



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Casimir Kuusela

Laajennetun todellisuuden tehostami- nen kameraoptiikalla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikka

Insinöörityö

2.5.2020

Tekijä	Casimir Kuusela
Otsikko	Laajennetun todellisuuden tehostaminen kameraoptiikalla
Sivumäärä	32 sivua
Aika	2.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Tieto- ja viestintäteknikka
Ammatillinen pääaine	Pelisovellukset
Ohjaajat	Lehtori Antti Laiho Toimitusjohtaja Pouria Kay
<p>Insinööriyössä selvitettiin älypuhelimien kameran optisten ominaisuuksien hyödyntämistä ja käytettävyyttä laajennetun todellisuuden immersion lisäämisessä ja niiden soveltuvuutta työkaluiksi. Työ keskittyi pääasiassa syväterävyyden käyttämiseen, sillä aikaisempaa näyttöä kameran syväterävyyden käyttämisestä immersion tai virtuaalisten objektien käsittelystä ei löytynyt. Työ toteutettiin laajennetun todellisuuden alan yrityksen toimeksiannattamana, ja tarkoituksena oli tuottaa konseptitodistus teknologian toimivuudesta patenttihakemusta varten.</p> <p>Konseptitodistus toteutettiin Unity Technologiesin pelimoottoria Unityä hyödyntäen Android-älypuhelimille. Toteutuksen aikana lähestymistapaa syväterävyyden käyttämisestä muutettiin muutamaa otteeseen, mutta päädyttiin käyttämään laitteen kamerasta saatavaa metadataa syväterävyyden simuloimiseen laajennetun todellisuuden virtuaaliselle kameralle. Metadatasta pystyttiin saamaan tieto kameran linssin polttovälistä, kuvakennon sekä aukon koosta ja reaaliaikainen tarkennusetäisyys. Tiedoilla laskettiin syväterävyyden koko, joka simuloitiin ohjelmistolla virtuaaliselle kameralle vastaamaan fyysisen kameran syväterävyyden alueetta. Simuloidulla syväterävyyden alueella pystyttiin ohjelmiston avulla myös jakamaan virtuaaliset objektit fokuksessa oleviin ja ei-fokuksessa oleviin.</p> <p>Syväterävyyden simulointi fyysisen kameran optisten ominaisuuksien mukaan osoittautui tehokkaaksi immersiota vahvistavaksi tekijäksi, ja käyttäjän valintojen rajaaminen syväterävyyden avulla tuntui intuitiiviselta heikosta kontrolloitavuudesta huolimatta. Älypuhelimien kameroissa oli vielä puutteita, kuten dynaamisen aukon puute, jotka hankaloittivat projektin kehittämistä.</p> <p>Konseptitodistuksen kehittäminen patenttihakemusta varten osoitti tutkimustyön tärkeyden aloitettaessa uuden teknologian kehittämistä. Työskentelyn iteratiivinen prosessi oli entuudestaan tuttu, mutta tiukan aikataulun ja työn suppean luonteen takia tuntui hankalalta pitäytyä usean lähestymistavan suunnittelun ja tutkimisen tasapainottelussa.</p> <p>Konseptitodistusprojektin pohjalta toimeksiannon antanut yritys lähetti patenttihakemuksen projektissa kehitetyille konseptille. Projektissa suoritettu kehitystyö olisi tarkoitus lisätä yrityksen 3D-mallinnus AR-mobiilisovellukseen.</p>	
Avainsanat	laajennettu todellisuus, mobiili, optiikka, syväterävyys

Author	Casimir Kuusela
Title	Amplifying augmented reality with camera optics
Number of Pages	32 pages
Date	2 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information and Communications Technology
Professional Major	Game Applications
Instructors	Pouria Kay, CEO Antti Laiho, Senior Lecturer
<p>In the final year project, the possibility and usability of utilizing optical properties in amplifying the immersion of augmented reality and its usability as a tool were investigated. The work focused mainly on the use of depth of field, as no previous work utilizing it was found. The project was commissioned by an augmented reality company, and the purpose was to produce a proof-of-concept on the functionality of the technology for a patent application.</p> <p>The proof-of-concept was developed using Unity Technologies' game engine Unity for an Android smartphone. The application was to use metadata from the device to simulate depth of field for an augmented reality virtual camera, henceforth the simulation was developed to correspond to the depth of field of the physical camera. In addition, the software enabled virtual objects to be divided into in-focus and out-of-focus categories based on the depth of field.</p> <p>Simulation of depth of field according to the optical properties of the physical camera proved to be an effective immersion-enhancing factor, and delimitation of user choices with depth of field seemed intuitive despite poor controllability. However, there were still shortcomings in smartphone cameras, such as the lack of a dynamic aperture, which made developing the project difficult.</p> <p>The development of the proof-of-concept for the patent application demonstrated the importance of research work in initiating the development of a new technology. The iterative process of working was already familiar, but due to the tight schedule and the narrow nature of the work, it seemed difficult to stick to a design while balancing the exploration of multiple approaches.</p> <p>Based on the proof-of-concept project, the commissioning company sent a patent application for the concept developed in the project and the developed technology would be implemented in the company's 3D-modeling AR mobile application.</p>	
Keywords	augmented reality, mobile, optics, depth of field

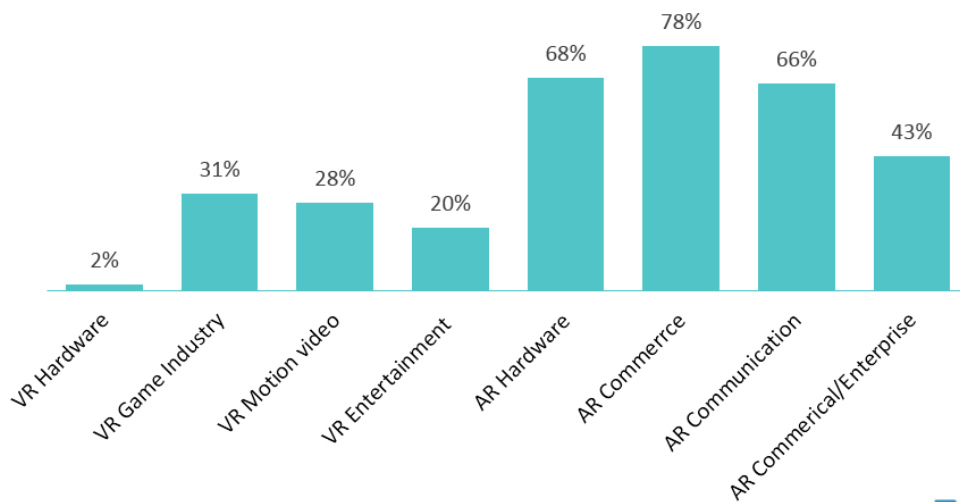
Sisällys

1	Johdanto	1
2	Laajennettu todellisuus ja kameraoptiikka	2
2.1	Laajennetun todellisuuden määritelmä ja historia	2
2.2	Laajennetun todellisuuden monet muodot	9
2.3	Kameraoptiikan perustietoja	10
2.4	Optiset ominaisuuden laajennetussa todellisuudessa	13
3	Immersion ja työkalujen kehittäminen	14
3.1	Tavoitteet	14
3.2	Edistyneen laajennetun todellisuuden määritelmä	14
3.3	Teknologiat	17
4	Kameraoptiikan hyödyntäminen AR-kehityksessä	18
4.1	Projektin määrittely ja tavoitteet	18
4.2	Projektin lähtökohta	18
4.3	Matemaattinen teoria ja tekninen työ	19
4.4	Mobiiliteknologian haasteet	26
4.5	Projektin testaus	26
5	Tulokset ja tulevaisuus	28
5.1	Projektin lopputulos	28
5.2	Projektin ja AR-kehityksen potentiaali	30
6	Yhteenveto	32
	Lähteet	33

1 Johdanto

Älypuhelinien prosessointitehon kasvaessa ja kameran kuvanlaadun parantuessa useat yritykset ovat löytäneet markkinaraon viihdekäyttöön sopivassa laajennetussa todellisuudessa, joka usein lyhennetään termillä AR. Samaan aikaan monet startup-yritykset yrittävät kehittää teolliseen tuotantoon suunnattuja laajennetun todellisuuden sovelluksia. Kehittäminen on myös näkynyt globaaleissa markkinatilastoissa, sillä vuonna 2019 laajennetun todellisuuden yhteenlaskettu markkina-arvo oli 882 miljoonaa Yhdysvaltain dollaria, ja 152 %:n vuosittainen kasvu on hyvä indikaattori laajennetun todellisuuden lupaavasta tulevaisuudesta [1]. Kuvassa 1 voidaan nähdä visualisoituna erilaisten laajennettua ja virtuaalista todellisuutta hyödyntävien sovellusten ennustettu globaali kasvu vuosien 2020 ja 2025 välillä.

Growth of Various AR/VR Applications (%), Global (2020-2025)



Source: CitiBank



Kuva 1. Laajennetun ja virtuaalisen todellisuuden ennustettu kasvu vuosien 2020 ja 2025 välillä [1].

Kuitenkin vain harva kehittää laajennettua todellisuutta alustana, joten pohjana toimiva teknologia jää pahasti jälkeen sovellusten kehittäjien tarpeista. Suuret teknologiajätit, kuten Google ja Facebook, yrittävät parhaansa mukaan kehittää AR-ympäristöä tukevaa teknologiaa, mutta molemmat keskittyvät pääasiassa laitteiston kehittämiseen ohjelmiston kehittämisen sijaan.

Insinööriyössä kehitetään Gribbing Oy:lle teknologia, jonka tarkoitus on auttaa kuromaan kiinni tätä sovellusten ja alustan välille jäänyttä rakoa. Teknologian on tarkoitus sekä kasvattaa immersiota hyödyntämällä älypuhelimien kameran syväterävyyttä että luoda uusi tapa tarkasti valita virtuaalisia objekteja ja niiden osia AR-ympäristössä.

