Oy) seuraavalla tavalla: tilat kuvattiin älypuhelimella (noin 300 kuvaa), GoPro-kameralla (noin 150 kuvaa) sekä 360-kameralla (neljä kuvaa). Tämän lisäksi tilat videoitiin normaalilla ja 360-kameralla. Ensimmäisestä kohteesta saatujen kokemusten perusteella Ritarinkannuksen tilat kuvattiin älypuhelimella (noin 450 kuvaa). Opinnäytetyössä käydään läpi, miten erilaiset datankeruumenetelmät vertautuvat toisiinsa ja mikä niistä on tällaisessa kontekstissa käyttökelpoisin.

Opinnäytetyössä selvitettiin, miten tarkasti fotogrammetrian avulla luotu 3D-malli voidaan tuoda suorituskykyä vaativaan virtuaalitodellisuuden simulaatioon ja kuinka sillä voi korvata perinteisen, käsin rakennetun kolmiulotteisen ympäristön. Tämän lisäksi selvitettiin menetelmiä, joilla kolmiulotteista mallia voidaan optimoida ja muokata paremman suorituskyvyn saavuttamiseksi. Tärkeimpänä asiana

oli selvittää, kuinka tarkka malli on fotogrammetriaa käyttämällä mahdollista laatia ja kuinka uskottava se on peliympäristönä. Mittarina käytetään visuaalista tarkkuutta ja varsinaisia fyysisiä mittoja kyseisistä tiloista. Tässä opinnäytetyössä pohditaan myös fotogrammetriaan perustuvien simulaatioiden kaupallistamista ja vertaillaan niiden toteuttamista fyysisiin demonstraatioihin. Työssä käydään läpi myös käyttäjäpalautetta sekä pohditaan parannusehdotuksia tehtyyn työhön sen perusteella.

Opinnäytetyön tavoitteena on tarkastella, miten fotogrammetrialla toteutetut 3D-mallit soveltuvat VR-käyttöön. Toinen tavoite on selvittää, voidaanko fotogrammetrialla korvata perinteinen 3D-mallinnus, jossa mallit rakennetaan alusta alkaen itse. Työssä tarkastellaan erityisesti sitä, miten hyvin mallit soveltuvat käytettäväksi suorituskyvyltään rajoitetulla Oculus Quest 2 -virtuaalilaseilla.

Syntyneet 3D-mallit ja niiden ympärille rakennetut simulaatiot liittyvät kahteen Centria-ammattikorkeakoulun hankkeeseen: RoboTryhin (EAKR 2021a, 1) ja HIPPA-Remoteen (EAKR 2021b, 2). RoboTryssa tuotetaan robotiikan demonstraatioita ja pilotointeja Pohjanmaan alueen pk-yrityksille, HIPPA-Remotessa puolestaan tuotetaan asiakaslähtöisiä digitaalisia sote-alan tuote- ja palvelukehitysympäristöjä. Molemmissa hankkeissa virtuaalitodellisuus on eräs käytettävistä teknologioista. Työskentelen itse TKI-asiantuntijana molemmissa hankkeissa.

RoboTry-hankkeen tavoitteena on tuottaa julkisten demonstraatioiden ja pilotointien avulla tietoa ja konkreettisia ratkaisuja uuden sukupolven robotiikasta ja sen hyödynnettävyydestä eri alojen tuotannollisille yrityksille Pohjanmaan alueella koronataantumasta elpymiseen ja liiketoiminnan kehittämiseen. HIPPA-Remote-hankkeella vastataan yritysten, julkisen sektorin ja kolmannen sektorin digitalisaation kehittämistarpeeseen erityisesti koronapandemiasta toipumisen näkökulmasta. Koronapandemia on johtanut poikkeukselliseen mahdollisuuteen monien muuttumattomiksi luultujen käytänteiden uudelleenarviointiin ja kriisin aikana pakosta omaksuttujen uusien toimintatapojen jatkojalostamiseen ja pysyvämpään käyttöönnottoon.

RoboTry-hankkeessa VR:n mahdollisuudet näkyvät erityisesti simulaatioiden näkökulmasta. Virtuaalitodellisuus tarjoaa vaihtoehdon fyysisille ratkaisuille, ja sitä voidaan soveltaa esimerkiksi laatimalla virtuaalinen demonstraatio ennen fyysistä, jotta voidaan varmistua siitä, että fyysinen demonstraatio on ylipäättään mahdollinen toteuttaa. Tässä opinnäytetyössä virtuaalinen demonstraatio seuraa fyysistä, mutta VR-demonstraation etuna on se, että demonstraatiosta voidaan toiminnallisuudeltaan rakentaa huomattavasti fyysistä ratkaisua laajempi.



HIPPA-Remote-hankkeessa kehitetään ja testataan käyttäjälähtöisiä etä- ja hybridikehityssovelluksia ja -palveluita sosiaalialan ja terveydenhoidon koti- ja palveluasumisen uusien ja innovatiivisten digitaalisten tuotteiden sekä palvelujen kehityksessä. Palveluasumisyksikön asunnosta mallinnettu VR-ympäristö toimii skenaariotyökalun ohella myös prototyypinä etäympäristöstä, jossa eri käyttäjät voivat olla läsnä sijainnistaan riippumatta.

## 2 FOTOGRAMMETRIA

Fotogrammetria eli kuvamittaus on menetelmä, jolla saadaan luotettavaa tietoa ympäristöstä ja fyysisistä objekteista mittaamalla, tallentamalla ja tulkitsemalla kuvamateriaalia. Fotogrammetrialla tarkoitetaan kolmiulotteisen tiedon palauttamista kaksiulotteista lähdemateriaalia käyttämällä. (Matthews 2008). Fotogrammetria on kappaleen muodon ja sijainnin tulkitsemista ja mittaamista kahden tai useamman kuvan muodostaman datasetin perusteella (Luhmann & Robson 2013, 2). Yleensä mittaus tapahtuu kameran avulla, jolla määritetään kohteen muoto ja sijainti. Kun kuvia on useita, niiden perusteella on mahdollista päätellä myös mittasuhteet ja tilojen tapauksessa myös etäisyydet. Kuvan muuttamisen ollessa seuraavaan verrattuna tarpeeksi vähäinen, pisteiden sijainti voidaan laskea kolmiomittauksen (triangulaatio) avulla. (Luhmann & Robson 2013, 3–4.).

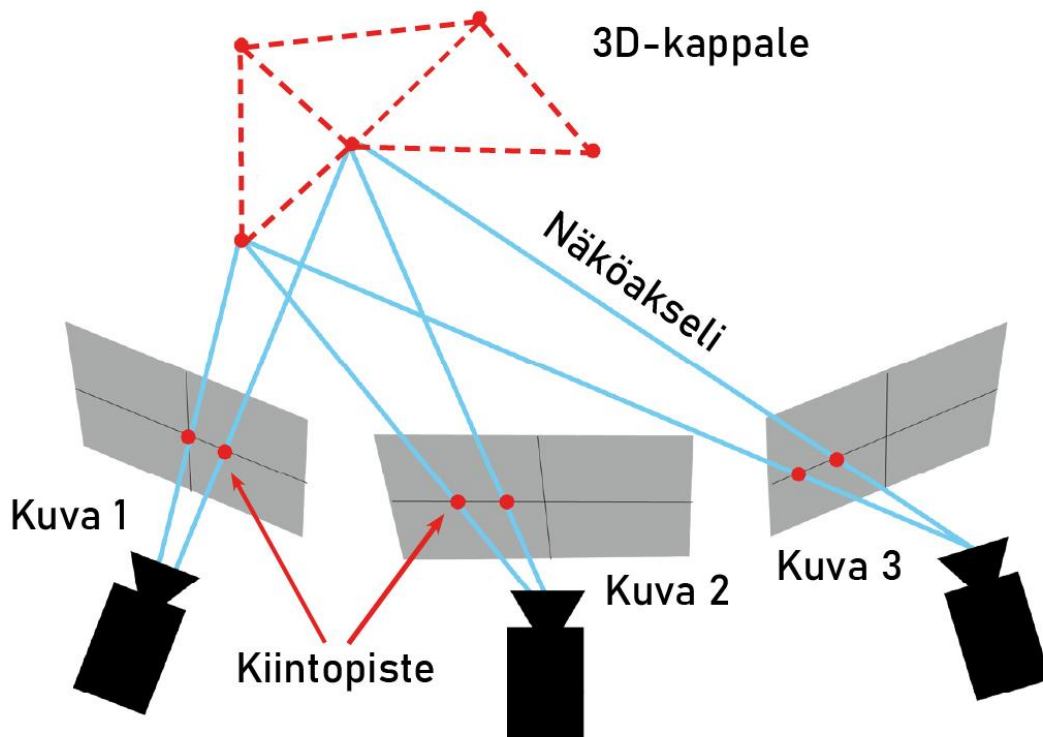
Valokuva on litteä, kaksiulotteinen tallenne kohteestaan. Kun valokuvaus tallentaa kolmiulotteisen ympäristön kaksiulotteiseksi, fotogrammetria kääntää tämän pääläelleen: kaksiulotteiset kuvat käännetään ja kartoitetaan takaisin reaali maailman kolmiulotteisiksi kohteiksi. Koska valokuvatessa katoaa tietoa kolmannen ulottuvuuden puuttuessa, takaisinmallinnusta kaksiulotteisesta kolmiulotteiseksi ei ole mahdollista tehdä. Tämän vuoksi fotogrammetrian toimivuuden minimivaatimus on vähintään kaksi valokuvaa kohteesta, eri kuvakulmista kuvattuna. Mitä enemmän kuvia on käytössä, sitä tarkemmin valokuvien kadottama tieto kuvatun kappaleen syvyydestä on mahdollista palauttaa. Fotogrammetriaa käyttävä ohjelmisto vertailee valokuvista kiintopisteitä ja järjestää valokuvat oikeille paikoilleen. Tämän jälkeen valokuvista luodaan kolmiomittauksen avulla pisteitä kolmiulotteiseen koordinaatistoon. (Luhmann & Robson 2013, 2, 579.)

Fotogrammetriaa on käytetty peliteollisuudessa useita vuosia 3D-grafiikan luomisen apuvälineenä. Fotogrammetrian avulla voidaan tuottaa erittäin realistisia 3D-malleja. Sitä käytetään myös hahmottamaan tilojen tai esineiden mittasuhteita. Peliteollisuudessa fotogrammetrian käyttö on yleistynyt 2010-luvulla, kun pelien graafiset vaatimukset ovat kasvaneet. (Poznanski 2014)

Fotogrammetria perustuu kolmiomittauksen peruseriaatteeseen. Suorien leikkauspisteet ja niiden muodostamat kulmat mahdollistavat yksittäisen pisteen kolmen ulottuvuuden mittaamisen.

Kameran sijainnin ja tähtäyskulman pitää olla tiedossa jokaiselle kuvalle, että pisteitä voidaan mitata näin. Laskenta tehdään kolmiomittauksesta poiketen taaksepäinleikkauksella, jolloin mittaus tapahtuu kahden toisiinsa liittyvän kolmion avulla. Näin mittauksessa on kolme eri lähtöpistettä, joista saadaan

johdettua pisteiden väliset kulmat sekä tähtäyssuunnat. Mittaus suoritetaan tunnistamalla jokaisesta kuvasta samat kiintopisteet. Kameran paikasta kohteen kiintopisteeseen lähtevien säteiden leikkauskohdista ja kulmista lasketaan kuvattavan kohteen kiintopisteiden sijainnit kolmiulotteisessa avaruudessa. (KUVIO 1). (Luhmann & Robson 2013, 54–55.).



KUVIO 1: Fotogrammetrian toimintaperiaate. (Mason 2019)

Fotogrammetria on yleisesti jaettu kahteen pääkategoriaan, jotka määräytyvät kamerasen etäisyyden perusteella. Nämä ovat ilmasta tapahtuva fotogrammetria (aerial photogrammetry) sekä lähietäisyyden fotogrammetria (close-range photogrammetry). Teknologian kehityksen myötä kategorioiden rajat ovat hämärtyneet, kiitos tehokkaiden tietokoneiden, pienten drone-lennokkien ja tehokkaiden kameroiden. Ilmafotogrammetria käyttää suuria kuvia sekä maaston koordinaatteja tarkkojen maa-alueiden mallinnukseen. Ilmasta kuvattaessa kamera osoittaa pystysuoraan maata kohti, ja se on yleensä kiinnitetty lennokkiin tai lentokoneeseen. Kamera ottaa useita päällekkäisiä kuvia lentoreitin varrelta. Jotta kerätyistä aineistosta saadaan käyttökelpoinen, kuvien on katettava noin 60 prosenttia toistensa sisällöstä.

(Matthews 2008). Lähifotogrammetria on käytännössä sama asia kuin ilmafotogrammetria. Lähifotogrammetriaan lasketaan sellaiset kuvat, jotka on otettu alle 300 metrin päästä kohteesta.

## 2.1 Fotogrammetrian historia

Fotogrammetria syntyi pian valokuvauksen keksimisen jälkeen 1850-luvulla. Sen tärkeimpiin käyttökohteisiin lukeutui pitkään maastonkartoitus. Ranskalainen Aimé Laussedant oli ensimmäinen henkilö, joka rakensi topografisia karttoja valokuvien avulla. Hän kokeili myös ilmafotogrammetriaa leijojen avulla vuonna 1858, mutta luopui kokeiluista muutamaa vuotta myöhemmin. Fotogrammetriaa terminä käytti ensimmäisen kerran Albrecht Meydenbauer, joka sovelsi fotogrammetriaa arkkitehtuurin tutkimiseen. Yhdysvaltalainen Oliver Holmes puolestaan käytti fotogrammetriaa apunaan Yhdysvaltojen sisällissodan jälkeen proteesien valmistamiseen ja sovittamiseen. (Klinkenberg 2008.).

Saksalaisfyysikko Carl Pulfrich rakensi ensimmäisen kolmiulotteisten mittausten tekemiseen soveltuvan laitteen 1900-luvun alussa. Lentokoneiden yleistymisen myötä sitä sovellettiin maaston kartoittamiseen. Samoihin aikoihin armeijat kiinnostuivat ilmakuviin käytöstä osana tiedustelutoimintaansa. Fotogrammetria kehittyi toisen maailmansodan aikana väri- ja infrapunafilmien keksimisen myötä. Nämä mahdollistivat aiempaa tarkemman tiedustelun ja kartoituksen. Modernin fotogrammetrian matemaattiset menetelmät syntyivät toisen maailmansodan jälkeen, ja tietokoneiden kehityksen ja yleistymisen seurauksena fotogrammetria on siirtynyt käytännössä kokonaan digitaaliseksi. Kameran lisäksi fotogrammetriaan käytetään esimerkiksi laserskannereita. Teknologian kehittyessä fotogrammetrian käyttökohteet ovat laajentuneet. Kymmenen viime vuoden aikana fotogrammetriaa on alettu käyttää kartoituksen ohella myös muilla sovellusaloilla. (Klinkenberg 2008.)

## 2.2 Fotogrammetrian käyttökohteet

Fotogrammetrian alkuperäinen käyttökohde oli maastonmallinnus, mutta vuosikymmenten kuluessa sen käyttökohteet ovat laajentuneet. Nykyiset menetelmät ja tekniikat ovat yleiskäyttöisiä, eli niitä voidaan soveltaa lähes kaikkien kuvattavien kohteiden mittaamiseen. Monikäyttöisyytensä ansiosta fotogrammetriasta on tullut käyttökelpoinen työkalu monilla teollisuuden ja tieteen aloilla. (Luhmann & Robson 2013 579.) Tietokoneiden laskentatehon kasvaessa, hintojen laskiessa ja teknologian yleistyessä käyttökohteita ja uusia sovelluksia tulee jatkuvasti lisää (Foster & Halbshtein 2014, 9).

Etenkin tietokoneiden ja digitaalikameroiden suorituskyvyn kasvu ja tehokkaan kaluston hintojen lasku ovat pudottaneet merkittävästi rimaa fotogrammetrian käyttöön muussakin kontekstissa kuin topografiassa. Muun muassa arkkitehtuurissa fotogrammetriaa on hyödynnetty historiallisten rakennusten tutkimiseen ja dokumentointiin esimerkiksi korjaustöitä sekä entisöintiä varten. Kokonaisia rakennuksia on mahdollista mallintaa riittävän laajan kuvamateriaalin avulla, minkä ansiosta historiallisesti merkittäviä rakennuksia voi esitellä yleisölle virtuaalisesti (Luhmann & Robson 2013 579, 585). Vedenalaisten kameroiden kehittyminen on mahdollistanut fotogrammetrian käytön kokonaan uusissa kohteissa, kute esimerkiksi öljynporauslauttojen vedenalaisten rakenteiden tarkastukset, syvyysmittaukset ja merenpohjan kartoitus (Maas & Vosselman 2010, 237–238). Fotogrammetriaa on käytetty myös liikennevälineisiin liittyvien onnettomuuksien mallinnoissa. Ennen tietokoneiden yleistymistä ja niiden laskentatehon kasvua näitä mallinnoita on käytetty havainnollistamaan onnettomuuksien tapahtumaketjuja ja seurauksia. Nykyään simulaatiot onnettomuustilanteista tehdään lähes yksinomaan tietokonemallinnoiksi. (Fryer, Mitchell & Chandler 2007 11–15.)

Voimalaitoksissa nopeista mittaustekniikoista on hyötyä tuotannon keskeytysten ja henkilövahinkojen minimoimiseksi. Fotogrammetrian avulla voidaan mitata rakenteiden ja materiaalien vääristymiä ja muodonmuutoksia (Luhmann & Robson 2013 595–596, 599). Fotogrammetrian tarkkuus mahdollistaa sen käytön esimerkiksi laiva-, auto- ja lentokoneiteollisuuden laadunvarmistuksessa. Sen avulla voidaan tarkastella muun muassa korin ja rungon muodonmuutoksia törmäystesteissä. Laivateollisuudessa menetelmän vahvuutena puolestaan on mahdollisuus mitata suuria kappaleita (Luhmann & Robson 2013 606–607, 610, 614). Lääketieteessä fotogrammetriaa hyödynnetään eri kehon osien mittaamiseen. Näiden tulosten avulla voidaan valmistaa implanteja ja proteeseja. Menetelmää hyödynnetään myös plastiikkakirurgiassa. Fotogrammetriaa sovelletaan myös selkärangan ja luiden vääristymien ja kasvun tutkimukseen. Fotogrammetriaa hyödynnetään lääketieteessä myös hammashoidossa ja urheilulääketieteessä. Menetelmän etuja ovat säteilylle altistumisen vähyys, nopeus ja kontaktiton mittaaminen. (Luhmann & Robson 2013, 615–616.)

Tietokoneiden kasvanut laskentateho on mahdollistanut entistä tarkemman 3D-grafiikan käytön, mikä on avannut kokonaan uusia käyttökohteita myös fotogrammetrian käytölle. Toinen merkittävä tekijä liittyy kustannuksiin. Fotogrammetrian tuotantokustannukset ovat erittäin alhaiset. 3D-mallintaminen on työläs prosessi, jota voidaan fotogrammetrian avulla yksinkertaistaa ja nopeuttaa. Koska menetelmä on nopea ja tuottaa realistisen lopputuloksen, sitä käytetään yhä enenevässä määrin esimerkiksi erikois-

tehosteisiin ja kohteiden digitalisointiin. (Willis 2016, 64–65.) Fotogrammetriaa käytetään kolmiulotteisessa tietokonegrafiikassa todelliseen maailmaan pohjaavan sisällön tuottamiseen (Foster & Halbstein 2014, 10). Ensimmäisiä kertoja fotogrammetriaa käytettiin elokuvatuotannoissa 1990-luvun lopulla nimikkeissä *The Campanile Movie* (1997) ja *The Matrix* (1999).