Gribbing Oy on suomalainen startup-yritys, joka keskittyy kehittämään 3D-mallinnusohjelmistoa mobiililaitteille hyödyntäen laajennettua todellisuutta. Gribbing Oy tunnetaan myös nimellä Grib, sillä on 12 työntekijästä, ja se on palkittu mm. vuoden 2019 Nordic Startup Awardsin parhaana luovan teollisuuden alan startup-yrityksenä [2].

Projekti pohjautuu päätelaitteen kameran metadatan käyttämiseen simuloimaan optisia ominaisuuksia virtuaalisessa maailmassa tavalla, joka vastaisi oikeaa maailmaa reaaliajassa.

2 Laajennettu todellisuus ja kameraoptiikka

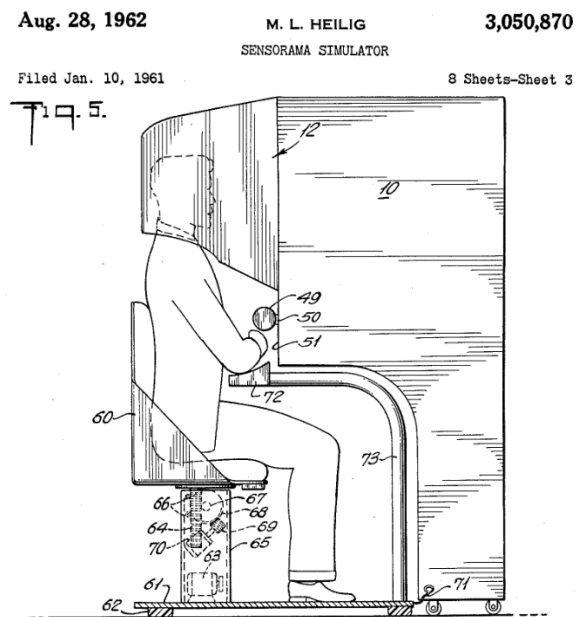
2.1 Laajennetun todellisuuden määritelmä ja historia

Laajennettu todellisuus voidaan määritellä muutamalla eri tavalla, joista moni on riippuvainen kontekstistaan. Laajennettu todellisuus on myös tunnettu nimellä "lisätty todellisuus". Vanhin yleisesti hyväksytty määritelmä laajennetulle todellisuudelle tulee vuodelta 1997, ja sen kehitti yhdysvaltalainen Ronald Azuma [3, s. 356]:

"Jotta vältettäisiin AR:n rajoittaminen tiettyihin tekniikoihin, tämä tutkimus määrittelee AR:ksi minkä tahansa järjestelmän, jolla on seuraavat kolme ominaisuutta:

1. Yhdistää todelliset ja virtuaaliset objektit todellisessa ympäristössä.
2. Toimii interaktiivisesti ja reaaliaikaisesti.
3. Kohdistaa todelliset ja virtuaaliset objektit toistensa kanssa."

Laajennetun todellisuuden voidaan väittää saaneen alkunsa vuosien 1957 ja 1962 välillä, kun elokuvien tekijä Morton Heilig patentoi Sensorama-simulaattorin. Sensorama oli ensimmäinen laite maailmassa, jonka voidaan käsittää käyttäneen laajennettua todellisuutta [4, s. 9]. Kuva 2 hahmottaa, kuinka laitetta käytettiin.



Kuva 2. Patenttipiirros Sensorama-laitteesta [4, s. 3].

Mutta ensimmäinen Azuman määritelmän mukainen laite on Tom Caudellin ja David Mizzellin konseptoina ja kehittämä päässä pidettävä näyttö, usein lyhennetty HMD (Head Mounted Display), laajennettua todellisuutta varten. Caudellin on myös uskottu luoneen termin "*augmented reality*" eli laajennettu todellisuus. [5, s. 13.]

He kehittivät tuotteen lentokonetuotantoon erikoistuneelle Boeing-yhtiölle virtaviivaistaakseen rakennussuunnitelmien seuraamista hyödyntäen pientä läpinäkyvää näyttöä, joka on käyttäjän silmien korkeudella. Vuonna 1995 heillä oli testattavissa prototyyppi-

versio laitteesta, mutta senaikaiset tietokoneet eivät olleet riittävän tehokkaita käyttämään laitetta sen täydessä potentiaalissa. Kuvassa 3 näkyy laitteen prototyyppi testikäytössä.



Kuva 3. Caudellin ja Mazzellin prototyyppi käytössä, 1995 [6, s. 455].

Caudell ja Mizzell rakensivat prototyyppiä varten tietokoneen, jonka he pystyivät sijoittamaan reppuun. Vasta vuonna 1997 tietokoneet olivat kehittyneet tasolle, joka vastasi laitteen tarpeita. Kuitenkin kehnon käyttöliittymän takia, laite ei lisännyt tuottavuutta huomattavasti [6, s. 461].

Vuonna 1999 Hirokazu Kato ja Mark Billinghurst paljastivat tuottamansa ARToolKit-työkalun, jonka he loivat valtavirtaistaakseen sovellusten kehittämisen laajennetun todellisuuden ympäristöä varten. Tämän saman työkalun kehitystä on jatkettu pitkään, ja suurin osa nykyisistä laajennetun todellisuuden työkaluista ja sovelluksista pohjautuu ARToolKitiin. Unity käyttää ARToolKitiä ARFoundation-työkalussaan suoraan, ja Googlen ARCore käyttää sitä myös pohjana. Apple käyttää suoraan uusinta versiota ARToolKitistä. [7, s. 7.]

Seuraava suuri askel eteenpäin laajennetun todellisuuden kehityksessä otettiin käytettävyyden puolella. Vuonna 2008 Mobilizy julkaisi sovelluksen Wikitude, joka yhdisti GPS- ja kompassidataa Wikipedia-artikkeleiden kanssa [7, s. 21]. Sovellus käytti Androidilla

toimivaa puhelimen kameraa heijastaakseen tietoa reaaliajassa puhelimen kamerasyöteeseen, jolloin käyttäjä pystyi esimerkiksi osoittamaan puhelimen kameraa patsasta kohti ja sai sovelluksen avulla tietää patsaan nimen ja rakennusvuoden. Kuvassa 4 voidaan nähdä sovellus käytössä, kun käyttäjä hakee tietoa ympäristöstään. Tämä lähestymistapa laajennetun todellisuuden käyttöön loi alun käsitykselle, että kamera olisi uusi näppäimistö. Vastaavaa käyttötapaa nähdään nykyään suoraan sisällytettynä yhä useampaan puhelimen kamerasovellukseen, esimerkiksi Android-puhelimilla Google Lensin muodossa [8].



Kuva 4. Wikitude-sovelluksen käyttöliittymä vuonna 2008 [9].

Laitteiston kehitys oli pitkään seissyt paikallaan, samalla kun sovellusten kehitys oli kiihtymässä. Tämä kasvava markkinarako sai suuret yhtiöt lähtemään mukaan laitteiston kehitykseen, ja vuonna 2016 Microsoft julkisti HoloLens-tuotteensa. HoloLensin tärkeänä osana oli käyttäjän silmien edessä oleva suuri kaareva läpinäkyvä pinta, johon päässä pidettävä laite heijasti kuvia. [10.] Laitteessa oli myös monia antureita, kuten kuvasta 5 näkyy. HoloLensin ensimmäinen versio oli kuitenkin vain kehittäjille, eikä ollut sopiva vielä kuluttajien käyttöön. Mutta laitteen samaa mediasuosio tekniikan alan tiedotusvälineissä aloitti uuden kilvan kehittää parempaa laitteistoa laajennettua todellisuutta varten. Muutaman vuoden kuluttua HoloLensin ensimmäisestä julkistuksesta Microsoft julkisti HoloLens 2 -laitteen, jota Microsoft aktiivisesti kehittää ja tukee.



Kuva 5. Anturit Microsoftin HoloLensin (Gen 1) sisällä. Näkyvillä on neljä ympäristöä ymmärtävää kameraa, yksi syvyyskamera, yksi tavallinen kamera, neljä mikrofonia ja yksi valoanturi [10].

Vaikka HoloLens olikin suuri uutinen julkaisunsa aikana, se ei saavuttanut käyttäjiä laajennetun todellisuuden harrastajien ja kehittäjien ulkopuolella. Ensimmäinen suuri trendi, joka sai maailmanlaajuisen huomion ja jonka sanottiin jopa luoneen hetkeksi maailmanrauhan suosiollaan, oli Pokémon GO. Niantic Labsin kehittämä Pokémon GO -peli julkaistiin vuoden 2016 alkupuolella Yhdysvalloissa, ja se saapui muihin maihin asteittain puolen vuoden sisällä alkuperäisestä julkaisusta. Pokémon GO:ssa pelaajat kävelevät ympäriinsä oikeassa maailmassa puhelimiensa kanssa, pyydystämässä Pokémoneja ja keräämässä erinäisiä hyödyllisiä esineitä maailmaan ripotelluista Pokéstop-pisteistä. Peli hyödyntää laajennettua todellisuutta tuodakseen Pokémonit puhelimen kamerasyötteen avulla oikeaan maailmaan, ja Pokémon GO on ensimmäinen valtavirtahuomion saanut laajennettua todellisuutta tehokkaasti hyödyntävä sovellus. [11.] Kuvassa 6 näkyy pelin laajennettua todellisuutta vuodelta 2016.



Kuva 6. Pokémon GO -peli hyödyntämässä AR-ympäristöä Applen iPhone-puhelimella vuonna 2016 [11].