Erilliset fotogrammetriasovellukset ovat madaltaneet yksittäisten kuluttajien kynnystä fotogrammetriakokeilujen tekemiseen, sillä koneoppiminen ja tekoäly ovat pitkälti automatisoineet kuvien prosessoinnin. Vaikka laskentateho ja tietokoneiden graafinen kapasiteetti ovat vuosien saatossa kasvaneet, todellisuus ja 3D-mallinnus ovat edelleen varsin kaukana toisistaan, etenkin reaaliaikaisen 3D-grafiikan kohdalla. Valaistus ja geometria rajoittavat mallinnusten tekemistä, kuten myös tekstuureiden resoluutio. 3D-grafiikka vaatii tietokoneelta paljon suorituskykyä, joten fotogrammetriamallit sopivat harvoin sellaisinaan esimerkiksi peliympäristöiksi. (Poznanski 2014.)

### **2.3 Fotogrammetriaprosessi**

Fotogrammetriaprosessi rakentuu yksinkertaistettuna kolmesta vaiheesta, jotka ovat kuvadatan kerääminen, tämän datan mittaaminen ja kappaleen luominen uudelleen (rekonstruktio) (Luhmann & Robson 2013, 3). Prosessin alussa kappale valokuvataan. Näiden valokuvien perusteella tietokoneohjelma mittaa ja asettaa kuvat kolmiulotteiseen tilaan. Tämän jälkeen ohjelma laskee kuvien ja kameroiden sijoittelun perusteella kappaleesta 3D-mallin (Bishop, Cowan & Jančošek 2017). Prosessin onnistumisen kannalta riittävän laadukkaat välineet ja tarvittava osaaminen valokuvauksessa ovat tärkeitä (Luhmann & Robson 2013, 3–4). Modernit sovellukset ja kamerat ovat kehittyneet sellaiselle tasolle, että jopa älypuhelimellakin voi rakentaa uskottavat fotogrammetriamallin (Bishop ym. 2017). Huolellinen suunnittelu ja selkeä työjärjestys takaavat kuitenkin laadukkaan lopputuloksen (Brown & Hamilton 2016).

Fotogrammetrian tärkein työvaihe on kuvaaminen. Hyvillä valokuvilla fotogrammetriamallin tarkkuus paranee, mikä helpottaa sen jälkikäsitteilyä. Kuvaamiseen soveltuvat monenlaiset eri laitteet, kuten järjestelmäkamera, älypuhelin tai kuvauslennokki. Valokuvauksessa esivalmistelut ja huolellinen kohteen valinta ovat lopputuloksen onnistumisen kannalta äärimmäisen tärkeitä. Koska menetelmässä verrataan useita kuvia samasta kohteesta, kohde, valaistus tai sen sijainti eivät saa muuttua valokuvauksen aikana.

3D-mallia ei voi laatia kuvista, joissa kohteen edessä on näkyvä este (Luhmann & Robson 2013, 2). Fotogrammetriasovellus voi tehdä virheellisiä laskelmia, mikä voi johtaa puutteelliseen tai rikkiinäiseen 3D-malliin. Laskentavirheitä voidaan estää riittävällä määrällä kuvia sekä niiden riittävällä limitymisellä. (Foster & Halbstein 2014, 14.) Kohde on tärkeä kuvata riittävän monista eri kuvakulmista, jotta lasketusta mallista saataisiin mahdollisimman kokonainen (Bishop ym. 2017). Kohteen pinnassa olisi myös hyvä olla riittävästi tekstuuria, sillä yksiväriset ja liian tasaiset pinnat voivat aiheuttaa laskentavirheitä. Fotogrammetrian avulla on käytännössä mahdotonta tehdä 3D-mallia kappaleista, jotka ovat heijastavia, kiiltäviä tai läpinäkyviä. (Agisoft 2017, 7.) Myös liikkuvat kohteet ovat käytännössä mahdottomia fotogrammetriamallinnuksella, ja ihmistä kuvattaessa pienetkin liikkeet aiheuttavat epätarkkuuksia valmiiseen malliin. Liikkuvien kohteiden mallintamiseen on mahdollista käyttää erityistä kamerajärjestelmää, jossa kymmenet kamerat laukeavat yhtäaikaaisesti. (Poznanski 2014.)

Valaistus on pyrittävä pitämään mahdollisimman tasaisena, minkä vuoksi on suositeltavaa käyttää epäsuoraa valaistusta, joka ei tuota varjoja. Kun kuvataan ulkotiloissa, kannattaa suosia pilvistä päivää tai huolehtia siitä, että kohde on varjossa kokonaisuudessaan. Sisätiloissa puolestaan kuvauksen aikana olisi hyvä käyttää tasaista studiovalaistusta. Kohteen on oltava paikallaan koko kuvausession ajan, sillä pienikin liike luo virheellisiä mittaustuloksia, joista seuraa virheitä mallinnuksessa. Kuvauksessa tulee huomioida myös kuvaustapa. Esimerkiksi tasaista seinää kuvatessa kameraa ei käännetä vain seinän myötäisesti, vaan se tulee siirtää seinänvierustaa pitkin koko kuvausmatkan ajan. Kokonaista huonetta kuvatessa kameran tulisi olla vastakkaisella seinällä ja osoittaa huoneen poikki kohti kuvattavaa seinää. Fotogrammetriakuvaaminen ei edellytä kalliita laitteistoja tai sovelluksia. Lähestulkoon millä tahansa modernilla digitaalisella kameralla, myös älypuhelimella, saa kerättyä riittävän hyvän aineiston. (Bishop ym. 2017.)

## **2.4 Käytettävä sovellus**

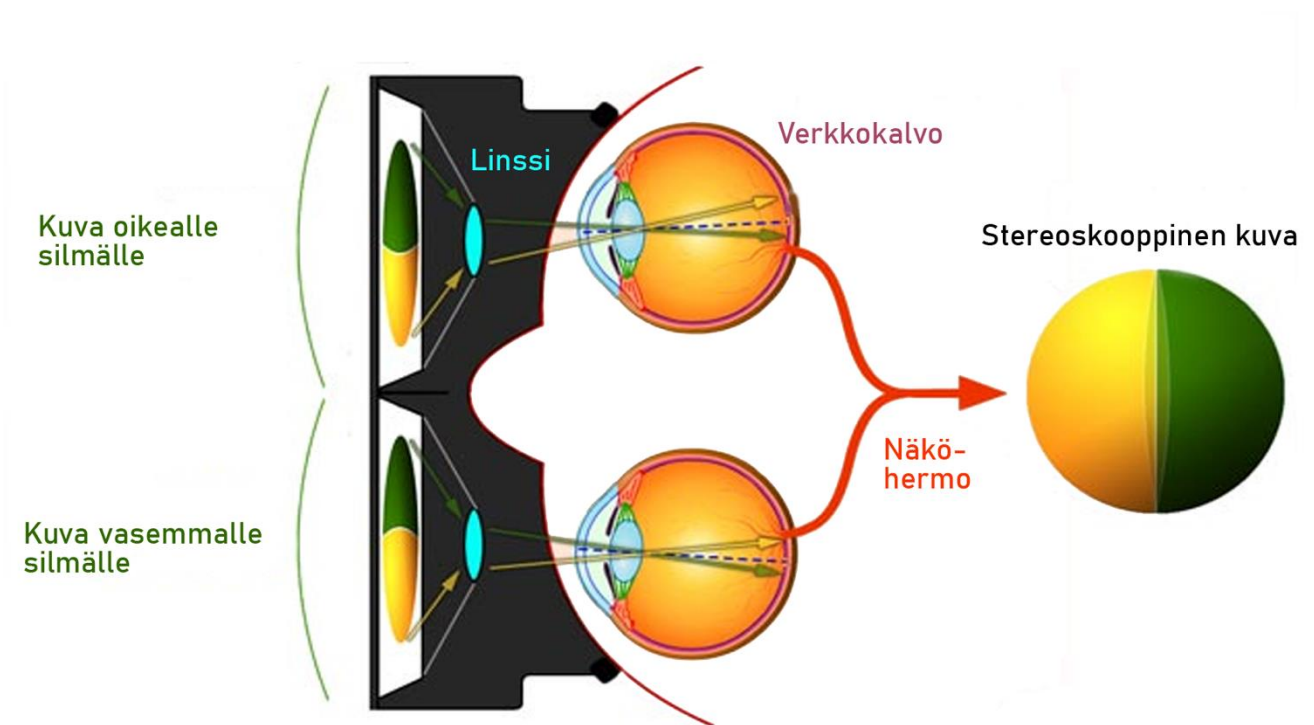
Tässä opinnäytetyössä fotogrammetriamallinnukseen käytetään 3DF Zephyr -sovelluksen Lite-versiota, joka mahdollistaa 500 kuvan datasetin käyttämisen (Zephyr 2021). Sovellus valikoitui käyttöön helppokäyttöisyytensä ja monipuolisuutensa vuoksi. Mallinnus on suhteellisen nopeaa suorituskykyisellä tietokoneella, ja sovelluksen optimointialgoritmit mahdollistavat käyttökelpoisen 3D-mallin tuot-

tamisen suoraan sovelluksessa. Toinen merkittävä 3DF Zephyrin etu on sen kyky mallintaa tiloja. Esimerkiksi kilpaileva Meshroom selviää kappaleiden mallintamisesta, mutta tilojen kohdalla Zephyr suoriutuu tehtävästä paljon paremmin.



### 3 VIRTUAALITODELLISUUS

Virtuaalitodellisuus (VR) on tietokonesimulaatio, jolla luodaan todellisen tuntuinen ympäristö käyttäjälle. Ympäristö voi mukailla oikeita paikkoja tai olla täysin kuvitteellinen. Yleisimmin VR-ympäristö on visuaalinen vaikutelma, joka luodaan käyttäjälle VR-laitteistolla. VR-laitteisto on useimmiten päähän puettava VR-kypärä, joka peittää koko näkökentän. (Rouse 2015.) Virtuaalitodellisuus yhdistää reaaliaikaisen grafiikan, kehoa seuraavat laitteet, visuaaliset näytöt sekä muita aistiperäisiä syötteitä upottaakseen yksilön tietokoneella luotuun virtuaaliympäristöön. (Emmelkamp ym. 2002.) VR:llä pyritään luomaan mahdollisimman immerstiivinen kokemus käyttäjälle kokemastaan virtuaaliympäristöstä. Immersion on huomattu lisäävän tunnereaktioiden voimakkuutta. (Visch, Tan & Molenaar 2010.)



KUVIO 2. VR-lasien toimintaperiaate, (Scholten 2020)

Virtuaalitodellisuuden toimintaperiaate perustuu liikkeiden seurantaan ja stereoskooppiseen kuvaan (KUVIO 2). VR-lasit näyttävät molemmille silmille hieman eri kuvaa, minkä seurauksena ihmisäivot

tulkitsevat näkymän kolmiulotteiseksi. VR-lasien liikeanturit pitävät kirjaa käyttäjän liikkeistä välittäen ne tietokoneelle, joka säättää näkymän tiedon perusteella sellaiseksi, että käyttäjä kokee liikkuvansa. (Bowman & McMahan 2007.)

### 3.1 Termistö

VR-laitteista ja -sovelluksista puhuttaessa on tärkeää määritellä, missä kontekstissa VR:ää käytetään. Tässä opinnäytetyössä virtuaalitodellisuudella tarkoitetaan yksinomaan VR:ää. Puettavia ja erilaisia keinotodellisuuksia mallintavia laitteita kutsutaan useilla eri nimillä, joten väärinkäsitysten välttämiseksi erilaiset nimeämistavat on syytä käydä läpi. Virtuaalitodellisuus eli VR (virtual reality) tarkoittaa täysin tietokonegrafiikalla toteutettua keinotekoisia todellisuutta, johon käyttäjä on vuorovaikutuksessa erillisten VR-lasien avulla. Lisätty todellisuus eli AR (augmented reality) puolestaan tarkoittaa simulaatiota, johon tietokonegrafiikalla lisätään elementtejä. Lisätyllä todellisuudella tarkoitetaan esimerkiksi Pokémon Go -peliä, jossa älypuhelimien kameralla kuvattuun, todelliseen ympäristöön lisätään tietokonegrafiikalla toteutettuja pelihahmoja. VR ja AR ovat keinotekoisien todellisuuden kattokäsitteitä, mutta niitä on pyritty saamaan saman sateenvarjon alle MR- ja XR-termien avulla. MR (mixed reality) on suomeksi tehostettu todellisuus, ja se sisältää elementtejä niin AR- kuin VR-laitteista ja -sovelluksista. XR (extended reality) on käytännössä sama termi, ja se on hiljalleen syrjäyttämässä MR:n arkikielestä. (Kaplan, Cruik & Endsley 2020.)

Tässä opinnäytetyössä ei käytetä AR-laitteita tai -sovelluksia, joten on mielekkäämpää käyttää yksinomaan virtuaalitodellisuuden käsitettä. Vaikka VR voidaan lukea osaksi XR:ää, sekaannusten välttämiseksi ainoa tietokonegrafiikalla mallinnettua todellisuutta käyttävä käsite on tässä opinnäytetyössä VR.

Toinen virtuaalitodellisuuteen liittyvä termi on immersio, jolla tarkoitetaan käyttäjän kykyä ”uppoutua” (immerse) virtuaaliseen maailmaan. Se tarkoittaa myös virtuaalisen ympäristön kykyä vetää käyttäjää puoleensa, jotta tämä kokee olevansa muualla kuin tietokonegrafiikan tuottamassa tilassa, joka on heijastettu tämän näkökenttään. (Ermi & Mäyrä 2005.)

### 3.2 Virtuaalitodellisuuden historia

Virtuaalitodellisuuden järjestelmiä on ollut olemassa jo vuosikymmeniä, vaikka ensimmäisiä virtuaaliympäristöjä ei toteutettu tietotekniikalla. Esimerkiksi varhaisissa lentosimulaattoreissa käytettiin TV-kameroilla kuvattua videokuvaa. Käyttäjä sai itse vaikuttaa sen ohjaamiseen ja kuvan etenemiseen. (MacIntyre & Feiner 1996 4–5). Morton Heilig kehitti Sensorama-nimisen simulaattorin vuonna 1956. Se oli laite, jolla pyrittiin jäljittelemään moottoripyörällä ajamista. Käyttäjä istuutui, tarttui ohjaimiin ja siirsi päänsä katseluaukkojen eteen. Käyttäjälle näytettiin kolmiulotteista kuvaa liikenteestä, ja samalla laitteen istuin ja ohjaustanko värähtelivät. Tuuli puhalteli käyttäjän kasvoille ja sopivina ajankohtina hän haistoi pakokaasun hajua ja pizzan aromeja. Sensoramaa pidettiin parhaana mahdollisena elokuvakokemuksena. Kokemus oli elokuvallinen, koska laitteen ja käyttäjän välillä ei ollut vuorovaikutusta. (Krueger 1991.) Tässä suhteessa Heiligin keksintö ei täytä virtuaalitodellisuuden määritelmää, sillä se sisältää aina vuorovaikutuksen käyttäjän ja järjestelmän välillä (Milgram 1995).

Heiligin toinen keksintö oli stereoskooppinen kypäränäyttö (immersive stereoscopic head-mounted display). Siinäkin otettiin huomioon käyttäjän näkö-, kuulo- ja hajuaisti (MacIntyre & Feiner 1996, 5). Tietokonegrafiikan kehittäjä Ivan Sutherland esitteli vuonna 1965 idean äärimmäisestä näytöstä (The Ultimate Display), joka toisti keinotekoiset kuvat yhtä todentuntuisina kuin oikeat esineet (MacIntyre & Feiner 1996, 5). Neljä vuotta myöhemmin Sutherland toteutti kypäränäytön, joka tuotti kaksi stereokuvaa kolmiulotteisesta ympäristöstä ja siirsi ne kahteen pienikokoiseen monitoriin, yksi kummallekin silmälle. Monitorit oli kiinnitetty katosta roikkuvaan laitteeseen, johon myös käyttäjä asetti päänsä käyttäessään kypärää. Laite seurasi käyttäjän pään liikettä ja välitti ne tietokoneelle, joka tuotti näkyvän ja siirsi sen kypäränäytön monitoreille. (Krueger 1991.)

Yhdysvalloissa tutkijat kehittivät 1980-luvulla monia virtuaalisiin ympäristöihin liittyviä ideoita. Näihin lukeutuvat muun muassa värejä toistavat stereoskooppiset kypäränäytöt, kolmiulotteinen audio sekä VR-ympäristössä käytettävät datahansikkaat. Näiden innovaatioiden seurauksena myös media kiinnostui, ja VR:ää seurattiin tarkasti myös mediassa. Teknologia oli kömpelöä ja sovellukset vaatimattomia, eikä suuri yleisö ollut päässyt niitä kokeilemaan. Kun median kiinnostus virtuaalitodellisuutta kohtaan väheni, kohu sen ympärillä laantui. (Rosenblum 2000, 38–39)

VR-tekniikan suuri läpimurto kuluttajamarkkinoille tapahtui vuonna 2010, kun Oculus Rift -virtuaalilasien ensimmäinen prototyyppi valmistettiin. Laitteen muutamia vuosia myöhemmin julkaistu kuluttajaversio mahdollisti oikean virtuaalitodellisuuden kokemisen aiempaa tarkemmalla kuvanlaadulla

sekä huomattavasti kattavammalla sovellusmäärällä. Sen jälkeen markkinoille onkin alkanut ilmesty-  
mään VR-laseja useilta eri valmistajilta. Facebook (nyk. Meta) osti Oculuksen liiketoiminnan itselleen  
vuonna 2016, minkä seurauksena sosiaalisen median jättiläisestä on tullut iso toimija myös VR-mark-  
kinoilla. (Hämäläinen 2016.)

Modernit VR-laitteet voidaan karkeasti jakaa kahteen kategoriaan: tietokoneisiin liitettäviin sekä itse-  
näisesti toimiviin, niin sanottuihin stand-alone-laitteisiin. Meta, Valve, HTC ja Varjo valmistavat tieto-  
konekäyttöön soveltuvia VR-laseja, ja näitä käytetään moniin eri käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi suo-  
malaisen Varjon VR-lasit ovat kalliita ammattilaislaitteita, joiden tarkkuus riittää erittäin tarkkaan mal-  
linnukseen. Tietokoneisiin liitettävät VR-lasit ovat suosittuja myös pelikäytössä. Toista kategoriaa  
edustavien stand-alone-laitteiden suosituin tuote on Metan Oculus Quest 2, jota on käytetty myös tässä  
opinnäytetyössä pääasiallisena kehitysalustana. Kyseessä on Android-pohjainen laite, joka ei tarvitse  
toimiakseen liitää tietokoneeseen. (Lipp, Sterna, Dużmańska-Misiarczyk, Strojny, Poeschl-Guent-  
her, Strojny 2021.)

Tällä hetkellä VR-laitteita on käytössä miljoonia, ja niiden ympärille on kasvamassa oma ekosysteemi-  
nsä, joka houkuttelee alalle yhä enemmän toimijoita. Vuoden 2021 aikana ennustetaan myytävän  
noin 6,1 miljoonaa VR-laitetta, mikä kasvattaa laitteiden kokonaismäärän 16,4 miljoonaan. Kokonais-  
määrän ennakoitaan kasvavan vuoteen 2024 mennessä yli 34 miljoonaan (Statista 2021). Kasvanut lai-  
tekanta ja sen myötä alentuneet hinnat ovat laajentaneet VR:n käyttökohteita.

### **3.3 Virtuaalitodellisuuden käyttökohteet**

VR-laitteiden pääasiallisena käyttötarkoituksena pidettiin pitkään viihdettä ja pelaamista, mutta laittei-  
den yleistymisen myötä myös niiden käyttökohteet ovat laajentuneet merkittävästi. VR-laseja käyte-  
tään laajasti nykyisin käytännössä kaikkialla, missä virtuaalitodellisuudesta koetaan olevan hyötyä.