Vuosi pelin julkaisun jälkeen, vuonna 2017, Apple julkaisi iOS 11 -käyttöjärjestelmänsä, joka lisäsi laajennetun todellisuuden tehokkuutta ARKit työkalulla [12, s. 8]. Niantic Labs lisäsi samalla ARKit-tuen peliinsä, joka vahvisti Pokémon GO:n implementaatiota laajennetusta todellisuudesta. Päivitys mahdollisti Pokémonin pysyvän paikallaan suhteessa oikeaan maailmaan ilman fyysisten merkkien käyttämistä, jolloin pelaaja pystyi lähestymään Pokémonia kävelemällä sitä kohti ja saamaan lisäpisteistä. Tämän lisäksi päivitys lisäsi immersiota suuresti, kun se teki mahdolliseksi virtuaalisten objektien reagoimisen fyysiseen ympäristöön. [13.] Vuonna 2017 Google julkaisi Android-laitteille ARCore-kehityspaketin, joka julkaistiin kuluttajien käyttöön valituille laitteille pikkuhiljaa vuoden 2018 aikana [12 s. 8; 14]. ARCore lisäsi samat päivitettyt mahdollisuudet myös Pokémon GO:n Android-pelaajille.

Applen ARKit ja Googlen ARCore lisäsivät laajennettua todellisuutta varten kehittämisen suosiota hyvällä dokumentoinnillaan ja vahvalla rajapinnallaan. Kun molemmat työkalut oli julkaistu, Unity Technologies loi niistä yhdistetyn paketin pelimoottorilleen, Unitylle.

Unityn ARFoundation julkaistiin Unityn versiossa 2018.1, ja se teki kehittämisestä laajennettua todellisuutta varten helposti lähestyttävää. Julkaisun ajankohdan jälkeen AR-ympäristössä toimivien mobiilipelien määrä kasvoi suuresti, etenkin iOS-laitteilla [15], mikä ennusti vahvaa tulevaisuutta laajennetulle todellisuudelle myös viihdemaailmassa.

Vuonna 2019 suomalainen startup-yritys Varjo esitteli uuden yhdistetyn todellisuuden laitteen nimellä XR-1. Laite on korkealaatuinen päässä pidettävä näyttölaite, eli HMD (Head Mounted Display), joka on suunnattu yrityksille ja ammattimaiseen käyttöön. Laitteen ominaisuuksiin kuuluu ihmissilmää vastaava näytön resoluutio [16], kaksi laadukasta kameraa laitteen etuosassa kamerasyötettä varten ja silmien asentoa seuraava anturi. Laitteesta on saatavilla vasta kehittäjille suunnattu versio, jota yritykset tai koulut voivat tilata sovelluskehitystä varten. Laite antaa kilpailevia laitteita paremman immersion laajennetussa todellisuudessa teknisillä ominaisuuksillaan ja Varjon kehittämällä laitteelle optimoidulla ohjelmistolla.

Varjon XR-1-laitetta käytetään jo erilaisissa simulaattoreissa, kuten Bohemia Interactive Simulationsin taisteluhelikopteri-AR-simulaatiossa. Kuvassa 7 on kuvankaappaus kyseisestä simulaatiosta, jossa näkyy käyttäjä fyysisessä ohjaamossa lentämässä virtuaalisessa tilassa.



Kuva 7. Varjon XR-1-laite käytössä Bohemia Interactive Simulationsin helikopteriohjaamოსimulaatiossa [16].

Uutena trendinä laajennetussa todellisuudessa on yhteistyön tekeminen laajennetun todellisuuden avulla. Erinäisiä sovelluksia on viime aikoina ilmestynyt, joiden yhtenä tärkeimpänä myyntivalttina on useamman henkilön yhteistyö tai läsnäolo laajennetun todellisuuden kautta. Esimerkiksi Mojang julkisti esiversion Minecraft Earth -mobiilipelistä vuonna 2019, ja siinä pelaajat pystyvät yhdessä luomaan Minecraft-luomuksia laajennetussa todellisuudessa [17]. Yhteistyö ja läsnäolo laajennetussa todellisuudessa ulottuu myös mobiilipelien ulkopuolelle, sillä vuonna 2018 Spatial esitteli kehityksessä olevan kokeiluversion holografisesta 3D-työtilasta etätyöskentelyyn [18]. Sovellus käyttää HMD-laitetta tuodakseen virtuaaliset representaatiot kollegoista käyttäjälle. Vuonna 2020 Spatialin on tarkoitus tuoda sovelluksestaan kuluttajille tarkoitettu versio [19].

2.2 Laajennetun todellisuuden monet muodot

Laajennettua todellisuutta hyödynnetään nykypäivänä vahvasti sekä teollisuuden käytänteissä että viihteen monimuotoisuudessa. Useat yritykset ovat jatkaneet Boeingin ja lanjäljissä käyttäen yhä kehittyneempää laajennettua todellisuutta tehostaakseen tuotantoa. Viihteessä monet yhtiöt ja pienkehittäjät käyttävät laajennettua todellisuutta luomaan uusia elämyksiä kuluttajalle tai vahvistaakseen ja uudelleen elävöittääkseen vanhoja viihdemuotoja, kuten pelaamista ja elokuvien katsomista.

Vaikka laajennettu todellisuus maallikolle saattaa tällä hetkellä näkyä vain erinäisissä mobiilisovelluksissa pääasiassa lasten käsissä, on laajennettu todellisuus aktiivisesti käytössä teollisuuden eri aloilla. Esimerkiksi lääketeollisuuden, autoteollisuuden, vaate-teollisuuden ja musiikkiteollisuuden aloilla laajennettua todellisuutta on käytetty erilaisissa formaateissa. Musiikkiteollisuuden ehkä tunnetuin ja menestynein laajennettua todellisuutta hyödyntänyt speaktaakkeli oli vuoden 2012 Coachella-festivaaleilla käytetty "hologrammi"-esitys edesmenneen Tupac Shakurin tähdittämänä [20, s. 18]. Vaikka käytetty "hologrammi" pohjautuikin jo 1800-luvulla kehitettyyn peilejä hyödyntävään ideaan, tämä kehitelty versio toi virtuaalisen hahmon lähes saumattomasti todellisuuteen tuhansien ihmisten eteen, joiden kanssa virtuaalinen esiintyjä pystyi kanssakäymään.

2.3 Kameraoptiikan perustietoja

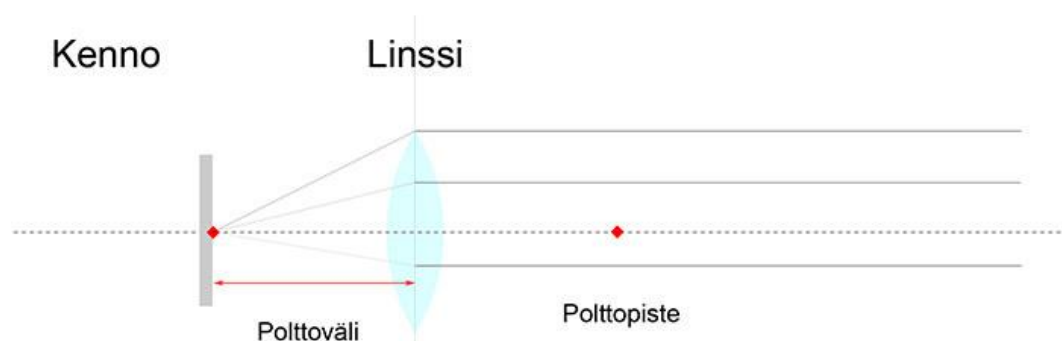
Kameraoptiikka pohjautuu muutamaankin peruskäsitteeseen:

- polttoväli
- aukko
- kennon koko
- linssin halkaisija
- hajoamispyräräjä
- syväterävyys.

Kaikki nämä peruskäsitteet luovat yhdessä kokonaisuuden, jolla pystytään laskemaan ja tuottamaan hyvin pitkälti minkälainen kuva vain. Suljinnopeus ei kuitenkaan kuulu listalle, sillä se vaikuttaa vain siihen, kuinka kauan valoa pääsee kameran sisään.

Polttoväli

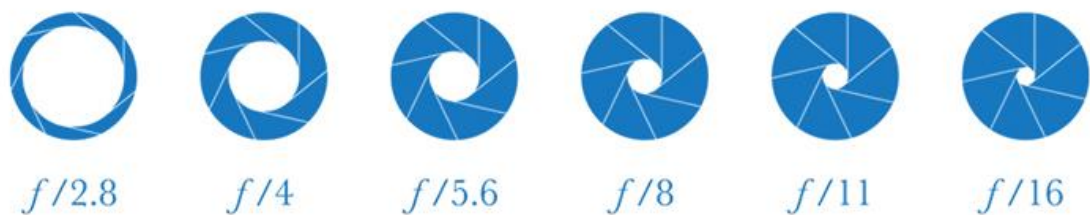
Polttovälillä, joka yleensä mitataan millimetreinä, tarkoitetaan linssin etäisyyttä kuvatasosta, joka digitaalisissa kameroissa on kenno. Polttoväli kertoo, kuinka laaja tai kapea kuvakulma objektiivilla, jota voidaan myös kutsua linssiksi tietyissä laitteissa, saadaan: pienemmällä polttovälillä kuvakulma on laajempi, ja suuremmalla polttovälillä kuvakulma on kapeampi. Polttoväli vaikuttaa myös vastaavasti suurennoksen määrään, kun polttovälin kasvaessa myös suurennos kasvaa [21]. Kuvassa 8 selitetään visuaalisesti, mikä polttoväli on.



Kuva 8. Kameran polttovälin visualisointi [22].

Aukko

Kameran objektiivin, tai linssin, aukolla mitataan, kuinka valovoimainen linssi on. Aukko itsessään koostuu perinteisissä kameraobjektiveissa useasta pienestä levystä, joilla voidaan säätää aukon kokoa. Aukon koko ilmaistaan yleisimmin f-numerolla, joka merkitään $f/\#$, eli esimerkiksi $f/1.8$. Mitä suurempi f-numero on, sitä vähemmän valoa pääsee läpi, ja fokusalue on suurempi. Kuvassa 9 visualisoidaan aukon koko f-numeron mukaan. Aukon koko ei kuitenkaan voi olla luku, sillä se lasketaan jakamalla polttoväli aukon fyysisellä halkaisijalla [23]. Esimerkiksi 50 mm:n objektiivi, jossa fyysinen aukon halkaisija on 28 mm, yleensä ilmaistaan merkinnällä 50 mm $f/1.8$, sillä $50 / 28 = 1,8$.



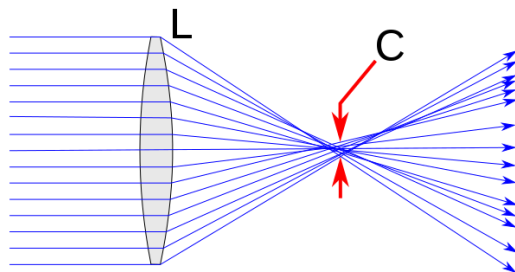
Kuva 9. Aukon koon visualisointi. Mitä suurempi f-numero on, sitä pienempi aukko ja sitä vähemmän valoa pääsee kennolle [24]

Aukon koko ja muoto vaikuttavat myös bokeeseen, eli syväterävyysalueen ulkopuolisten alueiden, ulkonäköön ja kokoon. Boke on japania ja tarkoittaa sumeutta, ja se on yleinen valokuvauksessa käytetty termi [25].

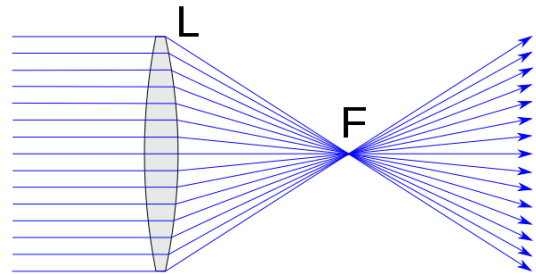
Hajoamisympyräraja ja kennon koko

Hajoamisympyräraja, yleisemmin vain hajoamisympyrä, on käsite, jolla mitataan hyväksyttävää fokuksen tasoa. Teoreettisesti optiikassa vain yksi piste voi olla yhtä aikaa fokuksessa, mikä tarkoittaa, että kaikki muut pisteet optiikan kuvastamana ovat enemmän tai vähemmän epäfokuksessa [26].

Käytännössä linseissä on aina pieniä epätäydellisyyksiä, joiden takia yhden pisteen fokus on käytännössä mahdoton, mutta erittäin pienen fokusympyrän saaminen on mahdollista. Kuvissa 10 ja 11 voidaan nähdä, kuinka täydellinen ja epätäydellinen linssi eroavat toisistaan ja kuinka se vaikuttaa fokukseen.



Kuva 10. Realistinen linssi L, jolla säteet menevät hajoamisympyräksi kutsutun alueen C läpi [27].



Kuva 11. Täydellinen linssi L, jolla kaikki säteet saadaan kulkemaan yhden pisteen F kautta [28].

Epätäydellisen linssin muodostama ympyrä kennolle ei siis ole täydellisessä fokuksessa, mutta jos tämä ympyrä on pienempi kuin hajoamisympyräraja, lyhyemmin CoC (circle of confusion), ihmissilmä ei pysty kertomaan eroa. Hajoamisympyrä lasketaan kennon koon mukaan, mutta hajoamisympyrä kasvaa myös lopullisen katsottavan median koon mukaisesti. Taulukossa 1 voidaan nähdä erilaisten kennojen hajoamisympyrärajan ja kennon koon suhde.

Taulukko 1. Eri formaattien ominaisuuksia. CoC laskettu Zeissin modernin kaavan mukaan jokaiselle formaatille. [29; 30; 31.]

Formaatti	Kennon koko	CoC	Rajauskerroin
1/2" kenno	6,4 mm x 4,8 mm	0,005 mm	5,41
1" kenno	8,8 mm x 13,2 mm	0,011 mm	2,72
Four Thirds System	13,5 mm x 18,0 mm	0,015 mm	2,0
APS-C	15,0 mm x 22,5 mm	0,018 mm	1,52
APS-H Canon	19,0 mm x 28,7 mm	0,023 mm	1,29
35 mm (full frame)	24,0 mm x 36,0 mm	0,029 mm	1,0

35 mm:n formaattia käytetään vakiona verrattessa muita formaatteja ja niille suunniteltuja linsejä. Kennon halkaisijan suhdetta 35 mm:n kennon halkaisijaan kutsutaan rajausker-toimeksi, jolla voidaan laskea pienemmälle formaatille suunnitellun linssin polttovälin koko 35 mm:n vakiossa. Tätä kutsutaan myös kinovastaavuudeksi. Esimerkiksi 1":n ken-nolla varustettu kamera 9 mm:n polttovälin linssillä voidaan sanoa käyttävän 24,5 mm:n kinovastaavaa linssiä, mikä on laskettavissa ylempään taulukon mukaisesti, sillä $9 \text{ mm} \times 2,72 = 24,48 \text{ mm}$.

Jokaisella linssillä on myös hyperfokaalinen piste, jossa linssin syväterävyysalue on suurimmillaan. Hyperfokaaliin pisteeseen tarkennetaan yleensä kuvattaessa maisemakuvia, jotta kuvaan saadaan mahdollisimman paljon tarkkuutta. Hyperfokaalisen pisteen avulla voidaan myös laskea syväterävyysalue, jos tiedetään fokuuspisteen etäisyys kamerasta [32].

Jotta projektissa pystyttäisiin simuloimaan syväterävyyttä ja simuloimaan erilaisia kame-roita virtuaalisesti, tarvitaan vahva tietopohja kameraoptiikasta ja tekniikasta. Ilman tark-kaa ja vahvaa ymmärrystä niistä, simuloitu syväterävyys virtuaalisilla objekteilla ei vas-taisi sitä syväterävyyttä, joka nähtäisiin fyysisissä objekteissa. Tämä rikkoisi immersion ja myös vähentäisi tarkkojen valintojen tekemisen helpottamisen tehokkuutta.

2.4 Optiset ominaisuuden laajennetussa todellisuudessa

Laajennettua todellisuutta voidaan toteuttaa pääasiallisesti kahdella eri tavalla: projisoi-malla virtuaalisia kuvia läpinäkyvälle pinnalle tai näytölle tai lisäämällä virtuaalisia objek-teja kamerasyötteeseen. Vain näistä jälkimmäinen pystyy hyödyntämään kameraoptii-kan tuomia etuja, mutta voi kärsiä huonommasta vastausajasta ja resoluutiosta kuin pro-jisointi läpinäkyvälle pinnalle. Huomattavana immersion vaikuttavana erona läpinäky-vän pinnan ja kamerasyötteen käytössä on virtuaalisten objektien läpinäkyvyys. Kame-rasyötettä käytettäessä virtuaaliset objektit voivat olla näennäisesti täysin kiinteitä, toisin kuin läpinäkyvää pintaa käytettäessä.

Optisia ominaisuuksia ei kuitenkaan vielä hyödynnetä suuressa määrin laajennettua todellisuutta kehitettäessä, vaan oletettavasti kameraa käytetään pääasiassa vain jo valmiiksi laajan laitteistovalikoiman ja suuren käyttäjämäärän vuoksi [33].

3 Immersion ja työkalujen kehittäminen

3.1 Tavoitteet

Insinööriyöprojektin tavoitteena oli kasvattaa immersion tunnetta käytettäessä laajennettua todellisuutta ja mahdollistaa parempien sovellusten kehittäminen tarjoamalla tapa tehdä tarkkoja valintoja ilman suurta menetystä päätelaitteen tehossa. Projekti suunniteltiin ja toteutettiin mahdollisimman laajaa päätelaitteivalikoimaa varten, kuitenkin keskittyen mobiililaitteisiin Gribbing Oy:n toiveesta. Gribbing Oy:n pyynnöstä projektissa oli tarkoitus tehdä selvitys projektissa kehitettävän teknologian patentoitavuudesta.

Tavoite oli käyttää päätelaitteen kamerasta saatavaa metadataa simuloimaan todellisuutta vastaava syväterävyyttä virtuaalisille objekteille sekä käyttää tietoa virtuaalisten objektien sijainnista suhteessa syväterävyysalueeseen, jotta mahdollistetaan objektien jakaminen kahteen ryhmään. Objektien jakamisella fokuksessa oleviin ja ei-fokuksessa oleviin saadaan helpotettua tarkkojen valintojen tekoa, kun syväterävyysalue pienenee. Tämän lisäksi lisätavoitteena oli antaa käyttäjälle mahdollisuus vaihtaa fokuksistettää sekä todellisen maailman mukaan että virtuaalisen maailman mukaan, esimerkiksi koskettamalla puhelimen näytöllä olevaa virtuaalista objektia.

3.2 Edistyneen laajennetun todellisuuden määritelmä

Arthur Clarken kolmannen lain mukaan kaikki riittävän kehittynyt teknologia on erottamaton taikuudesta [34, s. 14, 21, 36] ja edistyneen laajennetun todellisuuden kuuluu tähdätä parantamaan immersiota riittävästi tuntuakseen niin epätodellisen todelliselta, että käyttäjä voisi kuvailla sitä taiaksi. Laajennetun todellisuuden täytyy olla vahvasti im-