Esimerkiksi eri maiden asevoimat ovat käyttäneet VR-laitteita ja -sovelluksia jo pitkään. Virtuaalito-  
dellisuus mahdollistaa hengenvaarallisten tilanteiden mallintamisen turvallisesti. (Fade 2018.) Sotati-  
lanteiden harjoittelu on myös erittäin kallista ja VR tarjoaa apua myös tähän. Virtuaalitodellisuutta  
hyödynnetään tulevaisuudessa aseiden operoinnissa. Esimerkiksi kauko-ohjattavat lennokit ovat poten-  
tiaalinen käyttökohde. Asevoimat pohtivat myös muiden laitteiden etäohjausta. (Keller 2021.) Myös

Suomessa Puolustusvoimat käyttävät erilaisia digitaalisia ratkaisuja joukkojen kouluttamiseen, esimerkiksi Virtual Battle Space 3 -jalkaväkitaistelusimulaattoria (Pääesikunta 2017), mutta varsinaista VR-koulutusta ei toistaiseksi tarjota, vaikka Puolustusvoimat kutsuukin tehostettua tietokoneharjoittelua virtuaalikoulutusympäristöksi (VKY).

Myös lääketiede hyödyntää virtuaalitodellisuutta (Medium 2018). Erilaisia koulutusympäristöjä on käytössä käytännössä jokaisella sosiaali- ja terveydenhuollon alalla, mutta VR:ää hyödynnetään myös erilaisissa toimenpiteissä, jopa leikkauksissa. VR:ää käytetään myös hoitokeinona, ja erityisesti tästä ovat hyötäneet mielenterveyspotilaat. (Temming 2018.). Myös vuodepotilaiden viihtyvyyttä ja aktiivisuutta on pyritty edistämään VR:n avulla (Barchester 2017). Virtuaalitodellisuutta käytetään myös terapiassa, sitä voidaan käyttää esimerkiksi ahdistushäiriöiden siedätyshoitoon (Takala 2017).

Virtuaalitodellisuus tarjoaa kustannustehokkaita ratkaisuja myös tuotekehitykseen (Evans 2019). Virtuaalitodellisuutta käytetään tuotteiden testauksessa ja jopa kehityksessä. Esimerkiksi autoteollisuudessa VR-teknologialla tutkitaan prototyyppejä, sillä osat on helppo erotella toisistaan, ja koko prototyyppiin voi halutessaan purkaa osiin. Autovalmistaja Renault on laatinut yhteistyössä pelijulkaisija Ubi-soffin kanssa VR-kokemuksia itseohjautuvista autoista (Feltham 2018). Teollisuudessa VR:n yleistymistä on edesauttanut juuri kustannusnäkökulma. Monet vaaralliset ja kalliit työvaiheet on voitu siirtää virtuaalitodellisuuteen, tai niiden varalta voidaan harjoitella edullisesti ja turvallisesti. (Steed 2017.)

Nykyiset VR-lasit ovat käyttäjäkokemukseltaan miellyttäviä, ja niiden hinnat alkavat olla sellaisella tasolla, että tavallinen kuluttaja voi ostaa itselleen lasit pelkästään viihtymistarkoitukseen. Päätelaitteiden edullisemmat hinnat ovat tehneet niistä entistä houkuttelevampia myös hyötykäytössä. Esimerkiksi Oculus Quest 2 -lasit maksavat alle 400 euroa. Suomalaisen Varjon ammattikäyttöön tehdyt XR3-virtuaalilasit maksavat nekin alle 10 000 euroa, ja vastapainoksi saa markkinoiden parhaan ja tarkimman VR-resoluution. (Hämäläinen 2016.) Jos esimerkiksi uuden automallin suunnittelun voisi viedä kokonaan virtuaalitodellisuuteen, poistaisi tämä monta valmistukseen liittyvää työvaihetta ja mahdollistaisi esimerkiksi osien siirtämisen ja muuttamisen reaaliajassa ja ilman, että fyysisille kappaleille tarvitsee tehdä mitään.

Vielä toistaiseksi VR-lasit ovat kookkaita, ja monet niistä tarvitsevat tietokoneen toimiakseen. VR-lasija valmistavan Oculus VR:n tutkimusjohtaja Michael Abrash näkee kuitenkin virtuaalilasien muuttamisen pienemmiksi jo muutamassa vuodessa. Tämä saavutettaisiin muun muassa uusilla linssiteknolo-

gioilla, jotka mahdollistaisivat optiikan pakkaamisen pienempään tilaan näin pienentäen kasvoille puettavan laatikon kokoa. Näillä teknologioilla myös VR-lasien näkökenttää olisi mahdollista laajentaa. Tekoälyn avulla VR-lasit voisivat tarkentaa näkökenttää katseen mukaan. (Fingas 2018.) Tällaista teknologiaa on jo käytössä Varjon XR3-laseissa, jossa silmän tarkalle alueelle on käytössä pienempi ja tarkempi näyttö, joka sijoittuu varsinaisen näytön päälle (Melakari 2020).

Varhaisten VR-lasien tuottamasta liikepahoinvoinnista sen sijaan on nykylaitteilla päästy lähestulkoon kokonaan eroon. VR-laitteiden suurin haaste liittyy liikkumiseen. Monissa peleissä ja sovelluksissa paikasta toiseen siirrytään käyttämällä siirinsädetä (teleport), sillä liikkuminen VR-ympäristössä esimerkiksi suuntaohjaimen avulla tuottaa monille käyttäjille pahoinvointia. (Reiner & Harders 2012) Vapaata liikkumista VR-ympäristössä on pyritty mahdollistamaan erillisten juoksumattojen avulla, joissa käyttäjä on kiinnitetty paikalleen vyötäröstä, ja tämä kävelee liikkeen tunnistavan pinnan päällä. (Wehden, Reer, Janzik, Tang & Quandt, 2021.)

### **3.4 Käytettävät laitteet ja sovellukset**

Tässä opinnäytetyössä tuotetut simulaatiot laadittiin pelimoottori Unitylla. Unityn käyttöön päädyttiin, koska se tarjoaa valmiiksi kattavat työkalut VR-sovelluksien ja -pelien tekemiseen. Ympäristö on tämän lisäksi helppokäyttöinen, ja erilaiset lisäosat mahdollistavat pelimoottorin toiminnallisuuden laajentamisen.

VR-simulaatiot laadittiin Android-käyttöjärjestelmällä toimivalle Oculus Quest 2:lle. Kyseessä on niin sanottu stand-alone-laite, joka ei vaadi toimiakseen tietokonetta. Tämä helpotti simulaatioiden demonstrointia, koska VR-lasit oli helppo ottaa mukaan asiakkaan tiloihin. Oculus Quest 2:ta käytetään erillisillä VR-ohjaimilla, joita on yksi kummallekin kädelle. Ohjaimet rekisteröivät käyttäjän kädenliikkeet VR-tilassa, ja ohjainten painikkeilla ollaan vuorovaikutuksessa simulaatioon. Oculus Quest 2:ta voi käyttää joko paikallaan tai huoneen kokoisessa tilassa. Tällöin käyttäjä voi liikkua VR-ympäristössä kävellen. (Ridley 2021.)

Koska Oculus Quest 2 -lasit toimivat ilman tietokonetta, tämä helpotti varsinaisten demonstraatioiden järjestämistä asiakkaille. Demonstraatiot järjestettiin asiakkaan omissa tiloissa. Lyhyen käyttöopastuksen jälkeen käyttäjien tarvitsi vain pukea lasit ylleen.

## 4 PELIMOOTTORI

Pelimoottorilla tarkoitetaan yleensä ohjelmointirunkoa, jota käytetään pelien kehittämiseen. Pelimoottori on ohjelma, jolla luodaan peliin haluttu sisältö ja säännöt, mutta varsinaisen taustatyön hoitaa pelimoottori. Kyse on alustasta, joka huolehtii renderöinnistä eli kuvan piirtämisestä näytölle, fysiikasta ja erilaisista syötteistä, jotta pelikehittäjät voivat keskittyä varsinaiseen sisällöntuotantoon. Pelimoottoria voi verrata ihmisen tukirankaan ja lihaksistoon, sillä se pitää pelin toimintakuntoisena. Pelimoottori siis sisältää kaiken perustason toiminnallisuuden, jota pelikehittäjät laajentavat ja vievät omiin suunnitsemiinsa. Pelimoottorin ansiosta kehittäjien ei tarvitse tehdä aikaa vieviä alustatöitä aloittaessaan uuden projektin, vaan jo kertaalleen kehitettyä teknistä runkoa on mahdollista käyttää uudelleen. Pelimoottorit sisältävät myös työkalut sovelluspakettien kokoamiseen eri alustoille. Esimerkiksi Unity- ja Unreal-pelimoottoreista samaa lähdekoodia käyttävä sovellus voidaan ajaa niin tietokoneelle, pelikonsolille kuin VR-laitteillekin. (Paul, Goon & Bhattacharya 2012.)

Pelikehityksen alkuvuosina pelimoottori rakennettiin yleensä yksittäisen pelin tarpeisiin. Vuonna 1990 id Software julkaisi Doom-nimisen pelin, joka rakentui uudelleenkäytettävän pelimoottorin ympärille. Doomien julkaisun myötä pelimoottorien edut pelikehityksessä alkoivat näkyä laajemmin, kun kerran rakennettua ohjelmakoodia pystyttiin käyttämään uudelleen laatimalla sille uutta sisältöä. Doom oli pelihahmon näkökulmasta kuvattu toimintapeli, joten id Softwarin pelimoottorin käyttötarkoitukset olivat varsin rajattuja. Ohjelmakoodin avulla pystyi rakentamaan vain vastaavia, pelihahmon silmistä kuvattuja pelejä.

Pelimoottorit kehittyivät 2000-luvulle tultaessa, ja moderneilla pelimoottoreilla on mahdollista rakentaa käytännössä millainen peli tahansa. Nykyisin monet pelikehittäjät käyttävät työssään valmista pelimoottoria. Markkinoiden suosituimmat pelimoottorit ovat Unity ja Unreal. (Wilmore 2007) Markkinoilla olevista peleistä yli puolet on tehty Unitylla. (Unity Technologies 2020) Suosio selittyy Unityn edullisuudella: pelimoottorin perusversio on ilmainen. Perinteisesti kehittäjät ovat lisensoineet pelimoottorin sen valmistajalta, ja lisenssihinnat ovat olleet pienten pelikehittäjien ja harrastajien ulottumattomissa. Sekä Unity että Unreal mahdollistavat pelien julkaisun useille eri alustoille tietokoneista pelikonsoleihin ja älypuhelimisiin. Molemmat pelimoottorit sisältävät myös tarvittavat rajapinnat erilaisen VR-laitteiden käyttämiseksi. (Wilmore 2007.).

Nykyiset pelimoottorit voidaan jakaa kolmeen ryhmään: ylä-, keski- ja alatasen pelimoottoreihin. Alimmalla tasolla moottori rakennetaan suoraan esimerkiksi OpenGL- ja DirectX-rajapintojen päälle. Nämä pelimoottorit edellyttävät osaamista ohjelmoinnista, mutta niillä voidaan tehdä erittäin monipuolisia ja suorituskykyisiä pelejä. CryEngine on esimerkki tällaisesta pelimoottorista. Keskitason pelimoottoreissa suurin osa ominaisuuksista on valmiina, mutta laitetason ohjelmointiin voi joutua turvautumaan, jotta pelin saa toimimaan haluamallaan tavalla. Keskiluokan pelimoottoreita ovat esimerkiksi Unreal Engine ja Unity. Ylimmän tason pelimoottorit on rakennettu käyttäjäystävällisiksi ja aloittelijoiden tarpeisiin, joten niissä on yleensä paljon ominaisuuksia valmiina. Ohjelmointia tarvitaan vain vähän. Ylimmän tason moottorit ovat usein erikoistuneet jonkin tietyn peligenren tarpeisiin tai sisältävät rajoitteita, jotka pakottavat tekemään asioita tietyllä tavalla. Esimerkkejä näistä pelimoottoreista ovat RGP Maker ja GameMaker. (Ward 2008.)

Simulaatioissa kehitysalustana käytetty Unity on skriptipohjainen pelimoottori, johon on mahdollista rakentaa toiminnallisuuksia C#-ohjelmointikielellä. Yllä mainitun luokittelun perusteella Unity on keskitason pelimoottori, eli käyttäminen edellyttää perustietoja ohjelmoinnista, mutta sisältöä voi tuottaa myös ilman ohjelmointitaitoja. Tässä opinnäytetyössä esitellyt simulaatiot on rakennettu Unitylla. Koska pelimoottoria käytetään erittäin laajasti, sille on olemassa todella aktiivinen yhteisö, ja suurimpaan osaan eteen tulevista ongelmista löytyy ratkaisu Unityn foorumilta. Pelimoottori on myös laajennettavissa käytännössä jokaisen peligenren ja -tyypin tarpeisiin. Lisäksi Unityyn on olemassa todella kattava valikoima erilaisia lisäosia, jotka mahdollistavat toiminnallisuuden lisäämisen pelimoottoriin ilman ohjelmointia. Näitä lisäosia tarjotaan käyttäjille joko ilmaiseksi tai maksua vastaan Unityn omassa Asset Store -verkkokaupassa. Lisäosista käytetään nimitystä *asset*, ja nämä lisäosat asentuvat omina paketteinaan osaksi Unitya. (Haas 2014.)

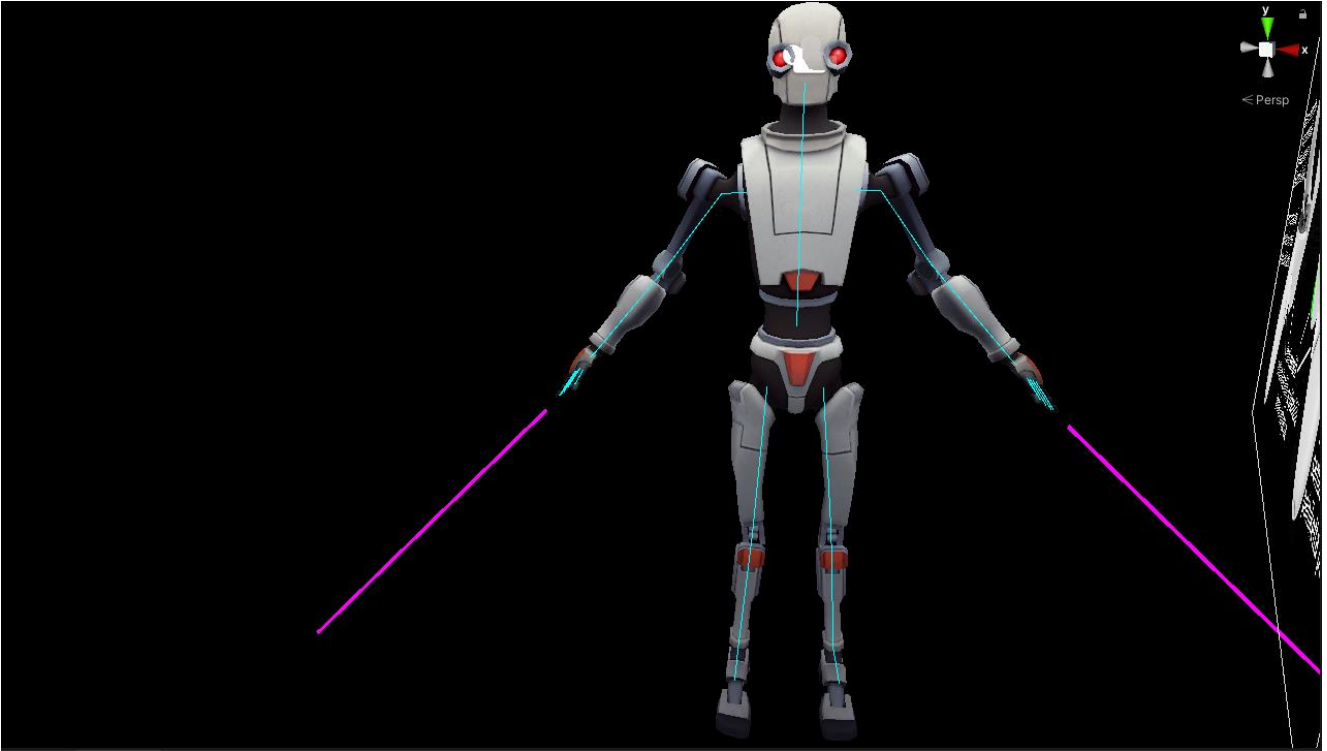
Molemmissa simulaatioissa runkona on käytetty Unityn sisäänrakennettua XR Management -lisäosaa, joka mahdollistaa pelimoottorin käytön virtuaalidellisuuden sovelluksissa. XR Plugin Management lisää pelimoottoriin perustason VR-toiminnallisuuden, ja työkalun avulla Unityyn voi asentaa alusta-kohtaiset sovelluspaketit. Opinnäytetyön simulaatiot laadittiin Oculus Quest 2 -virtuaalilaseille, joten XR Plugin Management -paketista asennettiin Android-alustalle Oculuksen sovelluspaketti. Molemmissa projekteissa on käytetty Asset Storesta ladattuja tekstuuri- ja materiaalipaketteja sekä muutamia 3D-malleja ympäristön uskottavuuden lisäämiseksi. Nämä paketit eivät kuitenkaan vaikuta simulaatioiden toiminnallisuuteen, joten niitä ei ole syytä käydä tämän tarkemmin läpi.



### 4.1.1 Humanoid Control VR

Simulaatioiden vuorovaikutuksen pohjan muodostaa Humanoid Control VR -lisäosa (Passer VR 2021). Kyseinen lisäosa mahdollistaa suoraan ihmishahmon käyttämisen virtuaalitodellisuudessa. Vastaava toiminnallisuus on mahdollista rakentaa Unityyn sen omilla työkaluilla, mutta Humanoid Control VR helpottaa tätä työtä huomattavasti. Lisäosan käyttö edellyttää ainoastaan humanoidiksi Unityn tuontiasetuksissa määriteltyä 3D-mallia, johon lisätään Humanoid Control -skripti. Tämän jälkeen VR-ympäristö on käyttövalmis, ja pelimoottorista voidaan ajaa suoritettava sovellus VR-laseille. Humanoid Control VR pitää sisällään myös valmiin verkkopelin toteutuksen, eli lisäosan avulla on mahdollista rakentaa VR-ympäristöjä useiden pelaajien koettavaksi yhtä aikaa. Tätä toiminnallisuutta käytettiin Ritarinkannuksen VR-simulaatiossa.

Molemmissa simulaatioissa pelaajahahmona käytettiin Asset Storesta ilmaiseksi saatavaa Space Robot Kyle -hahmoa (KUVA 1). Kyseessä on humanoidiksi määritelty 3D-malli, joka on rigattu valmiiksi. Rigillä tarkoitetaan hahmon niveliä ja luustoa. Riggauksella tarkoitetaan luiden lisäämistä hahmomallin sisälle, ja niiden liittämistä ympäröivään hahmoon siten, että kun luu liikkuu, hahmon raajat seuraavat sen liikettä luonnollisesti. Vaikka riggaukselle ei ole olemassa tyhjentävää suomenkielistä vastinparia, kääntyy se löyhästi *viritykseksi* tai *köysitykseksi*. hahmolle rakennetaan nivelistä koostuva ranka, ja se muodostaa pohjan sille, miten hahmoa liikutellaan. Rigi toimii hahmon sisällä kuin luuranko ja lihaksisto, hieman samaan tapaan kuin marionetin langat. Humanoidihahmon rigi rakentuu vektoreiden muodostamien luiden ympärille, jotka vastaavat tietyn raajan osan liikuttamisesta. (Pluralsight 2014.) Humanoid Control VR:n ohjauskomponentti liittää Unityn VR-toiminnallisuuden näihin luihin: ohjaimet liikuttavat käsiä, lasit päätä. Pelihahmon liikkuminen on toteutettu proseduraalisen animoinnin avulla: kun käyttäjä liikkuu, hahmo liikkuu mukana jalkojen seuratussa perässä.



KUVA 1. Humanoid Controller -komponentilla varustettu robottihahmo toimii pelaajan avatar-hahmona VR-simulaatioissa.