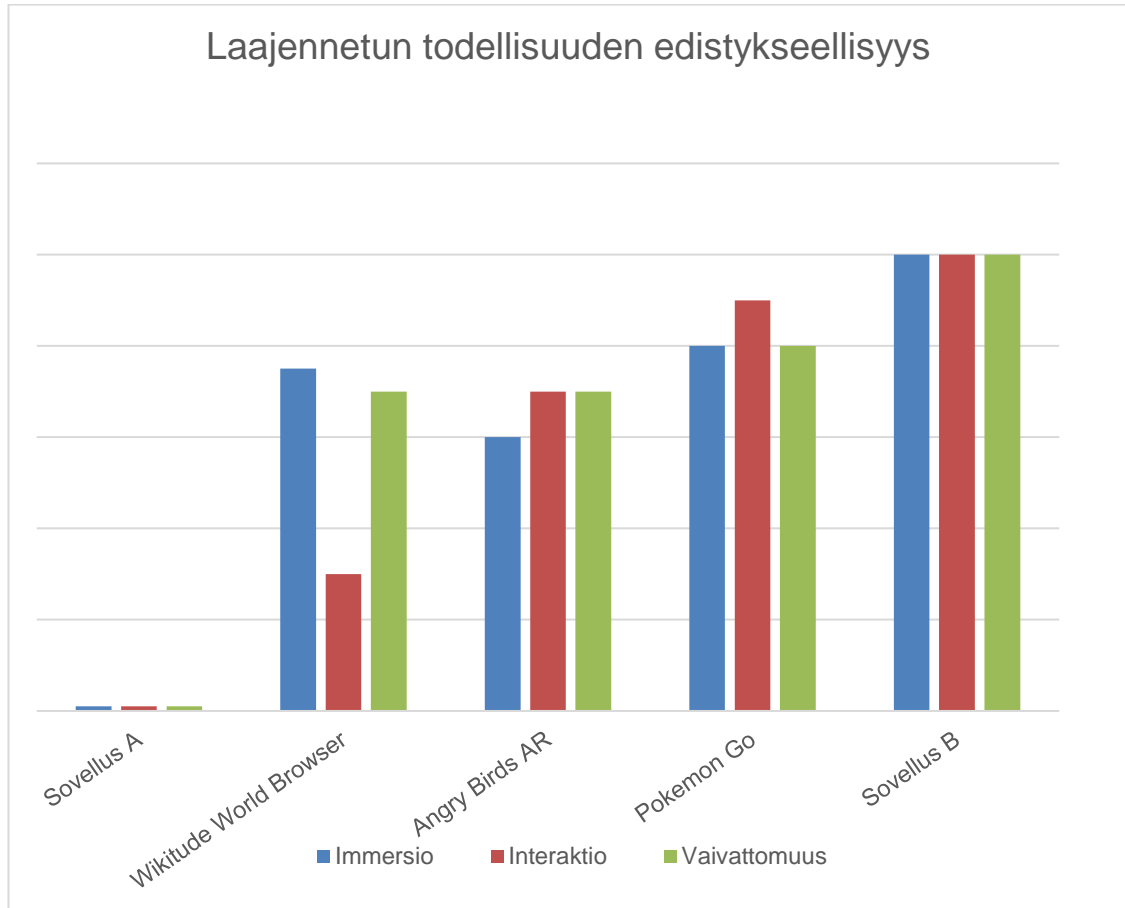
mersoivaa ollakseen edistynyttä. Jotta immersion voidaan sanoa olevan vahvaa, käyttäjän ei kuuluisi voida erottaa virtuaalista objektia fyysisestä ilman, että hän koettaa erottaa objektit kosketuksella tai poistumalla laajennetusta todellisuudesta.

Pelkästään immersion vahvuus ei kuitenkaan riitä, kun puhutaan edistyneestä laajennetusta todellisuudesta. Sekä intuitiivinen interaktio AR-ympäristön kanssa että AR-ympäristön vaivaton ja nopea luominen ovat olennaisia. Parhaassa tilanteessa käyttäjän ei tarvitsisi edes luoda ympäristöä, vaan ympäristö olisi valmiina tapauskohtaisessa laitteessa odottaen vain käyttäjän syötettä.

Laajennetun todellisuuden edistyneisyyden tasoa tulisi siis mitata seuraavilla asteikoilla:

- virtuaalisen ja fyysisen ympäristön välinen immersio
- laajennetun todellisuuden ympäristön kanssakäymisen intuitiivisuus
- laajennetun todellisuuden ympäristön luomisen vaivattomuus.

Tutkimalla jo olemassa olevia laajennettua todellisuutta hyödyntäviä sovelluksia, voidaan tehdä havainnollistava kaavio aiempia asteikoita käyttämällä. Asteikon määrittelyä varten käytetään asteikon ääripäiden kuvailuun kuvitteellisia sovelluksia A ja B. Asteikolla oleville sovelluksille on mielivaltaisesti asetettu arvoja esimerkin vuoksi, ja tämä on visualisoitu kuvassa 12.



Kuva 12. Esimerkki sovellusten laajennetun todellisuuden edistykseellisyys kartoittamisesta.

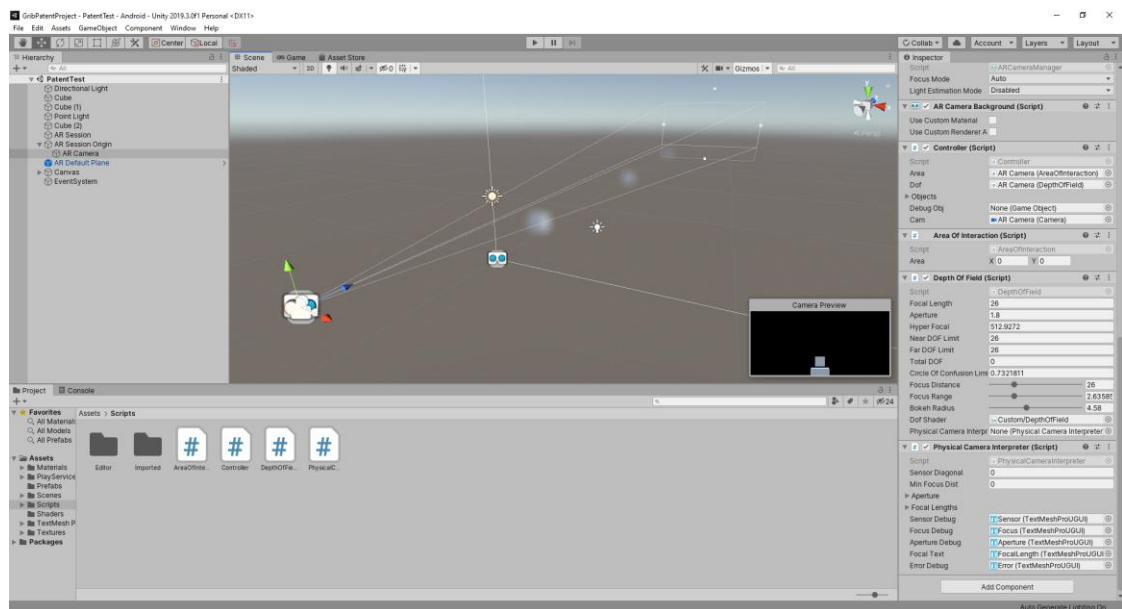
Edistynyt laajennettu todellisuus kuluttaa myös enemmän prosessointitehoa taatakseen visuaalisen tarkkuuden ja vahvan immersion. Suuri tehon tarve ei kuitenkaan saa vaikuttaa sovelluksen suorituskykyyn tai virkistystaajuuteen, joten edistyneen laajennetun todellisuuden tulee myös olla hyvin optimoitu tai sovelluksen vaatiman prosessoinnin tulisi tapahtua etänä verkkoyhteyden avulla.

Laajennetun todellisuuden sovellusten edistykseellisyys oli olennainen osa Gribbing Oy:lle kehitettävän konseptitodistusprojektin suunnittelua ja tulevaisuuden näkymää, mutta ohjelmiston kehitys yksinään ei takaa laajennetun todellisuuden edistystä. Laitteisto laajennettua todellisuutta varten tuli myös kehittää, jotta vahva immersio, helppokäyttöisyys ja intuitiivinen kanssakäyminen toteutuisivat. Laitteiston kehitys keskittyi pääasiassa älypuhelimien ja HMD-laitteiden kehittämiseen, jolloin edistyneemmän laajennetun

todellisuuden kehittämistä auttaviksi ominaisuuksiksi voitaisiin ehdottaa laitteen keveyttä, paikallista prosessointitehoa, verkkoliitännäisyyttä, anturien määrää ja laatua sekä laitteen näytön tai näyttöjen resoluutiota ja kokoa.

3.3 Teknologiat

Projektin toimivuuden osoittamiseksi käytettiin aluksi Unity-pelimoottoria, sillä projektin toteutusta pyytänyt Gribbing Oy käyttää samaa pelimoottoria kehittämässään tuotteessa, ja projektin oli tarkoitus lopulta tulla osaksi yrityksen tuotetta. Kehittäessä Unityllä käytettiin ohjelmointiin pääasiassa kieltä C#, mutta projektin graafisen luonteen vuoksi käytettiin myös Microsoftin kehittämää High-Level Shader Language (HLSL) -graafikka-ohjelmointikieltä, ja päätelaitteen kanssa kommunikointiin käytettiin laitteen natiivia ohjelmointikieltä. Projektia testattiin älypuhelimella, joka käyttää Android-käyttöjärjestelmää, jonka natiiviohjelmointikieli on Java. Koska projekti oli suunnattu käytettäväksi laajennetussa todellisuudessa, ja testivaiheessa Androidilla, käytettiin Googlen ARCore-kirjastoja laajennetun todellisuuden testiympäristön luontiin. Kuvassa 13 on esillä kehitysympäristö Unity-pelimoottorissa.



Kuva 13. Kehitysympäristö Unity pelimoottorilla. Oikeassa laidassa näkyy syväterävyysohjelman laskemia arvoja, joita käytetään syväterävyyden simulointiin.

Projektia varten kirjoitettava koodi kirjoitettiin Microsoftin ilmaisella Visual Studio Code -ohjelmalla, ja testattaessa käytettiin Googlen Android Debug Bridge -ohjelmaa (ADB), joka on osa Android Studion asennusta. ADB on ohjelma, jota pystyy käyttämään suoraan tietokoneen natiivista konsolista. Visual Studio Code pystyy käsittelemään konsolia, joten ADB:tä voidaan myös käyttää sen kautta. ADB:llä voidaan saada Android-laitteen sisäisiä virhekoodeja ja muita ohjelmiston viestejä testattaessa laitteella projektia.

4 Kameraoptiikan hyödyntäminen AR-kehityksessä

4.1 Projektin määrittely ja tavoitteet

Insinööriöprojektin tavoitteena oli kehittää uutta teknologiaa, jolla laajennetun todellisuuden immersiota saadaan syvennettyä ja tarkkojen valintojen tekoa helpotettua. Gribbing Oy, jolle projekti tuotettiin, pyysi projektin tuottavan ratkaisun sen AR-3D-mallinnus-mobiilisovellukseen, jolla voidaan tehdä tarkkoja valintoja verteksien käsittelyä varten. Ratkaisun kuului myös olla elegantti ja intuitiivinen käyttäjälle.