Ohjausskripti pitää sisällään valmiin toiminnallisuuden ympäristöön vuorovaikuttamiseksi. Pelaaja voi poimia pelimaailmassa olevia fyysisiä kappaleita tarttumalla niihin. Kun hahmo on tarpeeksi lähellä esimerkiksi kuppia, sitä voi osoittaa peliohjaimella, ja siihen tartutaan pitämällä keskisormen alla olevaa painiketta pohjassa. Kappale tiputetaan irrottamalla ote painikkeesta. Poimittavat kappaleet on varustettu rigidbody-nimisellä komponentilla sekä törmäyttimellä (collider), jotka antavat niille fysikaaliset ominaisuudet kuten esimerkiksi painon ja reagoinnin painovoimaan. Pelaaja voi poimia vain kappaleita, joissa on nämä komponentit.

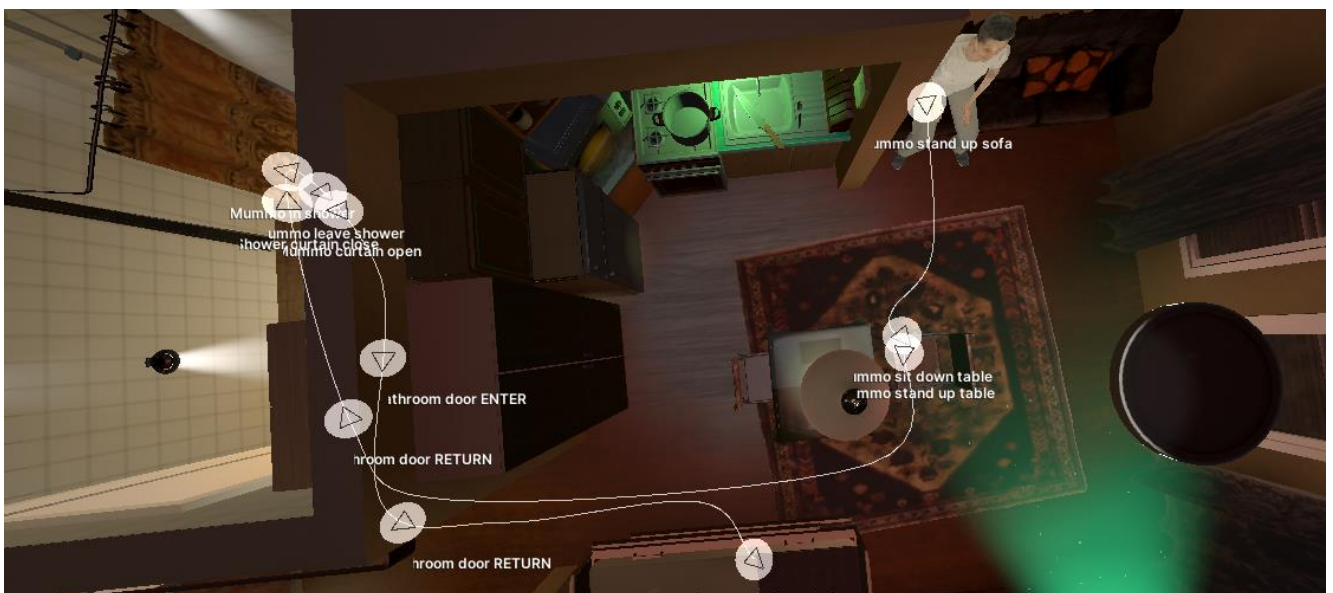
Muiden pelimaailman kappaleiden kanssa toimitaan niin sanotulla interaktiosäteellä. Pelihahmon oikeasta kädestä lähtee ohjaimen B-painiketta painamalla säde, jolla osoittamalla ja liipasinpainiketta painamalla voi olla vuorovaikutuksessa pelimaailman esineisiin. Ritarinkannuksen palveluasumisyksikössä interaktiosädettä käytetään muun muassa kaappien avaamiseen ja sulkemiseen. Ferromekin simulaatiossa lavojen tyhjentämiseen. Interaktiosäde toimii ikään kuin hiiren kursori.

Virtuaalisessa tilassa liikutaan kävelemällä. Pitkien matkojen taittaminen on kuitenkin vaikeaa, vaikka laitteet mahdollistavatkin toimimisen suhteellisen laajassa tilassa. Molemmissa simulaatioissa pitkän

matkan liikkuminen on toteutettu Humanoid Control VR:n perustoiminnallisuuteen kuuluvan teleportaation avulla. Pelihahmon vasemmassa kädessä on interaktiosädettä muistuttava toiminnallisuus. Kun ohjaimen X-painiketta painetaan, kädestä piirtyy säde. Kun säteellä osoitetaan haluttuun paikkaan ympäristössä ja nostetaan sormi painikkeelta, hahmo siirtyy osoitettuun paikkaan välittömästi. Tämä mahdollistaa isojen tilojen mallintamisen ja kokemisen, vaikka pelialue olisi todellisuudessa hyvin ahdas.

#### 4.1.2 Dreamteck Splines

Pelihahmojen tai kolmiulotteisten kappaleiden liikuttamiseen Unityssa on monta erilaista tapaa. Ferromekin ja Ritarinkannuksen simulaatioissa ei-pelaajahahmon liikkuminen oli tarkoin kontrolloitua, joten tässä kontekstissa liikkumisen toteuttaminen oli järkevintä tehdä hyvin rajattuna. Tähän käytettiin Dreamteck Splines -lisäosaa, jossa kappaleita on mahdollista liikuttaa maastoon piirrettyjen käyrien avulla (KUVA 2). (Dreamteck 2021.) Ferromekin simulaatiossa MIR-robotti kulkee tällaisella käyrällä, kun taas Ritarinkannuksen simulaatiossa palveluasumisyksikön asukas liikkuu paikasta toiseen vastaavan käyrän avulla.



KUVA 2. Palveluasumisyksikön asukkaan liikkumisreitti

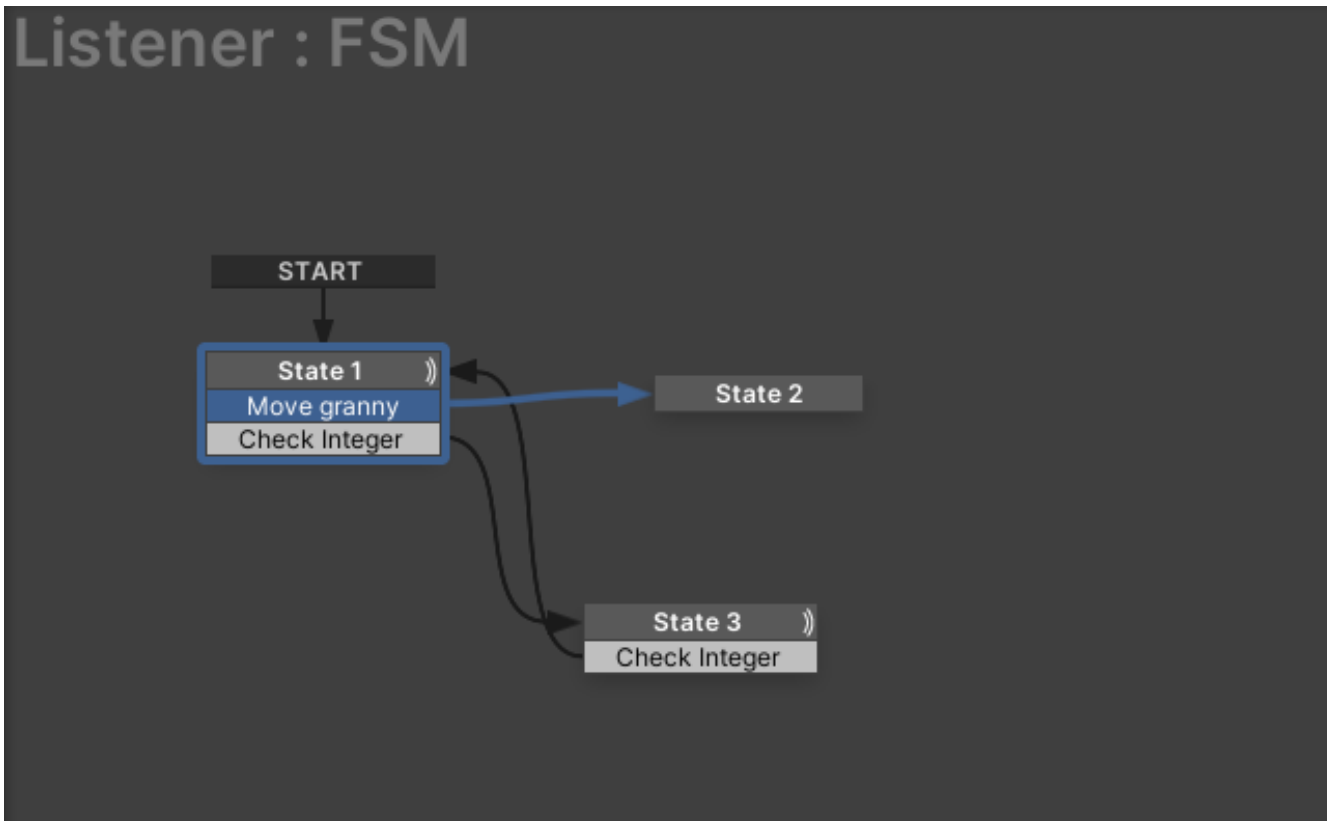
Käyrät rakentuvat maastoon piirrettävien pisteiden, noodien, varaan. Käyrä kulkee noodista toiseen, jolloin sille voidaan rakentaa muoto. Käyrille on mahdollista lisätä trigger-elementtejä, joita voidaan käyttää laukaisemaan erilaisia tapahtumia. Ferromekin simulaatiossa jokaisen lavapaikan lopussa on

trigger, joka ohjeistaa robottia purkamaan lastin ja palaamaan takaisin lähtöpisteeseen ilman kuormaa. Palatessaan trigger liittyy tyhjän lavan robotin kyytiin, minkä jälkeen se poistuu varastosta. Ritarinkannuksessa käyrän triggereitä käytetään asukkaan animaatioiden kontrollointiin. Triggerit siirtävät hahmon seisonnasta kävelytilaan, ja oikealla kohdalla laittavat tämän esimerkiksi istumaan tuoliin, jolloin ajetaan istumisanimaatio. Käyrän ansioista hahmo on mahdollista liikuttaa oikeaan kohtaan, jolloin esimerkiksi istumis- ja nousemisanimaatiot voidaan ajaa niin, ettei hahmo istu tyhjän päälle tai esimerkiksi liian syväälle tuoliin. Käyrien avulla kappaleiden liikuttamista peliympäristössä on mahdollista kontrolloida hyvin tarkkaan.

### 4.1.3 Playmaker

Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön toiminnallisuus on rakennettu tilakoneiden avulla toimivan Playmakerin avulla (Hutong Games 2021). Kyseessä on erittäin suosittu Unityn lisäosa, joka mahdollistaa toiminnallisuuden rakentamisen visuaalisten tilakoneiden avulla sen sijaan, että toiminnallisuus kirjoitettaisiin ohjelmakoodina (KUVA 3). Playmakerin toiminnallisuus koostuu näiden tilakoneiden linkittämisestä toisiinsa. Playmakerin avulla on mahdollista saavuttaa hyvin laaja toiminnallisuus ilman, että ohjelmakoodia ei tarvitse kirjoittaa riviäkään. Playmaker on visuaalinen työkalu, joka käytännössä korvaa Unityn sisäänrakennetun C#-skriptauksen.

Playmakerin edustaman korkean tason skriptikielten avulla simulaatioiden ominaisuuksien toteuttaminen nopeutuu ja yksinkertaistuu, koska kielen rajapinta on rajoitetumpi ja erikoistuneempi kuin matalan tason ohjelmointikielten, tässä tapauksessa C#:n. Skriptikieli käyttää modulaarisia ja uudelleenkäytettäviä komponentteja, jotka matalamman tason kieli tarjoaa sille, ja voi tällä tavalla pitää syntaksinsa kompaktina ja tehokkaana. Tämä helpottaa ohjelmoijan ja suunnittelijan työtä monella tavalla, kun myös työn uudelleenkäytettävyys ja muokattavuus paranee. Visuaalisessa skriptauksessa komponentit esitetään graafisina elementteinä, jotka havainnollistavat järjestelmän rakennetta. Komponentteja kuvaavat elementit voivat näyttää vain kontekstissaan olennaisen sisällön, ja kontekstin määrittelyä näkymää voi vaihtaa helposti. (Kappel ym. 1989, 123–124, 130–131.) Käyttäjä voi näin keskittyä skriptin loogiseen rakenteeseen.



KUVA 3. Esimerkki Playmakerilla laaditusta tilakoneesta

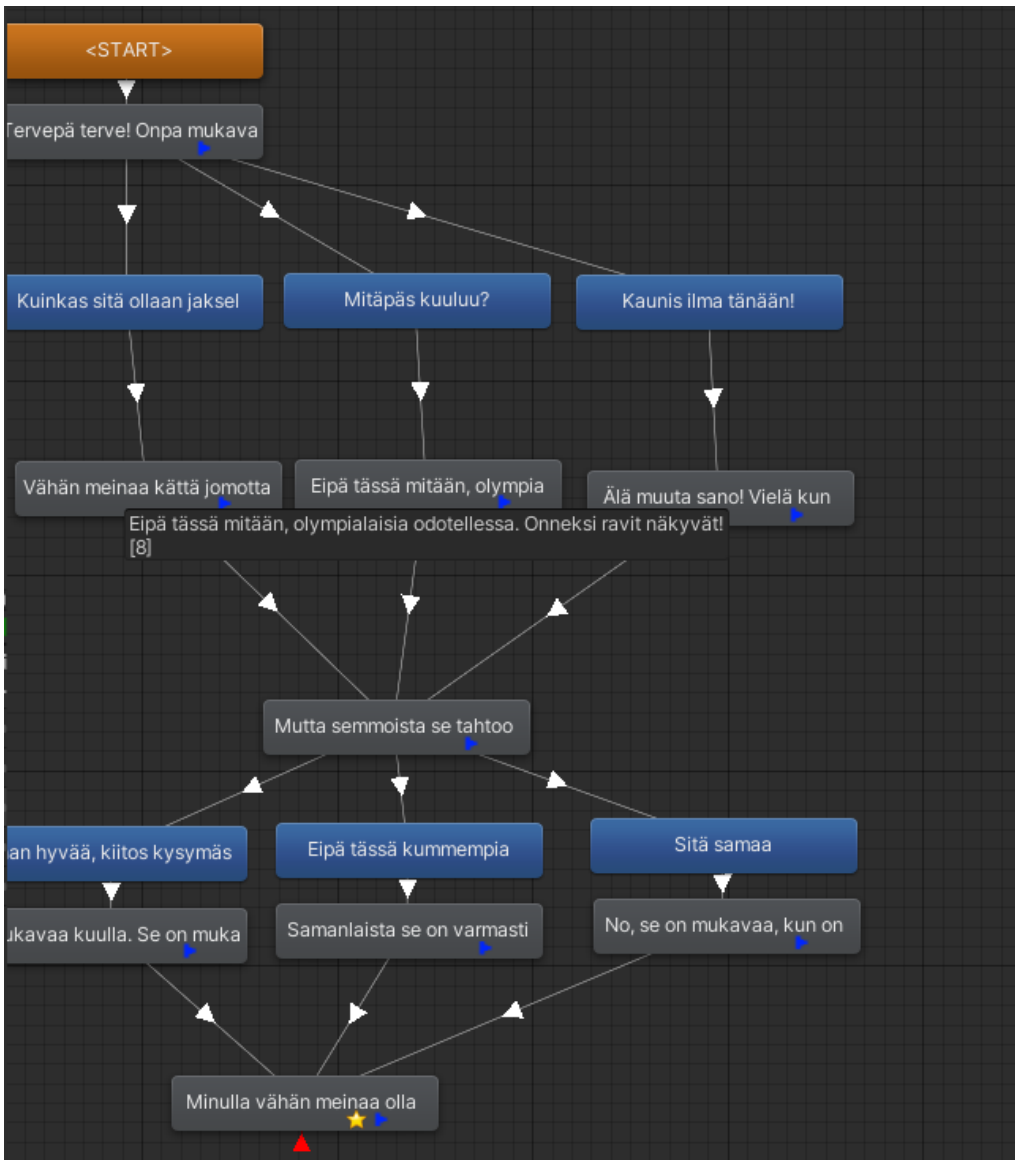
Ritarinkannuksen simulaatiossa tilakoneiden avulla mallinnettiin osa asukkaan toiminnallisuudesta. Eräs pelaajan tehtävä on kattaa pöytä ja valmistaa asukkaalle ruokaa. Taustalla tilakone tarkkailee toiminnan etenemistä. Pelaajalla on neljä tehtävää: lautasen, lusikan ja kupin asettaminen pöydälle sekä ruoan laittaminen kiehumaan. Näiden toimien etenemistä seurataan yhden kokonaislukumuuttujan avulla. Sen arvo kasvaa aina, kun tehtävän saa suoritetuksi. Tätä arvoa verrataan sekunnin välein toiseen kokonaislukuun, jonka arvo on neljä, eli suoritettujen tehtävien määrä. Kun kahden kokonaislukumuuttujan arvo on sama, tilakone ajaa toimintalistan, jonka seurauksena asukas nousee sohvalta, kävelee pöydän ääreen ja istuu alas.

#### 4.1.4 Dialogue System

Ritarinkannuksen simulaatiossa mallinnettiin myös vuoropuhelua asukkaan kanssa. Dialogi rakennettiin Unityn Dialogue System -lisäosan avulla (Pixel Crushers 2021). Dialogue System mahdollistaa

haarautuvan ja pelaajan valinnoista riippuvan vuoropuhelun rakentamisen hyvin yksinkertaisella tavalla. Vuoropuhelu käsikirjoitetaan visuaalista editoria käyttäen (KUVA 4), jonka jälkeen keskustelua käyvät pelihahmot määrittävät vuoropuhelun osapuoliksi. Dialogue System sisältää myös tarvittavat käyttöliittymäkomponentit, joten valintoihin perustuvan dialogin lisääminen simulaatioon on helppoa. Tämä luo myös syvyyttä kokemukseen, koska virtuaalisen asukkaan kanssa voi vaihtaa kuulumisia, ja omat valinnat vaikuttavat vuoropuhelun etenemiseen.

Dialogue System ei ole suoraan yhteensopiva virtuaalitodellisuuden kanssa. Koska perinteisesti käyttöliittymäelementit piirretään ruudulla (screen space), VR-näkymän vuoksi ne on siirrettävä osaksi pelimaailmaa (world space). Tämän vuoksi esimerkiksi painikkeiden käyttäminen ei onnistu ilman muokkausta. Humanoid Control VR kuitenkin sisältää hiiriohjauksen emuloinnin. Kun painikkeisiin lisätään törmäyttimet, niitä voi käyttää vuorovaikutussäteen avulla. Näin simulaatioon saatiin lisättyä pelimäistä toiminnallisuutta.



KUVA 4. Asukkaan kanssa käytävä vuoropuhelu Dialogue Systemin editorinäkömästä.

## 5 3D-MALLIN LUOMINEN, OPTIMOINTI JA VIEN TI PELIMOOTTORIIN

Tässä luvussa käydään läpi 3D-mallin luominen fotogrammetriasovelluksella, sen optimointi pelimootoria varten sekä vieminen Unity-pelimoottorille. Luvussa käydään läpi myös toimenpiteet Unityssa ennen varsinaisten simulaatioiden rakentamista. Tässä luvussa käydään läpi lyhyesti myös 3D-mallinnuksen perusteet fotogrammetrian näkökulmasta.

Fotogrammetriamallinnusta hyödynnettiin sekä RoboTry- että HIPPA-Remote-hankkeissa VR-ympäristöjen rakentamiseen. Tämän opinnäytetyön aineisto koostuu kahdesta 3D-mallista: Ab Ferromek Oy:n varasto sekä Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön asunto. Molemmat mallit rakennettiin samalla tavalla, joskin fotogrammetriasovelluksen syöte luotiin eri tavoin. Ab Ferromek Oy:n tila mallinnettiin ensin, joten onnistuneen tuloksen varmistamiseksi aineisto kerättiin kuvaamalla tila useaan kertaan. Noin sadan neliömetrin kokoinen halli kuvattiin Samsung Galaxy A51 -älypuhelimella (267 kuvaa), GoPro-kameralla (152 kuvaa) sekä GoPro 360 asteen kuvaamiseen mahdollistavalla kameralla (neljä kuvaa). Tämän lisäksi halli videoitiin samalla 360-kameralla. Jokaisella kameralla kerätty aineisto syötettiin 3DF Zephyr -fotogrammetriasovellukseen omiksi kokonaisuuksikseen. Parhaan lopputuloksen tuotti Samsungin älypuhelimella kerätty kuva-aineisto, joten pelkästään tätä lähestymistapaa sovellettiin Ritarinkannuksessa.