Gribbing Oy toivoi, että projekti toteutettaisiin mahdollisimman nopealla aikataululla pisteeseen, jossa kehitettävästä teknologiasta voitaisiin lähettää patenttihakemus. Ennen kaikkea projektin siis täytyi toimia konseptitodistuksena eikä välttämättä lopullisena tuotteena Gribbing Oy:n 3D-mallinnusohjelmaan.

4.2 Projektin lähtökohta

Projektin lähtökohtana oli Gribbing Oy:n (Grib) pyytämä konseptitodistus syväterävyyden käyttämisestä mahdollisten valintojen rajaamiseen laajennetussa todellisuudessa. Grib on kehittänyt mobiililaitteille laajennetun todellisuuden 3D-mallinnusohjelman Grib3D, johon se haluaa kehittää tavan tehdä tarkkoja valintoja helpottamaan 3D-mallintamista. 3D-mallintamisessa tarkkojen valintojen tekeminen helpottaa esimerkiksi verteksien käsittelyä, joka on nykyisellä AR-teknologialla haastavaa.

Projekti alkoi noin kuukauden kestäneellä tutkimusjaksolla, jossa etsittiin jo olemassa olevia samanoloisia ratkaisuja, tutkittiin, kuinka projektin esittämä ratkaisu olisi parempi tai erilainen, ja tarkoituksena oli myös tehdä esiselvitys projektissa kehitettävän teknologian patentoitavuudesta.

Tutkimusjakson aikana ei löydetty vastaavalla tavalla kehitettyä ratkaisua. Vaikutti siltä, ettei vastaavaa ongelmaa tarkkojen valintojen tekemisestä laajennetussa todellisuudessa ole koetettu ratkaista aiemmin. Jakson aikana kuitenkin löydettiin monta tutkimusta, jotka selvittivät syväterävyyden simuloinnin käytännöllisyyttä ja mahdollisuutta laajennetussa todellisuudessa. Valitettavasti käytännössä kaikki löydetty tutkimukset olivat liki vuosikymmenen vanhoja, ja tutkimustulosten negatiivisuus senaikaisten laitteiden tehoista ei ollut enää ajankohtaista. Mitään nykyaikaista selvitystä syväterävyydestä laajennetun todellisuuden työkaluna ei löydetty.

Tutkimusjakson puolivälissä painopiste siirrettiin vanhojen ratkaisujen etsimisestä projektin esittämän ratkaisun suunnitteluun ja käytettävyyden tutkimiseen. Käytettävyyden tutkiminen osoittautui kuitenkin haastavaksi, sillä aiempaa dataa asiasta ei ollut saatavilla. Tutkiminen tehtiin täten pääasiassa suunnittelemalla eri lähestymistapoja reilun viikon ajan ja vertailemalla niitä toisiinsa. Lopulliseksi lähestymistavaksi valittiin yhteistyössä Gribbing Oy:n kanssa syväterävyyden simuloiminen käyttämällä laitteen kameran metadaa, jotta virtuaaliset objektit olisivat samassa fokuksessa kuin fyysiset objektit samalla etäisyydellä kamerasta. Tämän lähestymistavan todettiin olevan intuitiivisin ja helpoimmin laajennettavissa eri laitteille, sillä se ei yritä pakottaa syväterävyyttä oikean maailman kuvasyötteeseen, joka voi tuottaa pahoinvointia käytettäessä päässä pidettävää näyttöä eli HMD:tä (Head Mounted Display).

4.3 Matemaattinen teoria ja tekninen työ

Jotta projektista saatiin mahdollisimman hyvin laajennettava erilaisille alustoille ja laitteistolle, koko projektin täytyi pohjautua laitteiston antamille arvoille. Tämä tarkoitti pääasiassa kameran kennon kokoa, linssin pituutta, tarkennusetäisyyttä ja linssin valovoi-

maisuuutta eli aukon kokoa. Näillä tiedoilla pystyttiin suorittamaan tärkeimmät laskut simuloimaan optiset ominaisuudet virtuaalisten objektien kuvantamiseen projektia ohjelmoitaessa.

Projektille tärkeintä oli syväterävyyden laskeminen, sillä koko projekti pohjautui syväterävyyden ja siihen liittyvien ominaisuuksien simuloimiseen laitteiston kamerasta saadun metadatan avulla, ks. kaava 1.

$$DOF = \frac{2u^2 Nc}{f^2} \quad (1)$$

DOF on syväterävyys

u on tarkennusetäisyys

N on f-numero

c on hajoamispyyrä

f on polttoväli

Laitteistolta sai kuitenkin vain kolme arvoa suoraan syväterävyyttä laskevaan kaavaan, polttovälin, aukon koon ja tarkennusetäisyyden. Tämä jätti hajoamispyyrän vielä laskettavaksi, mutta hajoamispyyrän suhteellisuus sisällön katsomisetäisyyteen, katsojan näön tarkkuuteen ja lopullisen formaatin muotoon tekee kaavasta monimutkaisen ja tapauskohtaisen laskea. Kuitenkin on olemassa yleiskäytetty pelkistetty kaava, Zeissin kaava [35], jolla voidaan laskea arvioitu hajoamispyyrä (kaava 2).

$$c = d / 1730 \quad (2)$$

c on hajoamispyyrä

d on formaatti

Luku 1730 pohjautuu 35 mm:n formaatille hieman tavanomaista tiukemman hajoamispyyrän ja formaatin diagonaalin suhteeseen. Zeiss suosittelee perinteiselle medialle arvoa 1000 ja modernille medialle arvoa 1500 [31, s. 3], mutta jotta voitiin varmistaa projektin laatu mahdollisimman monella eri laitteella käytettiin arvoa 1730 takaamaan

mahdollisimman tiukka hajoamispyyrä. Toinen mahdollinen tapa laskea hajoamispyyrä yksinkertaistetusti olisi ollut jakaa linssin polttoväli luvulla 1720, kuten Kodak suosittelee [36], mutta sensorin koon käyttäminen antaa tasaisemman arvon eri laitteiden välillä.

Pelkkä syväterävyys ei kuitenkaan riittänyt selvittämään, onko objekti syväterävyysalueella, mikä on olennainen tieto Gribbing Oy:n tekemän tutkintapyynnön täyttämiseksi. Tämä selvitettiin laskemalla syväterävyysalueen rajat käyttämällä fokuksipisteen etäisyyttä ja kameran hyperfokaalipistettä (kaava 3).

$$H = \frac{f^2}{Nc} \quad (3)$$

H on hyperfokaalipiste

f on polttoväli

N on f-numero

c on hajoamispyyrä

Hyperfokaalin pisteen laskemisen avulla voidaan laskea myös syväterävyysalueen koko hyödyntäen kameran metadatasta tietoa fokuksipisteen etäisyydestä. Jotta voidaan saada syväterävyysalueen koko, pitää syväterävyysalueen rajat laskea. Syväterävyysalueen kameraa lähempänä oleva raja lasketaan yhtälöllä 4.

$$H_n = \frac{Hu}{H + (u - f)} \quad (4)$$

jossa H_n on lähiraja, H on hyperfokaalinen piste, u on tarkennusetäisyys ja f on polttoväli. Hyvin vastaavan oloisella kaavalla laskettiin myös syväterävyysalueen kamerasta kauempana oleva raja (kaava 5).

$$H_f = \frac{Hu}{H - (u - f)} \quad (5)$$

H_f on syväterävyysalueen etäraja

Kun kumpikin raja oli mahdollista laskea, se teki virtuaalisten objektien käsittelystä helpoa. Projektin koodipohja oli jaettu neljään eri luokkaan: kontrolleriin, fyysisen kameran käsittelijään, syväterävyyden simulointiin ja aktiivisen alueen käsittelijään. Sen lisäksi projektille olennainen osa oli sävytin (shader), jolla päätelaitteen näytönohjaimelle annettiin ohjeet renderoida simuloitu syväterävyys. "Shader" on yleensä suomennettu varjostimeksi, mutta grafiikkakontekstiin paremmin sopivaksi käännökseksi on ehdotettu sanaa sävytin [37].

Projektin koodipohjan rakenteen kulku alkaa kontrollerin kutsuessa fyysisen kameran käsittelijää, joka projektin nopean testattavuuden vuoksi kirjoitettiin Android-pohjaiselle laitteelle käyttäen C# -ohjelmointikieltä kutsuamaan laitteen natiivia Java-koodia. Käsittelijä kerää laitteesta laitteen kameran kennon koon, kaikki mahdolliset primäärikameran aukon koot, pienimmän mahdollisen tarkennusetäisyyden ja kaikki mahdolliset primäärikameran polttovälit. Kerättyään tiedot onnistuneesti käsittelijä lähettää datan takaisin kontrollerille. Esimerkkikoodissa 1 on osa fyysisen kameran käsittelijän ohjelmaa, josta voidaan nähdä hieman, kuinka tietoa haetaan laitteelta.

```

AndroidJavaObject sensorKey = cameraChars.GetStatic
    <AndroidJavaObject>
    ("SENSOR_INFO_PHYSICAL_SIZE");

AndroidJavaObject apertureKey = cameraChars.GetStatic
    <AndroidJavaObject>
    ("LENS_INFO_AVAILABLE_APERTURES");

AndroidJavaObject focusKey = cameraChars.GetStatic
    <AndroidJavaObject>
    ("LENS_INFO_MINIMUM_FOCUS_DISTANCE");

AndroidJavaObject focalKey = cameraChars.GetStatic
    <AndroidJavaObject>
    ("LENS_INFO_AVAILABLE_FOCAL_LENGTHS");

AndroidJavaObject sizeF = cameraChars.Call

```

```

        <AndroidJavaObject>("get", sensorKey);

        AndroidJavaObject focusFloat = cameraChars.Call
            <AndroidJavaObject>("get", focusKey);

        MinFocusDist = focusFloat.Call<float>("floatValue");
        Aperture = cameraChars.Call<float[]>("get", apertureKey);
        FocalLengths = cameraChars.Call<float[]>("get", focalKey);
    
```

Esimerkkikoodi 1. Osa fyysisen kameran käsittelijän koodia.

Kontrolleri ei itsessään käytä fyysisen kameran käsittelijältä saatua dataa, vaan siirtää sen eteenpäin syväterävyyden simulointiin tarkoitettulle luokalle. Kontrolleri kuitenkin kerää tiedot kaikista virtuaalisista objekteista listaan, jotta niiden kanssa työskentely myöhemmin ohjelmassa olisi helppoa. Projektin testausta helpottamaan kontrolleri myös luo pienen pallon, joka tulee visualisoimaan fokuksipistettä.

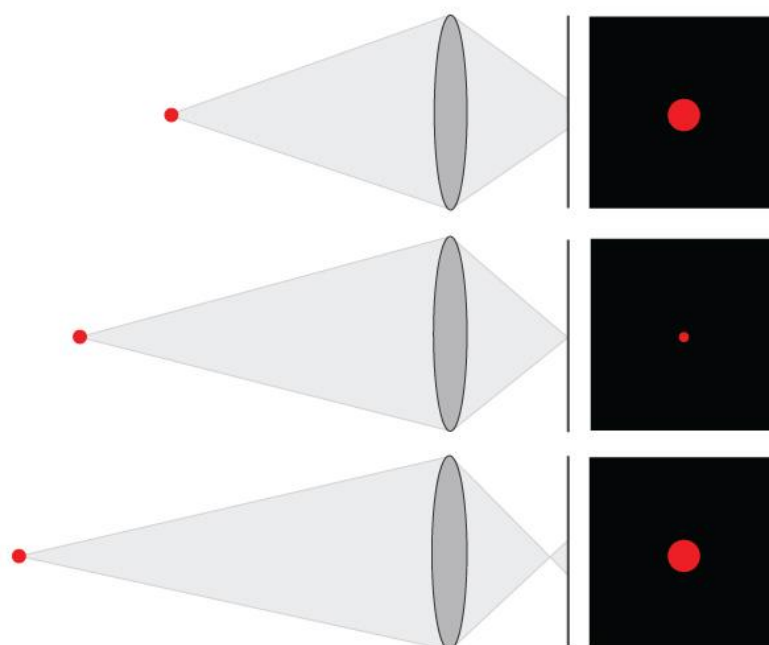
Syväterävyyttä simuloiva luokka tulee kutsutuksi kontrollerista, ja samalla se saa välitetyn metadatan fyysisestä kamerasta. Luokka käyttää saamaansa metadataa suorittaakseen laskutoimitukset simuloinnin mahdollistamiseen. Aiemmin selitetyistä yhtälöistä pystyy näkemään, että ensimmäinen laskettava asia on hajoamisympyrä. Hajoamisympyrän laskemisen jälkeen luokka laskee hyperfokaalin pisteen ja syväterävyyden rajat, mutta luokka ei käytä niitä simulointia varten vaan säilyttää tämän tiedon kontrolleria varten. Vielä näiden laskutoimitusten jälkeen lasketaan syväterävyys kaavalla 1.

Projektin testaamisen yksinkertaistamiseksi syväterävyyttä simuloiva luokka luo uuden materiaalin käyttäen projektia varten kirjoitettua syväterävyyssävyttintä. Tälle sävyttimelle syväterävyyttä simuloiva luokka antaa arvoiksi tarkennusetäisyyden ja syväterävyyden, eli syväterävyyden alueen koon.

Sävyttimen tehtävänä on antaa komentoja näytönohjaimelle, jotta visuaalinen representaatio syväterävyydestä toteutuisi. Sävyttin antaa nämä komennot viidessä eri kierroksessa, jotka voidaan jakaa hajoamisympyräkierrokseksi, esisuodatinkierrokseksi, bokekierrokseksi, jälkisuodatinkierrokseksi ja yhdistämiskierrokseksi. Sävyttin käy läpi pieniä paloja virtuaalikameran syötettä kerrallaan ja pysyy samassa päivitystaajuudessa kuin laitteen oikea kamera.

Ensimmäisellä kierroksella, hajoamispyyräkierroksella, sävytin käyttää virtuaalisesta kamerasta saatua syvyysdataa ja fyysisestä kamerasta saatua tarkennusetäisyyttä sekä syväterävyysaluetta laskeakseen jokaiselle virtuaaliselle pisteelle sen oman hajoamispyyrän. Toisella kierroksella sävytin pienentää hajoamispyyrän ja väritekstuurin otosta puolella, jotta ohjelma säästää resursseja. Pienentäessään otosta sävytin ottaa neljä vierekkäistä korkealaatuista otosta tekstuurin väridatasta ja laskee niistä keskiarvon sekä tallentaa syvyysdatasta suurimman absoluuttisen arvon.

Kolmas kierros sävyttimessä käsittää boke-efektin luomisen ottamalla otoksen renderoitavan palan tekseleistä, eli niin kutsutuista tekstuuripikseleistä, ja laskemalla niistä keskiarvon. Tämäkin olisi kuitenkin ollut raskas ohjelmalle suorittaa täyden resoluution otoksella, joten otos pienennettiin puoleen. Jotta boke-efekti ei olisi tekstelien vuoksi neliskulmainen, käytetään listaa hyväksyttävistä arvoista poistamaan keskiarvosta etäisimmät arvot ympyrän muodossa. Jotta boke-efektin tekemät ympyrät kasvaisivat suhteessa etäisyyteen polttopisteestä, laskuun lisätään mukaan aiemmin laskettu puolen resoluution hajoamispyyrädata. Kuva 14 auttaa visualisoimaan hajoamispyyrää ja boke-efektiä. Samalla kierroksella syväterävyys efekti jaetaan kahteen osaan, etualaan ja taka-alaan, jotta yhdistämiskierroksella voidaan välttää päällekkäiset eri fokuksessa olevat alueet.



Kuva 14. Hajoamispyyrän visualisointi [38]. Keskimäinen on ympyrä alle hajoamispyyrärajan, jolloin ihmissilmä ei pysty erottamaan sitä pisteestä. Ulommat tilanteet visualisoivat myös hyvin, kuinka boke syntyy ja kuinka sen koko on riippuvainen etäisyydestä polttopisteeseen.

Neljännellä kierroksella, eli jälkisuodatinkierroksella, tehdään boke-efektistä pehmeämpi ja hieman tasaisempi, mikä lisää gaussilaista sumennusta puolikkaan tekselin etäisyydellä renderoitavasta pisteestä käyttäen jälleen puolta täydestä resoluutiosta. Viidennessä ja viimeisessä kierroksessa yhdistetään alkuperäiseen täyden resoluution virtuaalikameran syötteeseen puolikkaan resoluution syväterävyys efekti kahdessa osassa. Alkuperäinen kamerasyöte on täysin fokuksessa, joten sekä syväterävyys efektin etuala että taka-ala yhdistetään tasaisesti alkuperäiseen kuvaan niistä kohdista, joissa hajoamisympyrä on alle hajoamisympyrärajan.

Sävytin renderoi syväterävyys efektiä jatkuvasti ohjelman ollessa päällä, ja samaan aikaan aktiivisen alueen käsittelijä ottaa vastaan dataa kontrollerilta, jossa on laskettu hyperfokaalipiste ja syväterävyys alueen eturaja ja takaraja. Käsittelijä saa myös tiedon kaikista renderoitavista virtuaalisista objekteista kontrollerilta. Aktiivisen alueen käsittelijä tarkistaa, onko virtuaalinen objekti syväterävyys alueella vai ei. Jos objekti on käsittelijän mukaan alueella, on objekti vapaa käyttäjän kanssa kanssakäymiseen. Kuvassa 15 voidaan nähdä yksinkertaistettu kaavio projektin luokkien välisestä kommunikoinnista.



Kuva 15. Yksinkertainen visualisaatio projektin luokkien kommunikoinnista.

Kokonaisuudessaan ohjelma ei ole kovin monimutkainen taikka pitkä. Suurin osa projektin kehittämiseen kuluneesta ajasta menikin projektin suunnitteluun ja matematiikan selvittämiseen sekä projektin iterointiin. Lopulliseen koodirakenteeseen päädyttiin kokeilun ja virheiden kautta, mutta lopullinen koodirakenne toimii luotettavasti ja on suhteellisen selvä lukea.

4.4 Mobiiliteknologian haasteet

Suurena kynnyksenä projektin kehityksessä olivat mobiilikameroiden optiset ominaisuudet ja niiden osoittamat rajoitukset. Monet älypuhelimien valmistajat jättävät puhelimen kameramoduulista dynaamisen aukon pois säästääkseen tilaa, minkä vuoksi kameran syväterävyysalueen kokoa ei voi säätää ilman fokuksipisteen siirtämistä. Kun fokuksipistettä siirretään lähemmäs kameran linssiä, fokusalue pienenee. Vastaavasti siirrettäessä fokuksipistettä kauemmas linssistä syväterävyysalue kasvaa kaavan 1 mukaisesti.

Puhelimeissa kuvakennon koko on myös tavallisesti pienempi kuin perinteisissä kameroissa. Tämä vaikuttaa suurimpaan osaan optisista ominaisuuksista, kuten syväterävyyteen ja hajoamispyyrään, jolloin toivotun lopputuloksen vahvuus jää heikommaksi. Ongelma tosin todennäköisesti ratkeaa teknologian kehityksen myötä, kun mobiililaitteiden valmistajat alkavat käyttää suurempia kuvakenttiä laitteissaan.

4.5 Projektin testaus

Insinööriöprojektissa kehitettyä simulointitekniikkaa testattiin aktiivisesti kehityksen aikana testisovelluksen avulla, jotta voitiin varmistaa sen soveltuvuus patenttihakemusta varten. Gribbing Oy tarjosi asiantuntijan, joka hoiti tarkkailun patenttihakemusta varten ja myös kirjoitti patenttihakemuksen.