### 5.1 3D-mallinnuksen perusteet

Kolmiulotteinen malli rakentuu särmsät, vertekseistä ja tahkoista (Chopine 2011, 22). Verteksillä tarkoitetaan yksittäistä pistettä kolmiulotteisen XYZ-koordinaatiston muodostamassa avaruudessa. Kahden verteksin välillä kulkeva viiva on särmsä. (Totten 2012, 9.) Tahko muodostuu vähintään kolmesta verteksistä, joten verteksit ovat tahkon kulmapisteet. Tahkot tunnetaan myös polygoneina. Kolmekylkiset tahkot ovat tietokoneelle yksinkertaisimpia laskettavaksi, mutta käsittelyn kannalta nelisivuiset tahkot ovat helpompia (Chopine 2011, 22). Verkkomaista rakennetta, joka syntyy toisiinsa yhdistyvistä tahkoista, kutsutaan tahkoverkoksi eli meshiksi (Totten 2012, 10).

Topologialla tarkoitetaan tahkojen asettelua ja järjestelyä kolmiulotteisen mallin pinnalla. Mallin käsittelyä ja ymmärtämistä helpottaa siisti topologia, ja nelisivuiset tahkot tekevät mallista helpommin luetavan. Jotta voidaan tuottaa hyviä ja toimivia 3D-malleja, on tärkeää ymmärtää topologian rooli ja



merkitys osana mallinnusprosessia. (Chopine 2011, 58.) Teksturointiprosessi eli mallin pinnoittaminen on helpompaa sellaisella mallilla, jonka topologia on kunnossa (Guilherme 2015).

3D-mallin resoluutio eli tarkkuus riippuu tahkojen (polygonien) määrästä. Malliin saa lisää yksityiskohtia lisäämällä polygoneja, mutta tämä puolestaan vaatii enemmän laskentatehoa (Chopine 2011, 33). Fotogrammetriaprosessin avulla luodussa 3D-mallissa polygonimäärä voi olla useita miljoonia, minkä vuoksi malli on erittäin raskas laskettavaksi tietokoneelle (Bishop ym. 2017). Polygonimäärällä on siis suuri vaikutus reaaliaikaisen 3D-grafiikan suorituskykyyn. Tämä entisestään korostuu virtuaalitodellisuudessa, jossa laskennan haasteena on ympäristön tarkkuuden ohella molemmille silmille erikseen tehtävä renderöinti. Tämän vuoksi ympäristöä ja sen kaikkia malleja täytyy optimoida. Yleensä tämä tapahtuu vähentämällä mallin polygoneja. Polygonimäärän vähentäminen ei välttämättä tarkoita, että mallin yksityiskohtaisuus vähenee tunnistamattomaksi, vaan tavoitteena on tehdä mallista tehokkaampi samalla säilyttäen mahdollisimman paljon yksityiskohtia. (Totten 2012, 13–14.) Hyvässä mallissa topologia on siistiä ja polygonit on kohdistettu sellaisille alueille, joissa on mallin tulkinnan kannalta enemmän tärkeitä yksityiskohtia. Polygoneja on paljon helpompaa lisätä kuin poistaa. (Chopine 2011, 34.)

Geometrialtaan yksinkertaisiin 3D-malleihin saadaan yksityiskohtia ja aitoutta teksturoinnin avulla. Tekstuurilla tarkoitetaan kuvaa, jolla pinnoitetaan 3D-malli tuottaen samalla väritys tai materiaalisia ominaisuuksia. Erilaisia tekstuurikarttoja on useita erilaisia. Niiden ansiosta 3D-mallille voidaan määrittellä väri, kiiltävyys, pinnan yksityiskohdat sekä vaihtelevat epätasaisuus. (Totten 2012, 17–20, 88.) Kolmiulotteisten mallien aitous syntyy materiaalien avulla. Kyseessä on sarja ohjeita, joiden perusteella 3D-malli saadaan simuloimaan oikean maailman materiaaleja. Kolmiulotteisen mallin materiaali koostuu shader-ohjelmasta ja tekstuurikartoista. Materiaalille kerrotaan shader-ohjelman ja tekstuurikarttojen välityksellä, miten se käyttäytyy virtuaalisessa valaistuksessa.

Tekstuuri saadaan näkymään mallin pinnalla oikein UV-kartoituksen avulla (Totten 2012, 11, 88). Kun mallinnusohjelma suorittaa UV-kartoituksen, prosessissa määritellään kolmiulotteisen mallin verteksien koordinaatit kaksiulotteiseen tasoon. Kolmiulotteinen kappale siis levitetään kaksiulotteiseksi tasoksi, jonka päälle heijastetaan kuva, joka puolestaan näkyy mallin pinnalla. Kun 3D-malli levitetään tasolle, sen pintaan syntyy saumoja. Näitä leikattuja alueita kutsutaan UV-saarekkeiksi, ja niistä tulisi tehdä mahdollisimman suuriksi, jotta vääristymät saadaan minimoitua. Kun tekstuuuri vääristyy, se näyttää mallin pinnalla vääntyneenä ja venyneenä. (Chopine 2011, 153, 155.)

## 5.2 Kuvaaminen

Mallinnettavaksi valitut kohteet kuvattiin joulukuussa ja tammikuussa. Ab Ferromek Oy:n varasto kuvattiin 2. joulukuuta. Kohteiden kuvausmenetelmät eroavat toisistaan, sillä Ab Ferromek Oy:n tilojen kuvaaminen oli ensimmäinen yritys mallintaa noin sadan neliömetrin tila fotogrammetrian avulla. Tämän vuoksi aineisto eli dataset kerättiin usealla eri kuvausvälineellä. Ab Ferromek Oy:n kuvaamisesta kertyneen kokemuksen ansiosta Ritarinkannuksen tilan kuvaamiseen riitti yksi väline, mikä nopeutti työtä huomattavasti.

Yleisellä tasolla kuvauksen onnistumiseen vaikuttaa muutama asia. Valaistuksen on oltava tasainen, mikä toteutui asunnossa ja varastohallissa itsestään, kiitos tehokkaan valaistuksen. Tilojen kuvaamisessa on erittäin tärkeää pitää riittävä etäisyys seinäpintoihin. Pinnat tulisi kuvata vastakkaiselta reunalta, jotta fotogrammetriasovelluksella on riittävästi tietoa etäisyyksistä. Suorien pintojen laskeminen on fotogrammetriasovellukselle vaikeaa. Näiden kahden kohteen kuvauksen perusteella tilojen mallinnuksessa on järkevää kuvata mallinnukseen vaikuttavat asiat ja tehdä seinäpinnat esimerkiksi pelimoottorin omilla työkaluilla polygonimäärän karsimiseksi.

Varsinaiseen fotogrammetriamallin rakentamiseen käytettiin 3DF Zephyr -sovellusta. Sovelluksen etuna on käytön yksinkertaisuus: valokuvat riittävät syötteenä, ja mallinnuksen jälkeen käytössä on kattavat työkalut tahkoverkon eli meshin optimointiin muun muassa polygoneja karsimalla. Sovellus osaa itse määrittellä kamera-asetukset kuvien metatietojen perusteella, ja koko fotogrammetriaprosessi on mahdollista automatisoida niin, että sovellus hoitaa kaiken tarvittavan laskennan tiheästä pisteverkosta teksturoituun 3D-malliin yhdellä kertaa. Sovelluksen käyttäminen ei edellytä kuvien säätämistä tai muokkaamista ennakoon kuvankäsittelysovelluksessa, esimerkiksi Photoshopissa, vaan kuvatut kuvat voidaan viedä suoraan sovellukseen.

Valmiin mallin voi viedä haluamaansa tiedostomuotoon. Koska simulaation laatimiseen käytettiin Unitya, vietiin 3D-malli Zephyristä Autodesk Filmbox -formaattiin eli fbx:ään, sillä se takaa parhaan mahdollisen yhteensopivuuden.

### 5.2.1 Ab Ferromek Oy

Ab Ferromek Oy:n varastohalli on noin sadan neliömetrin kokoinen. Se koostuu pääasiassa euro-lavoilla täytetyistä varastohyllyistä sekä metallin työstämiseen tarkoitetuista laitteista. Fotogrammetriamallia varten koko varasto kuvattiin, jotta sinne oli mahdollista rakentaa simulaatio kuljetusrobotista. Koska kyseessä oli ensimmäinen fotogrammetrialla mallinnettava tila, aineisto kerättiin neljällä eri tavalla (TAULUKKO 1) eri tiedonkeruumenetelmien testaamiseksi sekä sen varmistamiseksi, että ainakin yksi dataset olisi toimiva. Neljännen datasetin muodostaa 360 asteen video, joka kuvattiin GoPro Insta360:lla.

<b>Laite</b>	<b>Resoluutio (kuvapistettä)</b>	<b>Kuvien määrä</b>
Samsung Galaxy A51	2250x4000	267
GoPro Insta360 (kuvat)	5312x3552	152
GoPro Insta360 (360-kuva)	5120x1400	4

TAULUKKO 1. Tilojen kuvaamiseen käytetyt laitteet sekä otettujen kuvien määrä.

Varasto kierrettiin systemaattisesti ympäri kuvaten pinnat siten, että jokaisessa kuvassa olisi ohjeistuksen vaatima, noin 60 prosentin limitys toistensa kanssa. Kuvauksessa keskityttiin seiniin. Katon ja lattian mallintaminen jälkikäteen Unityssa on suorituskyvyn kannalta järkevämpää, sillä suorien, yksiväristen pintojen kuvaaminen monimutkaistaa 3D-mallin geometriaa turhaan. Älypuhelimella tilat kuvattiin pystykuvina (KUVA 5), kun taas GoProlla kuvat otettiin vaakatasossa (KUVA 6). Kuvien asento sekä limityksen vaatima päällekkäisyys selittävät eron kuvien määrässä. Älypuhelimella kerätty dataset on noin kaksinkertainen verrattuna GoPron vastaavaan. Koska kuvattava tila oli iso, jokaisen alueen riittävän tarkka kuvaaminen osoittautui vaikeaksi, koska kirjanpito kuvatuista alueista ja tarvittavasta limityksestä oli hoidettava käsin.



KUVA 5. Esimerkkejä Samsung Galaxy A51:llä kerätystä datasetistä Ab Ferrmek Oy:n varastotilasta.



KUVA 6. Esimerkki GoPro Insta360 -kameralla kerätystä aineistosta

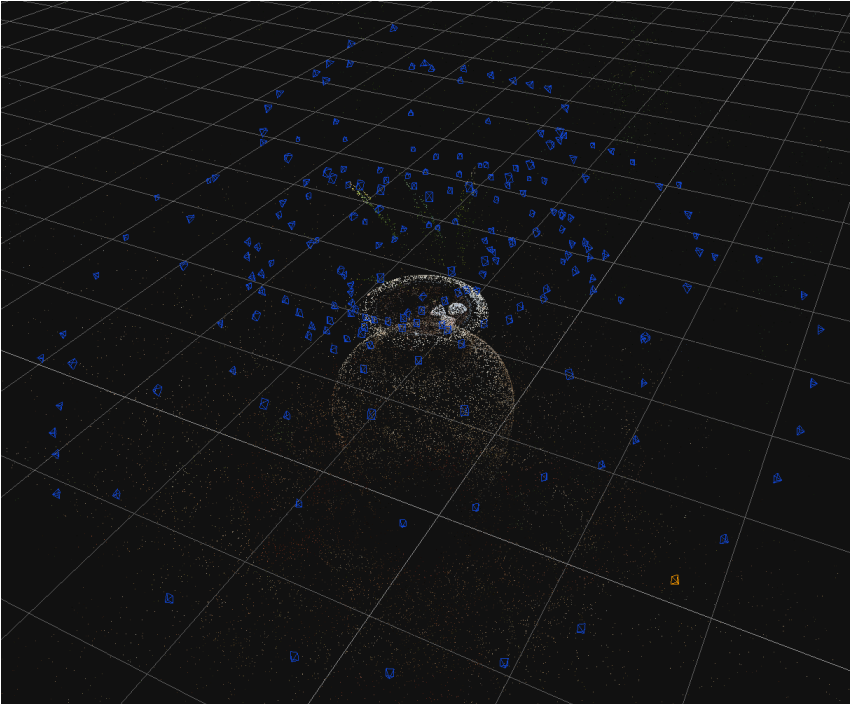
### 5.2.2 Ritarinkannus

Toinen kuvattu ympäristö oli Kannuksessa sijaitsevan Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön asunto, jota käytetään HIPPA-Remote-hankkeessa mallintamaan erilaisia haasteita, joita hankkeen kohderyhmien (ikäihmiset, kehitysvammaiset ja mielenterveyskuntoutujat) saattavat arjessaan kohdata. Simulaation rakentamista varten kuvattiin noin 60 neliömetrin asunto, joka koostuu tupakeittiöstä ja kylpyhuoneesta. Kyse on merkittävästi Ferromekin varastohallia pienemmästä ja arkkitehtuuriltaan monimutkaisemmasta kohteesta, mikä asetti omat haasteensa kuvaamiselle. Kohteen valaistus oli myös huomattavasti Ferromekia himmeämpi, mikä tuotti omat ongelmansa kuvaukseen.

### 5.3 Mallin rakentaminen

Kuvaamisen jälkeen kerätty aineisto siirrettiin tietokoneelle ja syötettiin 3DF Zephyrille käsiteltäväksi. Ab Ferromek Oy:n mallinnuksessa jokaisesta kerätystä datasetistä tehtiin 3D-malli, kun taas Ritarinkannuksen mallissa käytettiin aineistona ainoastaan älypuhelimella otettuja kuvia.

Mallin rakentaminen on pitkälti automatisoitua. Kun kuvat on syötetty, 3DF Zephyr siirtää ne oikeille paikoilleen luoden näin tilasta ensimmäisen version. Tämän jälkeen ohjelma laskee tiheän pistepilven (dense point cloud), joka on joukko pisteitä kolmiulotteisessa avaruudessa (Lin, Kong & Lucey 2018). Nämä pisteet on laskettu kuvien perusteella, ja niiden koordinaatit on määritelty kuvissa olevasta tilasta tai esineistä (KUVA 7).



KUVA 7. Tiheä pisteverkko ruukusta. Siniset kuvakkeet edustavat kameroita, jotka kertovat paikan, mistä mallinnuksessa käytetyt kuvat on otettu.

Tiheästä pistepilvestä rakennetaan seuraavaksi tahkoverkko eli mesh. 3DF Zephyr käyttää pisteitä pohjana geometrialle yhdistäen ne toisiinsa, jolloin ne muuttuvat polygoneiksi. Tämä muodostaa pelimoottorille syötettävän 3D-mallin pohjan, sillä nyt kuvista laadittu malli on sellaisessa muodossa, että pelimoottori osaa tulkita sen. Kolmas vaihe on teksturointi. 3DF Zephyr rakentaa 3D-mallin pinnalle tekstuurit kuvatun aineiston perusteella. Koska tekstuurien tarkkuuden voi määrittellä Unityssa erikseen, mallin luomisen yhteydessä ne määritettiin suurimpaan mahdolliseen tarkkuuteen eli 8K:ksi (7680x4320 kuvapistettä).

Niin Ab Ferron Oy:n kuin Ritarinkannuksenkin 3D-mallit olivat laskennan jälkeen aivan liian raskaita pelimoottorikäyttöön, etenkin virtuaalitodellisuudessa. Molemmat koostuivat noin 20 miljoonasta verteksistä: Ab Ferron Oy 22 miljoonaa (KUVA 8), Ritarinkannus 21 miljoonaa. Koska VR-simulaatiot oli tarkoitus tehdä Oculus Quest 2 -VR-laseille, verteksien määrä oli saatava alle miljoonaan. Metan omien spesifikaatioiden perusteella Oculus Quest 2 pystyy käsitellä noin miljoona verteksiä kerrallaan (Oculus 2021), mutta koko määrä ei voi käyttää pelkästään ympäristöihin, sillä simulaatioiden toteutus vaatii muiden 3D-kappaleiden lisäämistä ympäristöön sekä niiden liikuttamista, mikä myös vaatii suorituskykyä.



KUVA 8. Ab Ferromek Oy:n optimoimaton fotogrammetriamalli. Verteksejä on noin 20 miljoonaa. Malli on todella tarkka, mutta se ei sovellu tällaisenaan pelimoottorin käyttöön.

Verteksien määrää vähennettiin ensin siivoamalla malleista pois katot ja lattiat, jotka kuvauksen jäljiltä eivät mallintuneet oikein (KUVA 9). Näitä ei varsinaisesti edes kuvattu, mutta 3DF Zephyr mallinsi osan niistäkin, koska ne olivat mukana käsiteltävässä aineistossa.



KUVA 9. Koska dataa ei ole saatavilla, 3DF Zephyr ei pysty mallintamaan osia katosta ja lattiasta. Nämä osat poistettiin mallista optimoinnin yhteydessä ja rakennettiin uudelleen Unityssa.

Ritarinkannuksen dataset koostuu 458 kuvasta, jolla on pyritty käymään asunto mahdollisimman tarkasti läpi. 3DF Zephyr kuitenkin kelpuutti kuvamassasta vain 267 kuvaa. Hylättyjä kuvia oli siis noin puolet. Hylkäysprosentti selittyi himmeällä valaistuksella. Suuri osa kuvista oli niin himmeitä, ettei niitä pystynyt käyttämään mallin rakentamiseen. Heikko valaistus hävitti kuvista yksityiskohtia, joten sovellus ei kyennyt löytämään kaikista kuvista ankkuripisteitä. Mallinnusta hankaloitti entisestään asunnon värimaailma: katto, lattia ja seinät olivat kaikki valkoisia tai vaaleita, joten syvyyden rakentaminen kuvien perusteella oli 3DF Zephyrin algoritmeille mahdotonta, koska kontrastia ei ollut käytännössä lainkaan (KUVA 10). Mallinnus tehtiin tämän vuoksi useassa eri vaiheessa.



KUVA 10. Fotogrammetriamallin laatiminen huonosti valaistusta aineistosta oli mahdotonta. Yli puolet valokuvista oli käyttökelvottomia.

Ensin kaikista käytettävissä olevista kuvista rakennettiin täydellinen malli referenssiksi. Malli skaalattiin Unityssa oikeaan kokoon, minkä jälkeen lattia, katto ja seinät laadittiin Realtime CSG -työkalulla Unityn vakio-3D-kappaleista. Asunto saatiin tällä tavoin mallinnettua oikeissa mittasuhteissa, mikä helpotti varsinaisen simulaation laatimista. Fotogrammetriamallin käyttökohde tässä tapauksena oli toimia pelkkänä mittakaavana. 3DF Zephyr tuotti palveluasunnosta 3D-mallin, jolla oli 18 miljoonaa verteksiä. Koska mallia oli tarkoitus käyttää vain pohjana varsinaiselle simulaatiolle, sen tarkkuus puotettiin 156 000 verteksiin.



Kuva-aineistosta pyrittiin mallintamaan asunnon yksittäisiä kalusteita, mutta kuvamateriaali ei soveltunut tähänkään. Lopulta koko kuvamassasta valmiiseen simulaatioon päätyi vanha nahkasohva (KUVA 11).



KUVA 11. Fotogrammetrialla mallinnettu nahkasohva Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön virtuaalimallissa.

#### 5.4 Mallin optimointi

3DF Zephyr tarjoaa hyvät työkalut 3D-mallin optimointiin. Turhat alueet (katto ja lattiat) on mahdollista poistaa suoraan ohjelmassa, mikä toteutettiin molemmille tehdyille malleille. Tämän jälkeen täytettiin seiniin jääneet reiät käyttämällä sovelluksen reikien täyttöön tarkoitettua algoritmia. Reikien täyttämiseen on kaksi vaihtoehtoa, selected ja watertight. Jälkimmäinen täyttää kaikki tahkoverkon reiät automaattisesti, kun taas ensimmäinen mahdollistaa reikien valitsemisen käsin. Koska malleista oli poistettu katto ja lattiat, seinien reiät täytettiin selected-valintaa käyttäen. Näin malli saatiin seinäpintojen osalta valmiiksi.

Kun mallin geometria oli korjattu valmiiksi, alettiin vähentää verteksejä. 3DF Zephyr tarjoaa geometrian yksinkertaistamiseen muutamia työkaluja, jotka toimivat varsin hyvin. Decimation-algoritmi vähentää mallista valitun määrän verteksejä. Tätä valintaa käyttämällä verteksien määrä pudotettiin miljoonaan. Mallin ulkonäkö pysyi pitkälti samana, koska mallinnettavat pinnat olivat pääasiassa 90 asteen kulmissa toisiinsa nähden. Jos malli olisi ollut esimerkiksi pyöreä, geometrian yksinkertaistaminen näin radikaalisti olisi todennäköisesti vaikuttanut geometriaan huomattavasti enemmän. Bilateral smoother -algoritmi puolestaan vähentää verteksien määrää säilyttäen suorien pintojen ja kulmien muodon. Kun malli oli optimoitu miljoonaan verteksiin, Bilateral smoother -algoritmilla määrä saatiin karsittua 750 000:een, mikä on riittävä määrä Oculus Quest 2:lle (KUVA 12).



KUVA 12. Ero verteksien määrässä optimoidu (vas.) ja optimoimattoman mallin välillä.

Optimoinnin jälkeen 3D-malli vietiin Zephyristä teksturoituna fbx-tiedostona. Mallin pinnat jaettiin kuuteen teksturoituun materiaaliin, ja tekstuurit vietiin 8K-tarkkuudella. Tämän jälkeen 3D-malli siirrettiin Unityyn. Valmiiseen malliin jäi vielä kauneusvirheitä, sillä fotogrammetriasovellukset selviävät huonosti suorista pinnoista. Tämä on nähtävillä erityisesti Ab Ferromek Oy:n mallissa, sillä suorat pinnat eivät ole suoria (KUVA 13). Ritarinkannuksen fotogrammetriamallissa seinät kuvattiin, mutta ne poistettiin pelimoottoriin vietävästä mallista. Näin verteksejä voitiin käyttää enemmän yksityiskohtiin

sen sijaan, että niitä olisi käytetty suorien pintojen mallintamiseen. Pintojen tekeminen Unityssa säästää geometriaa.



KUVA 13. Fotogrammetriamallinnus osaa yksityiskohdat, mutta suorien pintojen kanssa tilanne on toinen. Ab Ferromek Oy:n fotogrammetriamallissa tämä näkyy esimerkiksi ovesa.

### 5.5 Mallin vienti pelimoottoriin

Ympäristön rakentaminen 3D-mallille Unityssa on varsin suoraviivainen prosessi. 3D-malli tuodaan pelimoottoriin, ja tuonnin yhteydessä määritetään sen mittakaava. Zephyrin tuottama fbx-malli on suoraan 1:1-mittakaavassa Unityssa, joten se tarvitsee vain siirtää pelinäkömään eli sceneen. Tämän jälkeen mallille määritetään materiaalit. Unity tekee tämän tuonnin yhteydessä automaattisesti. Samalla mallista irrotetaan tekstuurit, jotka liitetään materiaaleihin. Kun nämä teksturoidut materiaalit lisätään 3D-malliin, se saa pinnoituksen. (KUVA 14)



KUVA 14. Teksturoitu ja optimoitu 3D-malli Unityssa. Katto ja lattiat on tehty pelimoottorissa.



KUVA 15. Valokuva Ab Ferromek Oy:n varastotilasta

Valmiin mallin tarkkuutta voi vertailla valokuvaan (KUVA 15). Simulaatiota varten malli viimeisteltiin tekemällä sille katto ja lattia Unityn Plane-3D-objekteilta sekä lisäämällä hyllyihin fyysisiä kappaleita simuloivat törmäyttimet (box collider), jotta niiden läpi ei voi kulkea. Tämän jälkeen sceneen lisättiin valaistus ja pieni määrä jälkikasittelyefektejä immersion parantamiseksi. Tekstuureiden tarkkuus laskettiin 8K:sta 2K:ksi (2048x2048 kuvapistettä) paremman suorituskyvyn takaamiseksi. Rita-

rinkannuksen 3D-malliin rakennettiin seinät, lattia ja katto Unityssa. Näin oli mahdollista säästää verteksejä muuhuun geometriaan. Ab Ferromek Oy:n tapauksessa seinäpinnat kuluttavat paljon 3D-mallin verteksejä.

## 6 SIMULAATIOT

Fotogrammetriamallien ympärille rakennettiin simulaatiot Unitylla (versio 2020.3.22fi). Varsinainen toiminnallisuus toteutettiin kokonaan pelimoottorilla. Simulaatioiden tavoitteet määrittivät hankkeiden perusteella. Ab Ferromek Oy:lle tehdyssä simulaatiossa MIR-kuljetusrobotti demonstroi automatisoitua varastohallintaa, kun taas Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön asunnon mallinnusta käytettiin arjen haasteita simuloivan skenaariotyökalun tekemiseen. Ab Ferromek Oy:n simulaation käyttötarkoitus on räätälöity pelkästään yritystä varten, kun taas Ritarinkannuksen simulaation käyttötarkoitukset ovat laajemmat. Skenaariotyökalua on tarkoitus hyödyntää hankkeen aikana moniin eri käyttötarkoituksiin.

Koska simulaatioiden lähtökohdat ovat erilaiset, myös niiden laatimiseen käytettävät työkalut poikkeavat toisistaan. Ab Ferromek Oy:n tapauksessa simulaatio esittää ratkaisuehdotuksen yhteen spesifiin ongelmaan, kun taas Ritarinkannuksen simulaatiota on tarkoitus käyttää esimerkkinä hyvin monenlaisiin tilanteisiin virtuaalitodellisuuden avulla. Eräs käyttötarkoitus on erilaisten teknisten innovaatioiden testaaminen simuloitussa ympäristössä.

Suorituskyvyn vertailemiseksi käytettiin Unityn kahta eri renderöintiputkea, jotka vastaavat kuvan tuottamisesta näytölle. Tietokonegrafiikassa tätä toimintaa kutsutaan renderöinniksi (Butterfield, Ekembe Ngondi & Kerr 2016). Renderöinti on reaaliaikaista, ja se määritellään jatkuvaksi kuvien näyttämiseksi tietokonenäytöllä nopeaan tahtiin. Vuorovaikutteisissa simulaatioissa käyttäjä reagoi annettuun kuvaan tuottaen syötteen, johon simulaatio vastaa piirtämällä uuden kuvan. Tätä syötteen ja vasteen muodostamaa silmukkaa ajetaan erittäin nopeasti, jotta käyttäjä ei huomaisi sitä. Renderöinti on prosessi, joka kattaa kaikki matemaattiset operaatiot, jotka muuttavat datan kuvaksi näytölle. Laitteistotasolla tietokoneen prosessori ja näytönohjain ovat vastuussa näiden suorittamisesta. Prosessori kerää datan, josta näytönohjain käsittelee kuvan. (Akenine-Möller ym. 2018, 1, 12.)

Ab Ferromek Oy:n simulaatio käyttää kuvan renderöintiin eli sen esittämiseen näytöllä Unityn Universal Render Pipeline -renderöintiputkea (URP). Unity tarjoaa kaksi vaihtoehtoa URP:lle: pelimoottorin sisäänrakennetun renderöintiputken sekä High Definition Render Pipelinen (HDRP). (Unity 2021.) URP:n käyttöön päädyttiin, koska se on valmiiksi optimoitu suorituskyvyltään kevyempien laitteiden, kuten Oculus Quest 2:n, käyttöön. Se tarjoaa hyvän tasapainon näyttävyyden ja suorituskyvyn välillä. Ritarinkannuksen simulaatiossa renderöintiputkeksi valittiin Unityn sisäänrakennettu versio.

Vaikka 3D-mallit optimoitiin jo 3DF Zephyrissä, optimointia jatkettiin Unityssa suorituskyvyn varmistamiseksi. Valaistusta ja jälkikäsitteleyefektejä karsittiin, ja kaikki VR-ympäristön liikkumattomat kappaleet merkittiin staattisiksi, jolloin Unity käsittelee ne yhtenä isona kokonaisuutena yksittäiskappaleiden sijaan. Tämä lisää suorituskykyä, ja näillä toimilla VR-ympäristöjen suorituskyky saatiin sellaiselle tasolle, että simulaatioita pystyttiin ajamaan Oculus Quest 2 -virtuaalilaseilla riittävän sulavasti.

Toiminnallisuuden rakentamiseen hyödynnettiin valmiita lisäosia, joita Unityyn voi hankkia pelimoottorin omasta Asset Store -sovelluskaupasta. Nämä lisäosat sisältävät toiminnallisuuksia, jotka muuten pitäisi ohjelmoida itse pelimoottoriin. Nämä lisäosat vastaavat muun muassa liikkumisesta, vuorovaikutuksesta VR-ympäristössä sekä vuoropuhelusta.

Käytettävyydeltään molemmat simulaatiot pyrittiin rakentamaan mahdollisimman helppokäyttöisiksi. Pelaajat voivat siirtyä tilassa joko kävelemällä tai erillisen teleporttaussäteen avulla. Kappaleisiin puolestaan ollaan vuorovaikutuksessa interaktiosäteellä (kts. luku 4). Yksinkertainen käytettävyys madaltaa kynnystä simulaatioiden käyttöön. Helppokäyttöisyys on avainasemassa, sillä simulaatioiden käyttäjät eivät ole peli- tai VR-harrastajia.

## 6.1 Ab Ferromek Oy

Ab Ferromek Oy kaipasi ratkaisua varastohallinnan automatisointiin. RoboTry-hankkeen tiimoilta yrityksessä käytiin esittelemässä MIR-mobiilirobotia, jolla kuljetettiin kauluslavoja työpisteeltä varastoon. Tällä hetkellä työntekijän on kuljetettava lava työpisteeltä varastoon, missä joku käy sen tyhjentämässä. Kulkureitti on U-kirjaimen mallinen, ja yhdellä työntekijällä kuluu lavan viemiseen noin kymmenen minuuttia. MIR:n avulla prosessi on mahdollista automatisoida. Yritykselle järjestettiin demonstraatio oikean robotin toiminnasta, jota käytettiin pohjana simulaation laatimiselle. Simulaatiossa MIR kuljettaa täyden lavan varastoon ja jättää sen tyhjään lavatelakkaan. Kun lava on tyhjennetty, robotti noutaa tyhjän lavan takaisin työpisteelle konepajan toiseen päähän.

Simulaatiossa lavatelakoita lisättiin varastoon kolme, ja mobiilirobotin toiminta laadittiin sellaiseksi, että ensin se täyttää lavapaikat ja palaa noutamaan lavat, kun ne on tyhjennetty. Tämä toiminnallisuus vietiin virtuaalitodellisuuteen, ja Ab Ferromek Oy:n henkilökunta pääsi kokeilemaan VR-simulaatiota tammikuussa (KUVA 16).



KUVA 16. Oculus Quest 2:lla toimiva VR-simulaatio Ab Ferromek Oy:n varastosta

VR-simulaatiosta tuotettiin myös versio, joka ei tarvitse toimiakseen VR-laseja. Tässä versiossa kamera kiertää varastohallia ja seuraa robottia, joka luovuttaa täyden lavan ja noutaa tyhjän. Tämä versio simulaatiosta on tehty hankkeen viestinnän käyttöön, ja sen pääasiallinen käyttötarkoitus on toimia videokaappauksen aineistona. Koska 3D-mallia ei tarvinnut optimoida VR-laseja varten, tässä versiossa ympäristöstä voitiin käyttää täyden tarkkuuden 3D-mallia.

Simulaatio alkaa, kun varastohallin nosto-ovi nousee, ja MIR-kuljetusrobotti toimittaa ensimmäisen kuormalavan lavatelakalle. Kun lava on paikallaan, esiin nousee Hyllytä-painike, jota käyttäjän on painettava vuorovaikutussäteen avulla. Robotti toimittaa kaikkiaan kolme lavaa, ja palaa noutamaan tyhjet lavat, kun ne on tyhjennetty. Tämän jälkeen silmukka toistuu samanlaisena: robotti täyttää kolme lavapaikkaa täysillä lavoilla, hakee tyhjet pois, kun käyttäjä on ne tyhjentänyt ja tuo jälleen täydet lavat tilalle (KUVA 17).





KUVA 17. MIR-kuljetusrobotti tuo uuden lavan tyhjään kuormatelakkaan.

Humanoid Control VR:n mukana toimittava Counter-komponentti piti kirjaa toimitetuista lavoista kirjaamalla ne kokonaislukumuuttujaan. Muuttujan arvo on pelisilmukan alkaessa seitsemän, ja se vähenee yhdellä, kun lava tuodaan paikalleen. Kokonaislukua muutetaan Dreamteck Splinesin käyrille tarkoitetun trigger-komponentin avulla. Kun robotti on saapunut perille, se ylittää käyrällä olevan triggerin, joka irrottaa kauluslavan robotin kyydistä ja siirtää sen telakkaan. Samalla toimitetuista lavoista kirjaa pitävän kokonaislukumuuttujan arvoa laskettiin yhdellä. Robotti palaa takaisin varastohalliin noutamaan uuden lavan.

Kun kaikki kolme lavaa ovat paikallaan, kokonaisluvun arvo on laskenut kolmella. Seuraavaksi lavat tyhjennetään (KUVA 18). Tätä varten pelihahmolle rakennettiin oikeaan käteeseen interaktio-osoitin (interaction pointer), joka aktivoituu VR-ohjaimen X-painikkeestä. Käden jatkeeksi ilmestyy säde, joka reagoi lavan eteen nousevaan Hyllytä-painikkeeseen muuttamalla painikkeen punaiseksi. Kun käyttäjä

painaa ohjaimen liipaisinpainikkeesta, lava tyhjenee, ja kokonaislukumuuttujan arvo laskee yhdellä. Kun lavat on tyhjennetty, muuttujan arvo on yksi.



KUVA 18. Kokonaislukumuuttuja pienenee yhdellä, kun lavat hyllytetään

Kun robotti on kuljettanut kolmannen lavan lavatelakkaan, se palaa käyrää pitkin kolmannen kerran varastohalliin. Kolmannen käyrän alussa on trigger-komponentti, joka aktivoituu paluumatkalla. Tämä trigger vähentää kokonaislukumuuttujaa yhdellä. Kun muuttujan arvo on nolla, robotti palaa noutamaan tyhjät lavat yksi kerrallaan.

Toiminnallisuus on rakennettu tällaiseksi siksi, että kuljetuksessa olevat lavat on saatava ensin paikalleen, sitten tyhjiksi ja lopulta robotti tulee noutamaan lavat vasta sitten, kun on palannut viimeiseltä tuontimatkaltaan. Näin varmistetaan simulaation looginen toimivuus. Kuljetusrobotti olisi ollut mahdollista saada toimimaan myös tekoälyn reitinhaun avulla, mutta tämä olisi lisännyt merkittävästi työ-  
määrää.

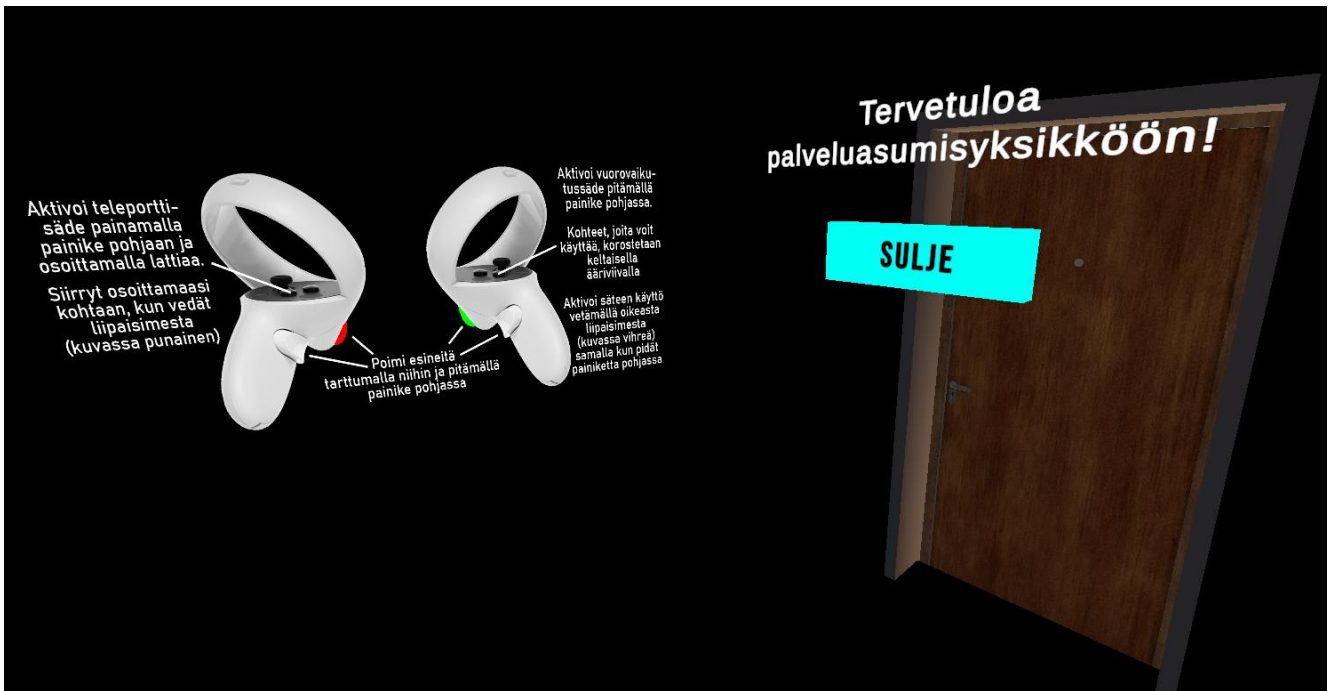
## 6.2 Ritarinkannus

Ritarinkannus on Kannuksen terveystieteiden keskuksen läheisyydessä sijaitseva kehitysvammaisille henkilöille asumispalvelua tarjoava yksikkö. Ryhmäkodissa on neljä paikkaa ohjattuun asumiseen, viereisessä rivitalossa on viisi asuntoa tuettuun asumiseen. Asumispalveluyksikön asunnosta laadittuun VR-ympäristöön luotiin pohja skenaariotyökalulle, jolla voidaan simuloida erilaisia tilanteita, joita palveluasumisyksikön asukkaat voivat arjessaan kohdata. Toinen käyttötarkoitus tälle simulaatiolle on erilaisten teknisten innovaatioiden ja ideoiden testaaminen virtuaaliympäristössä HIPPA-Remote-hankkeen tiimoilta. Tämän opinnäytetyön aikana simulaatiolle rakennettiin pohja, jota voidaan myöhemmässä vaiheessa laajentaa. Tavoitteena oli tuottaa ympäristö, johon voidaan tuottaa sisältöä HIPPA-Remote-hankkeen aikana kertyvän tiedon perusteella. Tämä simulaatiopohja taipuu niin ikäihmisten, mielenterveyskuntoutujien kuin kehitysvammaistenkin haastavien tilanteiden tarpeisiin. Sen tekninen toteutus mahdollistaa myös erilaisten teknisten apuvälineiden testaamisen virtuaalitodellisuudessa.

Simulaatio toimii myös testiympäristönä moninpelille. Tässä versiossa yhteistyömoninpeli toimii siten, että enimmillään 20 käyttäjää voi olla samassa tilassa, mutta omissa sessioissaan. Tämä tarkoittaa sitä, että simulaation tila näkyy jokaiselle käyttäjälle erikseen. Kun yksi avaa jääkaapin, tämä ei näy muille käyttäjille. Simulaation kehitystyön aikana ei ollut riittävästi aikaa moninpelin riittävään testaamiseen, joten tässä simulaatiossa sitä on testattu vain siten, että käyttäjät voivat olla yhteydessä toisiinsa samassa virtuaalitalassa, mutta varsinainen simulaatio tapahtuu jokaiselle käyttäjälle erikseen.

Koska ympäristön mallintamiseen ei voinut käyttää fotogrammetriamallia, rakensin asunnon tarkoituksellisesti pelimäiseksi. Tavoitteena oli tuottaa visuaalisesti kiinnostava ympäristö, joka houkuttelee pelaamaan.

Simulaatio alkaa niin sanotusta kokoontumisalueesta, joka toimii ikään kuin asunnon eteisenä. Käyttäjälle kerrotaan, miten ympäristöön ollaan vuorovaikutuksessa (KUVA 19). Näin käyttäjällä on selkeä ymmärrys siitä, miten ympäristössä liikutaan ja toimitaan. Ennen kuin asuntoon siirrytään, pitää käyttäjän aktivoida sulje-painike, joka avaa ulko-oven. Painike suorittaa myös listan komentoja, joilla kytetään pois käytöstä osa vuorovaikutuspisteistä, jotta simulaation logiikka toimii oikein.



KUVA 19. Käyttäjä opastetaan simulaation käyttöön ennen siirtymistä varsinaiseen peliympäristöön.

Peliympäristönä toimii palveluasumisyksikön asunto, jossa asuu ikäihminen. Tämä ikäihminen on simulaatiossa ei-pelaajahahmo (npc, non-player character), johon käyttäjä on vuorovaikutuksessa. Käyttäjän on ensin keskusteltava asukkaan kanssa. Tämä aktivoi vuoropuhelun, jossa pelaaja kyselee asukkaan vointia ja kuulumisia. Asukas vastaa riippuen käyttäjän tekemistä valinnoista ja pyytää tämän jälkeen käyttäjää valmistamaan ruokaa. Tämä aktivoi uuden tehtävän, jossa ympäristöstä korostetaan viisi kohdetta: lusikan, kupin ja lautasen paikat pöydällä, kattila liedellä sekä veitsiteline. Käyttäjän on etsittävä kaapeista oikeat ruokailuvälineet, keitettävä ruokaa jääkaapista otettavasta säilykkeestä sekä nostamalla tiskipöydällä oleva veitsi takaisin veitsitelineeseen. Kun käyttäjä on suoriutunut näistä tehtävistä, asukas siirtyy pöytänsä. Tämän jälkeen asukkaan kanssa voi keskustella uudelleen. Nyt asukas pyytää, että käyttäjä kävisi laittamassa suihkun päälle. Tämä aktivoi kylpyhuoneessa suihkun vuorovaikutuspisteen. Kun käyttäjä on aktivoinut suihkun, asukas siirtyy pesutiloihin. Peseytymisen jälkeen asukas istuu sängyn reunalle, ja simulaatio päättyy.

Simulaation vuorovaikutukset koostuvat triggereistä sekä etenemisestä kirjaa pitävästä laskurista. Laskuri kytkeytyy päälle simulaation alussa, ja tarkistaa sekunnin välein suoritettujen tehtävien ja tekeväntömiä tehtävien välistä suhdelukua vertailemalla kahta kokonaislukumuuttujaa keskenään. Tehtäviä suorittamalla (pöydän kattaminen, ruoan valmistaminen) kokonaislukua kasvatetaan, ja kun se on yhtä suuri tai suurempi kuin vertailtava luku, asukas liikkuu ruokapöydän äärelle. Asukas liikkuu

Dreamteck Splinesilla luodun käyrän päällä, ja liike käyrällä käynnistää kävelyanimaation. Kun asukas on tuolin äärellä, käyrällä oleva trigger-komponentti suorittaa istumisanimaation sekä aktivoi tuolin ympärillä olevan näkymättömän törmäyttimen. Kun törmäytintä osoittaa interaktiosäteellä, asukkaan kanssa voi käydä toisen keskustelun. Keskustelun jälkeen pelilogiikka aktivoi suihkun törmäyttimen, jota voi nyt käyttää vuorovaikutussäteellä. Kun käyttäjä siirtyy kylpyhuoneeseen ja aktivoi suihkun, asukas nousee ylös, kävelyanimaatio aktivoituu ja tämä siirtyy suihkuun spline-käyrää pitkin. Käyrälle lisätyt triggerit sulkevat oven asukkaan perässä sekä siirtävät suihkuverhon tämän eteen, kun asukas käy suihkussa. Poistuessaan suihkusta kylpyhuoneen ovi avautuu, ja käyrän viimeisen noodin kohdalla trigger kääntää asukkaan kohti keittiötä ja suorittaa istumisanimaation.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, miten fotogrammetriamallinnus soveltuu käytettäväksi VR-ympäristössä. Työn painopisteenä oli luoda kaksi VR-ympäristöä, joita käytetään Metan Oculus Quest 2 -virtuaalilaseilla. Fotogrammetrian avulla on mahdollista tuottaa yksityiskohtaisia malleja tiloista tai kappaleista, mutta mallit on optimoitava, jotta niitä voidaan käyttää VR-ympäristöinä.

Opinnäytetyön aineisto kerättiin kuvaamalla kaksi erillistä tilaa, Ab Ferromek Oy:n varastohalli ja Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön asunto. Ab Ferromek Oy:n varasto kuvattiin ensin, ja tässä kohteessa harjoiteltiin aineiston keräämistä. Tilat kuvattiin neljällä eri tavalla: älypuhelimella ja GoPro Insta360 -kameralla otettiin perinteisiä valokuvia, GoPro Insta360:lla otettiin 360 asteen kuvia sekä videoita. Tätä aineistoa käytettiin fotogrammetriamallin rakentamiseen. Ab Ferromek Oy:n tulosten perusteella todettiin, että älypuhelimella otetut 267 kuvaa toimivat parhaiten mallin rakentamisessa. Tätä lähestymistapaa sovellettiin Ritarinkannuksen asunnon kuvaamiseen, tosin huonolla menestyksellä.

Kuvaamisen osalta tärkein havainto liittyy tiloihin itseensä. Fotogrammetriamallin rakentaminen valokuvadatan perusteella vaatii varsin väljät tilat, jotta seinät on mahdollista kuvata tilan vastakkaisilta reunoilta. Myös pintojen värityksellä on väliä. Algoritmi pystyy rakentamaan mallin huomattavasti paremmin, jos sille voidaan tarjota mahdollisimman paljon erilaisia ankkuripisteitä. Ab Ferromek Oy:n varastotilan tumma lattia ja värikkäät hyllyrungot autoivat mallinnustyössä, sillä algoritmi kykeni pääättelemään niiden perusteella, kuinka kuvat liittyvät toisiinsa. Ritarinkannuksessa puolestaan ympäristö asetti suuria haasteita. Seinät, katto ja lattiat olivat vaaleita. Tasainen kuvausympäristö soveltui huonosti fotogrammetriamallinnuksen tarpeisiin. Kuvissa ei ollut riittävästi dataa, jonka perusteella ohjelma olisi osannut rakentaa toimivan mallin.

Värejä tärkeämpää oli kuitenkin valaistus. Ab Ferromek Oy:n varastohalli oli tasaisesti ja erittäin hyvin valaistu, mikä näkyi datasetin valokuvien tasalaatuisuudessa. Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön asunto kuvattiin aamupäivällä joulukuussa, joten luonnonvaloa oli huonosti tarjolla. Tämän lisäksi asunnon valaistus koostui vain muutamasta valaisimesta, mikä hankaloitti kuvaamista. Datasettiä tarkastelemalla käy ilmi, että kuvissa valaistusolosuhteet vaihtelevat älypuhelimien kameran pyrkiessä säätämään itseään olosuhteisiin. Tämä yhdistettynä vaaleisiin pintoihin tuotti aineistoon paljon sellaisia kuvia, joita ei ollut mahdollista käyttää lopullisessa mallinnuksessa. Vaikka kuvia oli noin puolet

enemmän (458 kuvaa) kuin Ab Ferromek Oy:n (267 kuva) mallinnuksessa, näistä yli puolet, 252 kuvaa, putosi jo mallinrakennuksen ensimmäisessä vaiheessa pois niiden käyttökelvottomuuden vuoksi.

Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön asunnosta päätyi lopulta yksi nahkasohva valmiiseen simulaatioon. Mallinnusta käytettiin mittakaavan varmistamiseksi, ja asunto itsessään mallinnettiin CSG Real-time -työkalulla suoraan Unityssa. Tämä lähestymistapa tarjosi huomattavasti paremman suorituskyvyn itse simulaation ajamiseen. Vaikka Ab Ferromek Oy:n fotogrammetriamalli saatiin optimoitua Oculus Quest 2 -VR-laseille, suorituskyvyn näkökulmasta laitetta ajettiin aivan äärirajoilla. Ritarinkannuksen tapauksessa tätä ongelmaa ei ollut, minkä ansiosta simulaation visuaalisuuteen oli mahdollista kiinnittää huomattavasti enemmän huomiota.

## 7.1 Simulaatiot

Fotogrammetriamallien valmistuttua ne optimoitiin ja vietiin Unity-pelimoottoriin, missä niiden ympärille rakennettiin simulaatiot. Ab Ferromek Oy:n simulaatiossa toteutettiin VR-demonstraatio MIR-robotilla tehdystä automaattisesta varastohallinnasta, Ritarinkannuksen asunto puolestaan mallinnettiin skenaariotyökalua varten, jolla on mahdollista simuloida arjen haasteita sekä niiden ratkaisuja. Työkalun ensimmäisessä versiossa pelaaja on vuorovaikutuksessa palveluasumisyksikön asukkaankanssa. Tulevaisuudessa tätä pohjaa voidaan soveltaa myös asukkaankansan elämän simulointiin sekä erilaisen arkea helpottavien teknisten ratkaisujen, kuten vaikkapa sosiaalisen robotin, testaamiseen.

Tuloksena syntyi Oculus Quest 2:lle kaksi VR-simulaatiota, jotka käyttävät hyväkseen fotogrammetrian menetelmin rakennettuja tiloja tai kappaleita. Työn haasteellisimman osuuden muodosti 3D-mallien optimointi. Mobiililaitteille tarkoitettun Android-käyttöjärjestelmän varaan rakentuva Oculus Quest 2 ei tarjoa markkinoiden johtavien VR-lasien kaltaista suorituskykyä, sillä kaikki laitteen tekemä laskenta tapahtuu VR-laseissa sen sijaan, että lasit olisi liitetty tehokkaaseen tietokoneeseen. Fotogrammetriamalleja ei voinut käyttää sellaisenaan, vaan niiden geometriaa oli yksinkertaistettava, jotta ne toimivat Oculus Quest 2:lla. Ritarinkannuksen epäonnistuneen fotogrammetriamallinnuksen hyvänä puolena oli se, että ympäristö oli mahdollista rakentaa alusta saakka käsin, joka säästi todella paljon geometriaa. Säästynyttä suorituskykyä oli mahdollista käyttää simulaation syventämiseen sekä simulaation visuaaliseen ilmeeseen.

Molempien VR-ympäristöjen kohdalla fotogrammetrian avulla luotiin uskottava kopio fyysisestä tilasta. Simulaatiokäytössä ympäristöt toimivat erinomaisesti. Vaikka Ab Ferromek Oy:lle oli järjestetty fyysinen demonstraatio oikealla robotilla, varastohallintajärjestelmästä oli mahdollista rakentaa virtuaalisena täysin toimiva lavatelakoineen kaikkineen, joita ei ollut käytettävissä fyysisen demonstraation aikana. Yritykselle pystyttiin tarjoamaan uskottava virtuaalinen näkemys siitä, miten varastohallinta toimisi kolmella lavatelakalla ja automatisoituna.

Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön simulaatio puolestaan avaa ovia teknisiä ratkaisuja tarjoaville toimijoille. Jos esimerkiksi yrityksellä on halu kehittää sosiaalista robottia palveluasumisyksikön asukasta silmällä pitäen, sen toiminnallisuutta on mahdollista nyt testata virtuaalisessa mallinnuksessa oikeasta palveluasumisyksikön asunnosta. Simulaation toiminnallisuus on niin laaja, että tiloihin voi lisätä käytännössä millaista toiminnallisuutta tahansa. Asunnossa voi testata vaikkapa erilaisten antureiden toiminnallisuutta. Asukkaan putoaminen sängystä ja putoamisen tunnistavien sensoreiden toimintalogiikka voidaan koekäyttää oikeassa ympäristössä, mutta siten, ettei siitä koidu haittaa tai vaaraa asukkaalle tai tiloille itselleen. Ritarinkannuksen simulaatiota voidaan käyttää myös esteettömien tilojen mallintamiseen. Oviaukkojen siirtäminen tai suurentaminen simulaatioajon aikana avaa paljon mahdollisuuksia turvalliseen asumiseen. Esimerkiksi omassa kodissaan asuvalle ikäihmiselle voitaisiin näin tarjota virtuaalinen näkymä hänen omaan kotiinsa, jossa esteettömyysmuokkaukset on ensin tehty virtuaalisesti, jotta tämä voi tutustua uusiin tiloihin.

## 7.2 Fotogrammetria ja digitaalisuus

Vielä joitakin vuosia sitten VR-lasien suorituskyky ei olisi riittänyt fotogrammetriamallinnuksen käyttämiseen. Nykyiset laitteet kuitenkin selviävät graafisesti vaativien kappaleiden renderöinnistä, etenkin, kun mallit optimoidaan käytettäväksi mobiiliympäristössä. VR-laitteiden luoma immersio eli tilaan uppoutuminen mahdollistaa uskottavampien demonstraatioiden rakentamisen ilman, että fyysisiä laitteita tarvitsisi viedä yrityksen tiloihin. Alle 300 kännykkäkameran kuvalla on mahdollista rakentaa simulaatiokäyttöön soveltuva mallinnus fyysisestä tilasta. Tämä käy myös nopeasti: Ab Ferromek Oy:n varaston kuvaaminen aloitettiin kello 10:30, ja valmis malli oli viety optimoituna Unityyn kello 15 samana päivänä. Jos tilat rakennettaisiin mallintamalla ne esimerkiksi pohjapiirroksista, työ vaatisi huomattavasti pidemmän ajan, siinäkin tapauksessa, että esimerkiksi hyllyelementit hankittaisiin valmiina kokonaisuuksina. Koska laitteiden suorituskyky mahdollistaa fotogrammetrian käytön myös



VR:ssä, tarjoaa tarkkojen mallien laatiminen valokuvien avulla huomattavasti kustannustehokkaamman lähestymistavan kuin vastaavan tilan mallintaminen käsin.

Noin sadan neliömetrin kokoisen varaston mallintaminen ja siirtäminen Unityyn tapahtui yhden työpäivän aikana. Varsinaisen simulaation rakentaminen vei huomattavasti pidempään. Ympäristöjen tekeminen käy siis nopeasti, mutta varsinaiseen simulointiin fotogrammetria ei tarjoa oikotietä. Se kuitenkin helpottaa ja nopeuttaa yhtä työlästä vaihetta kolmiulotteisen tilan simuloinnissa automatisoimalla lähestulkoon kokonaan mallinnustyön. Mallien laatiminen käsin säästää verteksejä, mutta esimerkiksi Ab Ferromek Oy:n varastohalli tarjosi hyväksyttävän suorituskyvyn jopa mobiiliteknologialla toimivilla VR-laseilla.

Fotogrammetria tarjoaa kustannustehokkaan ratkaisun erilaisten tilojen ja esineiden mallintamiseen. Se antaa hyvän pohjan myös erilaisten simulaatioiden käyttötarpeisiin. Tuotetut 3D-mallit ovat mitoiltaan identtisiä kuvattuihin kohteisiinsa nähden, joten jo tästäkin syystä ne tarjoavat merkittävä edun käsin rakennettuihin 3D-malleihin nähden. Kaiken lisäksi fotogrammetriamallin tekeminen ei edellytä edes perustietoja 3D-mallinnuksesta. Koska sovellus tarvitsee käyttöönsä ainoastaan sarjan kuvia, aloituskynnys on hyvin matala. Valmiin mallin optimoiminen pelimoottorikäyttöön on varsin nopeaa, sillä 3DF Zephyrin algoritmit hoitavat sen varsin tehokkaasti. Tiloista tehty, VR-ympäristössä toimiva digitaalinen kaksonen on helppo ja nopea laatia.

Fotogrammetriaan perustuvien VR-tilojen kaupallistaminen tarjoaa käytännössä rajattomat mahdollisuudet. Kun ikäihmisten halutaan asuvan entistä pidempään kotona, tulisi tilojen palvella heidän muuttuvia elämäntilanteitaan. Fotogrammetriamallinnus ikäihmisen asunnosta tai omakotitalosta tarjoaisi nopean väylän asumuksen ”turvatarkastukseen”, kun esimerkiksi liian ahtaat oviaukot voisi peliympäristössä nähdä suoraan. Tämän lisäksi asunto tai talo olisi mahdollista muokata esteettömäksi ensin VR-muodossa, jolloin asukas itse pääsisi näkemään tilojen muutokset ennen kuin ne toteutetaan.

Virtuaalitodellisuus tarjoaa lähes rajattomasti vaihtoehtoja. Tässä opinnäytetyössä tehtyjen esimerkkien perusteella myös fotogrammetria taipuu moneen. Sen avulla voidaan rakentaa toimiva automaattinen varastohallintajärjestelmä, ja se taipuu myös haastavien ja vaarallisten tilanteiden simulointiin. VR on kustannustehokas ja turvallinen tapa kokeilla erilaisia ratkaisuja ja lähestymistapoja. Edellä mainittu esteettömyyden esikatselu on eräs näistä, mutta fotogrammetriaa voi käyttää vaikkapa tuotan-

tohalliin suunnitellun robottilinjaston testaamiseen. Kun yrittäjällä on tila, joka voidaan kuvata, se voidaan täyttää virtuaalisilla laitteilla. Tällöin vain mielikuvitus asettaa rajat sille, mitä voidaan virtuaalisesti toteuttaa.

VR- ja fotogrammetriasovellusten käyttökohteet ovat niin laajoja, että ne tarjoavat mahdollisuuksia myös kokonaan uudentlaiselle liiketoiminnalle. Koska fotogrammetria vaatii toimiakseen ainoastaan valokuvien toteutetun syötteen, koko prosessi olisi mahdollista automatisoida. Älypuhelimella otetut kuvat olisi mahdollista siirtää pilveen, jossa niistä laadittaisiin 3D-malli, joka puolestaan siirtyisi automaattisesti Unityyn tai muuhun vastaavaan pelimoottoriin. Pelimoottori voisi rakentaa automaattisesti 3D-mallin ympärille pelattavan version, jonka kuvaajan mukana kulkevat VR-lasit lataisivat automaattisesti. Tämän jälkeen kuvaaja ja käyttäjä voisivat yhdessä tutustua tehtyyn fotogrammetriamalliin, ja tila voitaisiin täyttää sovelluksen sisällä asiakkaan toiveiden mukaisesti. Tällaisesta teknologiasta hyötyisivät todella monet liiketoiminnan osa-alueet robotiikasta sisustamiseen. Uskon tällaiselle sovellukselle olevan kysyntää VR-laitteiden yleistyessä ja tekniikan kehittyessä.

Fotogrammetria on jo nyt käyttökelpoinen työkalu perinteisen 3D-mallinnuksen rinnalle. Se madaltaa kynnystä VR-ympäristöjen rakentamiseen, koska käyttämiseen ei vaadita kuin älypuhelin. Sovellukset vaativat edelleen syötettä myös käyttäjiltä, sillä käyttökelpoinen 3D-malli syntyy vain optimoinnin tuloksena. Tämä pätee erityisesti VR:ään. Vaikka fotogrammetriasovellukset pystyvät tätä nykyä tuottamaan uskottavia mallinnuksia todellisuudesta, kehitettävää riittää niissäkin. Esimerkiksi suorien pintojen tunnistaminen ja mallintaminen oikein on vielä haastavaa. Tiloja mallintaessa on järkevämpää keskittyä yksityiskohtiin ja rakentaa suorat pinnat esimerkiksi pelimoottorissa. Mittakaavan ja tunnistettavien elementtien mallintamiseen fotogrammetria sen sijaan on oikein toimiva työkalu.

Fotogrammetria ei kuitenkaan ole mikään hopealuoti, joka tekee kerrasta 3D-mallinnuksen turhaksi. Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön epäonnistunut fotogrammetriamallinnus todistaa, että perinteisille työkaluille on edelleen paikkansa. Haastavassa kuvausympäristössä suuri osa kerätystä aineistosta osoittautui käyttökelvottomaksi, ja lopulliseen simulaatioon päätyi vain yksi nahkasohva. Fotogrammetriamallia oli kuitenkin mahdollista käyttää mittakaavamallina, jonka ympärille varsinainen 3D-malli tiloista rakennettiin. Tässä tapauksessa fotogrammetriatestaus antoi arvokasta tietoa siitä, mitä ylipäättään kannattaa mallintaa. Simulaation suorituskyvyn kannalta pitäytyminen käsin mallinnetuissa tiloissa antoi reilusti lisää suorituskykyä itse simulaation tarpeisiin. Koska geometriaan ei tullut hukkaa suorien pintojen osalta, oli minulla huomattavasti vapaammat kädet visuaalisen ilmeen raken-

tamiseen. Lopputulos muistutti riittävästi itse palveluasumisyksikön asuntoa tarjoten samalla kiinnostavan ja pelimäisen kokemuksen. Palveluasumisyksikön asunnon mallinnus antoi hyvät suuntaviivat fotogrammetrian käytölle pienissä tiloissa. On järkevämpää mallintaa yksittäisiä tuttuja esineitä, mutta suorat pinnat on syytä tehdä käsin. Fotogrammetrialla oli kuitenkin paikkansa, vaikka se epäonnistui-kin: mittakaavan hahmottaminen ja mallin rakentaminen sen perusteella kävi huomattavasti helpommin, kun työkaluille oli käytössä oikeissa mitoissa oleva, joskin hyvin repaleinen referenssi.

Fotogrammetria on osin nykyisyyttä, mutta osin vielä tulevaisuutta. Kun algoritmit kehittyvät siihen pisteeseen, etteivät valaistusolosuhteet vaikuta mallin rakentamiseen, työkaluista tulee todella käyttökelpoisia. Tehdyn mallin optimointi on vielä pitkälti hoidettava käsin, sillä sovellukset tunnistavat huonosti esimerkiksi suoria pintoja. Jos algoritmi osaisi automaattisesti suoristaa esimerkiksi seinät, yksinkertaistaisi tämä oleellisesti mallien geometriaa, jolloin ne olisivat huomattavasti käyttökelpoisempia. Fotogrammetriamalleja voi nykyisinkin optimoida melko vaivattomasti jopa mallinnussovellusten sisällä, mutta parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi siistiminen olisi tehtävä 3D-mallinnussovelluksella. Tämä osin vie fotogrammetrian käyttökelpoisuutta, sillä sen vahvuuksiin kuuluu automatisoitu 3D-mallinnus, jolla voi osittain korvata käsin laaditun 3D-mallin. Ritarinkannuksen epäonnistunut kuvaus kuitenkin osoittaa, että teknologialla on vielä omat lastentautinsa, joista sen on pyristeltävä eroon.

Ab Ferromek Oy:n mallinnuksessa fotogrammetria-algoritmit tekivät suurimman työn, kun taas Ritarinkannuksessa mallinnustyö oli tehtävä algoritmin tuotosten perusteella. Ab Ferromekin fotogrammetriamalli oli yksityiskohtainen, mutta optimoitunakin simulaation suorituskyky jätti toivomisen varaa, ja isoin tekijä tässä oli valtavasti verteksejä sisältänyt varaston fotogrammetriamalli. Ritarinkannuksen palveluasumisyksikön asunnosta rakennettu malli jäi pelkäksi referenssiksi, mutta tämän ansiosta simulaatiosta pystyttiin laatimaan huomattavasti suorituskykyisempi. Fotogrammetrialla oli siis samoista lähtökohdista huolimatta kaksi eri tarkoitusta: valmis malli sekä referenssi paremmalle suorituskyvylle. Vaikka Ritarinkannuksen mallintamista voidaankin pitää epäonnistumisena, tarjosi fotogrammetria silti hyvän pohjan varsinaiselle mallinnustyölle, kun seinät oli mahdollista nostaa oikeille paikoilleen suoraan.

Simulaatioista saatu suullinen käyttäjäpalaute oli erinomaista. Ab Ferromek Oy:n henkilökunta koki pääsevänsä kokeilemaan suunniteltua varastologistiikkajärjestelmää suoraan täydessä mittakaavassa. VR-lasit mahdollistivat uppoutumisen virtuaalimaailmaan, jota heidän varastostaan tehty tarkka mallinnus tuki tuottamalla lähestulkoon autenttisen virtuaaliympäristön. Ritarinkannuksen simulaatiota puolestaan testattiin hanketyöntekijöiden kesken. Suullisen palautteen perusteella virtuaalilla tarjosi

uskottavan ympäristön palveluasumisyksikön asukkaan elämän simulointiin. Myös tässä simulaatiossa käyttäjät totesivat uppoutumisen olevan helppoa, ja ympäristö vaikutti heidän mielestään uskottavalta.

Molemmissa simulaatioissa juuri virtuaalitodellisuus mahdollisti uppoutumisen kokemukseen ja maailmaan. Useassa suullisessa palautteessa korostui, ettei simulaatio olisi ollut niin uskottava, jos sitä ei olisi käytetty VR-laseilla. Isoimmaksi ongelmaksi molempien demonstraatioiden kohdalla muodostui käytettävyys. Vaikka Oculus Quest 2:n ohjaimet sisältävät vain muutaman painikkeen ja reagoivat liikkeiden avulla, muutamat käyttäjät kokivat tämän silti varsin haasteelliseksi. Myös tiloissa liikkuminen tuotti demonstraatioiden aikana hieman ongelmia. Koska vapaa liikkuminen on VR-lasit päässä vaikeaa, molemmissa simulaatioissa turvauduttiin teleportaatioon. Käyttäjä osoittaa säteellä kohtaa lattiasa, minne tämä haluaa siirtyä, ja toisesta painikkeesta hahmo siirtyy eli teleporttaa tähän kohtaan.

Virtuaalitodellisuuden suurin haaste liittyykin omasta mielestäni juuri liikkumiseen simulaatioiden sisällä. Peliharrastajat ja tietotekniikkaharrastajat tuskin tulevat kokemaan ongelmia modernien VR-laitteiden käytössä, mutta aiheeseen vihkiytymättömille laitteet ovat edelleen varsin teknisiä, vaikka esimerkiksi Oculus Quest 2 onkin kuluttajatuote. Koska simulaatioiden käyttökohteet ovat käytännössä rajattomat, pitäisi myös mahdollisimman suuri käyttäjäryhmä pystyä huomioimaan. Jos liikkuminen simulaatioiden sisällä on sisällöllinen haaste, laitteiden tekninen toteutus on haaste käyttäjäkunnan kasvattamiselle.

## LÄHTEET

Agisoft 2017. Agisoft PhotoScan User Manual. Professional edition, version. Agisoft 1.3. Saatavilla: <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>. Viitattu 11.12.2021

Akenine-Möller, T., Haines, E., Hillaire, S., Hoffman, N., Iwanicki, M. & Pesce, A. 2018. *Real-Time Rendering*. Fourth edition. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Ltd.

Barchester. 2017. Virtual reality offers respite for bedridden people. Barchester. Saatavilla: <https://www.barchester.com/news/virtual-reality-offers-respite-bedridden-people>. Viitattu 19.12.2021

Bishop, L., Cowan, C. & Jančošek, M. 2017. NVIDIA. Senior engineer, artist & managing partner. Luento. Photogrammetry for Games. Art, Technology and Pipeline Integration for Amazing Worlds 1.3.2017. Game Developers Conference. Saatavilla: <https://www.gdcvault.com/play/1024340/Photogrammetry-for-Games-Art-Technology>. Viitattu 30.1.2022

Bowman, D. & McMahan, R. 2007. Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer* 40(7), 36–43.

Brown, K. & Hamilton, A. 2016. EA DICE. Technical art director & lead environment artist. Luento. Photogrammetry and Star Wars Battlefront. 12.8.2016. Game Developer Conference. Saatavilla: <https://www.gdcvault.com/play/1023272/Photogrammetry-andStar-Wars-Battlefront>. Viitattu 2.1.2022

Chopin, N. 2011. Fast simulation of truncated Gaussian distributions. *Statistics and Computing*, Springer.

Dreamteck. 2021. Dreamteck Splines. Dreamteck Splines. Saatavilla: <https://dreamteck.io/page/1>. Viitattu 19.12.2021

EAKR, 2021a, 1. RoboTry-hankkeen hankekuvaus RR-tietopalvelussa. RR-tietopalvelu. Saatavilla: <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projekтикoodi=A77067>. Viitattu 19.1.2022

EAKR, 2021b, 2. HIPPA-Remote-hankkeen hankekuvaus RR-tietopalvelussa. RR-tietopalvelu. Saatavilla: <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projekтикoodi=A77522>. Viitattu 19.1.2022

Emmelkamp, P., Krijn, M., Hulsbosch, A., de Vries, S., Schuemie, M., van der Mast, C. 2002. Virtual reality treatment versus exposure in vivo: a comparative evaluation in acrophobia. *Behaviour Research and Therapy* 40(5), 509–516

Ermi, L. & Mäyrä, F. 2005. Fundamental Components of the Gameplay Experience: Analysing Immersion. *Proceedings of DiGRA Conference Changing Views – Worlds in Play*.

Evans, D. 2019. IrisVR Takes Home Technological Innovation of the Year at the 2019 New York City Construction Awards. Iris VR. Saatavilla: <https://blog.irisvr.com/technological-innovation-of-the-year-2019-nycca-awards>. Viitattu 22.12.2021

- Fade, L. 2018. How Virtual Reality is Transforming Military Training. VR Vision Group. Saatavilla: <https://vrvisiongroup.com/how-virtual-reality-is-transforming-military-training/>. Viitattu 19.12.2021
- Feltham, J. 2018. Ubisoft Made A VR Experience To Use In Driverless Cars And It Looks Terrifying. UploadVR. Saatavilla: <https://uploadvr.com/ubisoft-made-vr-experience-use-driverless-cars/>. Viitattu 19.11.2021
- Fenner, S., MacIntyre, B. 1996. Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation. Georgia Tech. Saatavilla: <ftp://coffeetalk.cc.gatech.edu/pub/people/blair/asce.pdf>. Viitattu 2.1.2022
- Fingas, J. 2018. Oculus predicts a VR future that includes ultra-thin headsets. Engadget. Saatavilla: <https://www.engadget.com/2018/09/26/oculus-predicts-ultra-thin-vr-headsets/>. Viitattu 3.1.2022
- Foster, S. & Halbstein, D. 2014. Integrating 3D Modeling, Photogrammetry and Design. Berliini: Springer Science & Business Media
- Fryer, J., Mitchell, H & Chandler, J. H. 2007. *Applications of 3D Measurement from Images*. Dunbeath: Whittles Publishing.
- Guillherme, N. 2015. Distortion Correction in 3D-Modeling of Root Systems for Plant Phenotyping. Vision-Guided and Intelligent Robotics (ViGIR) Lab. Electrical and Computer Engineering Department, University of Missouri, Yhdysvallat.
- Haas, J. 2014. A History of the Unity Game Engine. Worcester Polytechnic Institute. Saatavilla: <https://core.ac.uk/download/pdf/212986458.pdf>. Viitattu 30.11.2021
- Hutong Games. 2021. Playmaker. Hutong Games. Saatavilla: <https://hutonggames.com/>. Viitattu 9.1.2022
- Hämäläinen, T. 2016. Virtuaalitodellisuus tulee taas: katsaus VR-laitteiden hulluun historiaan. Muropaketti. Saatavilla: <https://muropaketti.com/artikkelit/virtuaalitodellisuus-tulee-taas-katsaus-vr-laitteiden-hulluun-historiaan/>. Viitattu 19.1.2022
- Kaplan, A., Cruik, J., Endsley, M. 2020. The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis. *Human Factors* 63(4): 706–726.
- Kappel, G., Vitek, J., Nierstrasz, O., Gibbs, S., Junod, B., Stadelmann, M., Tschritzis, D. 1991. An Object-Based Visual Scripting Environment. Object Oriented Development. Geneve. Centre Universitaire d'Informatique
- Keller, J. 2021. Air Force unmanned aerial vehicles (UAV) pilots use virtual reality for training and mission rehearsal. Military Aerospace. Saatavilla: <https://www.militaryaerospace.com/computers/article/14204624/virtual-reality-unmanned-training>. Viitattu 29.12.2021

- Klinkenberg, B. 2008. Center for Photogrammetric Training. History of Photogrammetry. Saatavilla: [https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/History\\_of\\_Photogrammetry.pdf](https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/lectures/Handouts/History_of_Photogrammetry.pdf). Viitattu 12.1.2022
- Lin, C.-H., Kong, C., & Lucey, S. 2018. Learning Efficient Point Cloud Generation for Dense 3D Object Reconstruction. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 32. Saatavilla: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/12278>. Viitattu 9.1.2022
- Vosselman, G. & Maas, H. 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing
- Mason, C. 2019. Making 3d Models with Photogrammetry. Carleton College. Northfield. Saatavilla: <https://thehaskinssociety.wildapricot.org/photogrammetry>. Viitattu 11.1.2022
- Matthews, N. 2008. Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation. Technical Note 428. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado. 42 pp. Saatavilla: <http://www.blm.gov/nstc/library/pdf/TN428.pdf>. Viitattu 4.1.2022
- Medium. 2018. The Present and the Future of VR Technology in Medicine: successful cases and prospects for development. Medium. Saatavilla: <https://medium.com/@AltairVR/the-present-andthe-future-of-vr-technology-in-medicine-12f127317a62>. Viitattu 17.1.2022
- Melakari, K. 2020. How Varjo delivers human-eye resolution virtual reality. Varjo. Saatavilla: <https://varjo.com/blog/introducing-bionic-display-how-varjo-delivers-human-eye-resolution/>. Viitattu 19.1.2022
- Milgram, P. 1995. Merging Real and Virtual Worlds. Ergonomics in Teleoperation and Control Laboratory (ETC-Lab). Industrial Engineering, University of Toronto.
- Lipp, N., Sterna, R., Dużmańska-Misiarczyk, N., Strojny, A., Poeschl-Guenther, S., Strojny, P. 2021. VR Realism Scale–Revalidation of Contemporary VR Headsets on a Polish sample. PLoS One 16(12).
- Luhmann, T. k., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. 2014. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. 2nd edition. Berlin: De Gruyter.
- Oculus, 2021. Performance and Optimization. Oculus. Saatavilla: [https://developer.oculus.com/documentation/unity/unity-perf/?locale=en\\_US](https://developer.oculus.com/documentation/unity/unity-perf/?locale=en_US). Viitattu 19.12.2021
- Paul, S., Goon, S., Bhattacharaya, A. 2012. History and comparative study of modern game engines. International Journal of Advanced Computer and Mathematical Sciences. Vol. 3, issue 2, s. 245–249.
- Passer VR. 2021. Humanoid Control. Real Interactive Characters. Passer VR. Saatavilla: <https://passervr.com/>. Viitattu 30.11.2021
- Pixel Crushers. 2021. Dialogue System for Unity. Pixel Crushers. Saatavilla: <https://www.pixelcrushers.com/dialogue-system/>. Viitattu 12.12.2021

Pluralsight. 2014. Key 3D Rigging Terms to Get You Moving. Plural Sight. Saatavilla: <https://plural-sight.com/blog/film-games/key-rigging-terms-get-moving>. Viitattu 7.1.2022

Poznanski, A. 2014. Visual Revolution of The Vanishing of Ethan Carter. The Astronauts 25.3.2014. Saatavilla: <http://www.theastronauts.com/2014/03/visual-revolution-vanishing-ethan-carter/>. Viitattu 30.11.2022

Pääesikunta, 2017. Puolustusvoimat laajentaa virtuaalikoulutusta. Puolustusvoimat. Saatavilla: <https://puolustusvoimat.fi/-/puolustusvoimat-laajentaa-virtuaalikoulutusta>. Viitattu 14.1.2022

Reiner, R. k. & Harders, M. k. *Virtual Reality in Medicine*. London: Springer London.

Rosenblum, L. 2000. Virtual and augmented reality 2020. IEEE Computer Graphics and Applications. Vol. 20, issue: 1.

Rouse, M. 2015. What is virtual reality. Tech Target. Saatavilla: <https://whatis.techtarget.com/definition/virtual-reality>. Viitattu 11.11.2021

Ridley, J. 2021. Oculus is doubling the Quest 2's storage on new base models for free. PC Gamer. Saatavilla: <https://www.pcgamer.com/Oculus-is-doubling-the-Quest-2-base-storage-for-free/>. Viitattu 28.12.2021

Sarathi, P., Goon, S., Chattacharaya, A. 2012. History and comparative study of modern game engine. International Journal of Advanced Computer and Mathematical Sciences. 3(2), 245–249

Scholten, J. 2020. Virtual reality. what's next after the big hype. TÜVRheinland. Saatavilla: <https://blog.tuv.com/en/virtual-reality-whats-next-after-the-big-hype/>. Viitattu 1.1.2022

Statista, 2021. Virtual Reality (VR) headset unit sales worldwide from 2019 to 2024. Statista. Saatavilla: <https://www.statista.com/statistics/677096/vr-headsets-worldwide/>. Viitattu 3.1.2022

Steed, A. 2017. How virtual reality is changing engineering 2017. Ingenia. Saatavilla: <https://www.ingenia.org.uk/Ingenia/Articles/46eb0338-dee8-4322-adae-97f339e0118a>. Viitattu 30.11.2021

Takala, T. 2017. Virtuaaliodellisuus tuo uusia työvälineitä terveydenhuoltoon. Duodecim. Saatavilla: <https://www.duodecimlehti.fi/duo13741>. Viitattu 13.1.2022

Temming, M. 2018. Virtual reality therapy has real-life benefits for some mental disorders. Science News. Saatavilla: <https://www.sciencenews.org/article/virtual-reality-therapy-has-real-life-benefits-some-mental-disorders>. Viitattu 2.1.2022

Totten, C. 2012. Game Character Creation with Blender and Unity. John Wiley & Sons, Inc. Yhdysvallat

Unity, 2021. Render Pipelines. Unity 2020.3 User Manual. Saatavilla: <https://docs.unity3d.com/Manual/render-pipelines.html>. Viitattu 23.12.2021



Visch, V., Tan, E., Molenaar, D. 2010. The emotional and cognitive effect of immersion in film viewing. Taylor & Francis, Yhdysvallat

Ward, J. 2008. What is a Game Engine? Game Career Guide. Saatavilla: [https://www.gamecareer-guide.com/features/529/what\\_is\\_a\\_game\\_.php](https://www.gamecareer-guide.com/features/529/what_is_a_game_.php). Viitattu 20.1.2022

Wehden, L., Reer, F., Janzik, R., Tang, W., Quandt, T. 2021. The Slippery Path to Total Presence: How Omnidirectional Virtual Reality Treadmills Influence the Gaming Experience. Media and Communication, 9/2021. Cogitatio

Willis, M. 2016. A Publically Available, High Resolution Elevation Model of the Arctic. EGY General Assembly 2016. Wien, Itävalta

Willmore, J. 2010. Dissecting the Video Game Engine and a Brief History. Saatavilla: <https://juliewilmore.files.wordpress.com/2010/07/tc339finalpaper.pdf>. Viitattu 22.1.2022

Zephyr, 2021. 3DF Zephyr. Saatavilla: <https://www.3dflow.net/3df-zephyr-photogrammetry-software/>. Viitattu 18.12.2021