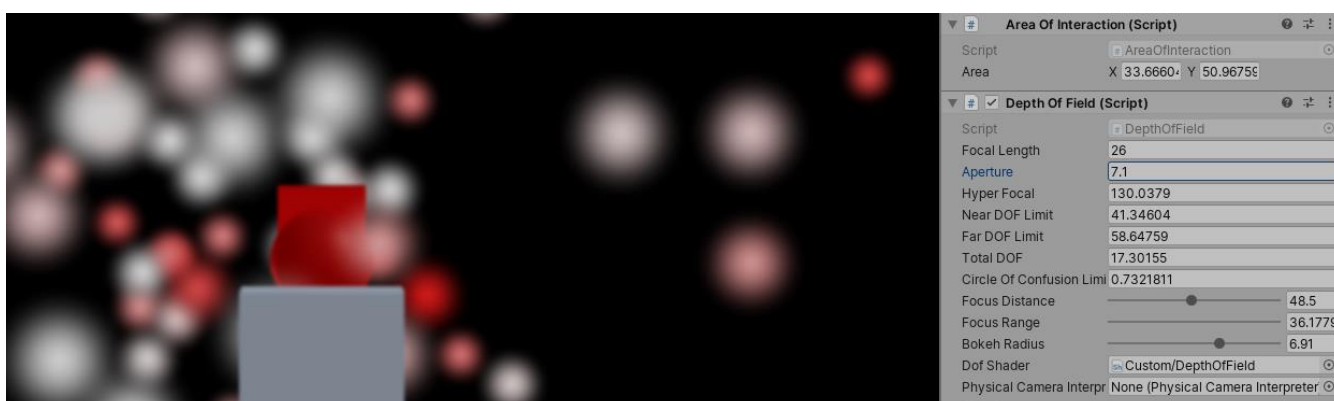
Sovellusta testattiin Asus Zenfone 6 -puhelimella, jossa on 1/2" kenno ja 26 mm:n f1.8 -kinovastaavalinssi. Kenno on keskivertopuhelinta, 1/6" -kennoista, suurempi ja sen takia

sopiva testaamaan projektin käytettävyyttä lähitulevaisuuden teknologialla. Samsung on julkaisemassa uuden 1/1.33” -kennon [39], ja useat puhelinvalmistajat käyttävät jo ennuudesta Samsungin kennoja, joten Samsungin uusi kenno tulee todennäköisesti käyttöön muidenkin valmistajien puhelimissa.

Käytännössä syväterävyyden simulointia ja fokusalueen erottamista testattiin rakentamalla testiympäristö Unityllä ja tekemällä testisovellus Android-puhelimelle. Testiympäristö koostui kolmesta kuutiosta, AR-kamerasta ja pallosta. Kuutioiden tarkoituksena oli toimia testiobjekteina syväterävyyden testaamiseen, ja palloa käytettiin visualisoimaan polttopiste. Kuutioiden väri muutettiin punaiseksi, kun ne olivat fokusalueen sisällä eli valmiina kanssakäyntiin, kuten kuvassa 17 voidaan nähdä. Sen lisäksi testiympäristössä näkyi kerätty metadata tekstinä puhelimen ruudun vasemmassa yläkulmassa, kuten kuvassa 16 näkyy.

```
Sensor diagonal: 8
Aperture: 1.79
Min focus dist: 10
Focal lenght: 4.74
Crop factor: 5.41
Relative length: 25.6434
```

Kuva 16. Testiympäristössä nähtävä data. Kuvassa on kennon halkaisija, aukon koko, minimi tarkennusetäisyys, polttoväli, rajauskerroin ja kinovastaava polttoväli.



Kuva 17. Unityn sisäinen testiympäristö. Kuvan oikeassa laidassa on simulointia varten muutettavia arvoja ja niistä laskettuja arvoja.

Tärkein testaus suoritettiin Asus Zenfone 6 -puhelimella, jotta ohjelma sai oikeaa dataa simulointia varten. Mutta yhdellä laitteella testaaminen todettiin riittämättömäksi, joten Unityn sisälle luotiin erillinen virtuaalinen kamera muiden fyysisten kameroiden simulointia varten. Kuvan 17 oikeassa reunassa voidaan nähdä simuloitavan puhelimen tietoja, kennon kokoa lukuun ottamatta. Kennon kokoa ei päädytty simuloimaan erikseen, sillä sitä pystyttiin säätämään muuttamalla Unityn pelinäkömänn resoluutiota.

5 Tulokset ja tulevaisuus

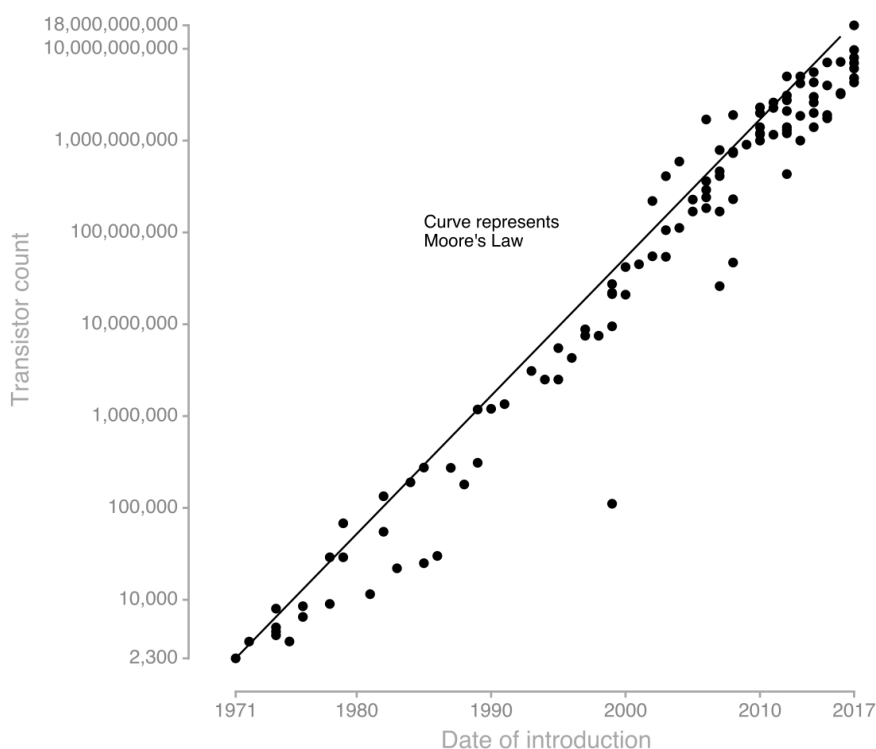
5.1 Projektin lopputulos

Insinööriyöprojekti osoitti kameraoptiikkaa simuloimalla pystyttävän lisäämään immersiota huomattavissa määrin ainakin mobiililaitteilla, joilla konseptitodistusta varten tehtyä sovellusta testattiin. Vaikka virtuaalisten objektien esteettinen taso ei vastannut oikean maailman tasoa, pystyi syväterävyyden tarkka simuloiminen vähentämään huomattavaa eroa virtuaalisten ja fyysisten objektien välillä. Myös käyttäjän mahdollisten valintojen rajoittaminen syväterävyyttä käyttämällä tuntui onnistuneelta ja intuitiiviselta, vaikkakin turhan jäykältä mobiilikameroiden teknisen puutteellisuuden vuoksi.

Vaikka projektia testattiin vain Gribbing Oy:n työntekijöiden parissa, saatiin testauksessa kerättyä riittävästi dataa immersion lisäyksestä ja kanssakäymisen kontrolloinnista, jotta projekti voitiin todeta onnistuneeksi. Projektia testatessa huomattiin myös, että syväterävyyden simuloiminen helpotti virtuaalisen objektin sijainnin paikantamista suhteessa oikeaan maailmaan.

Kuitenkin heikkoja kohtia projektin lopullisesta toteutuksesta löytyi, ja niiden todettiin pohjautuvan suhteellisen hatarasti suunniteltuun toteutustapaan. Testisovellus syväterävyyden simulointia varten oli suunniteltu toimivan vain Android-laitteilla testauksen helpottamiseksi ja virtaviivaistamiseksi, mutta tämän vuoksi kehitettyä simulointitekniikkaa

ei voida suoraan lisätä Gribbing Oy:n tuotteeseen ilman laajaa jatkokehitystä ja koodipohjan uudelleen rakentamista, sillä Gribbing Oy:n tuotteen käyttäjäkunta on pääasiassa iOS-laitteistoa käyttävää. Lisäksi projektin testisovellus optimointiyrityksistä huolimatta kärsi huomattavasta virkistystaajuuden alenemisesta, kun virtuaalisia objekteja lisättiin. Vaikka virtuaalisten objektien runsas lisääminen laskikin testisovelluksen käyttökokemuksen tasoa, se ei tehnyt siitä käyttökelvotonta. Käyttökokemuksen tason voidaan olettaa nousevan laitteistojen ja niiden tehon kehityksen myötä seuraten Mooren lakia [40], jonka kuvaaja on visualisoitu kuvassa 18.



Kuva 18. Visualisointi Mooren laista [41]. Vaikka Mooren laki puhuu tarkalleen ottaen transistoreiden määrästä tietyllä alueella, Mooren lakia käytetään myös yleisesti kuvastamaan teknologian kehitystä.

Konseptitodistuksen kehittäminen osoittautui huomattavasti työläemmäksi tehtäväksi, kuin miltä se ensi vaiheessa vaikutti. Projektin suppea luonne ja työskentelyn iteratiivinen prosessi tekivät projektin kanssa työskentelystä ajoittain turhauttavaa, kun joutui jättämään pois kymmenien tuntien tutkimus- ja kehitystyötä pienen laskuvirheen tai risteävän

informaation vuoksi. Työskentelykokemus projektin kanssa näytti, kuinka tärkeää on tehdä taustatyö kunnolla ja keskustella muiden ammattilaisten kanssa uuden teknologian toteutustavoista ja mahdollisista sudenkuopista.

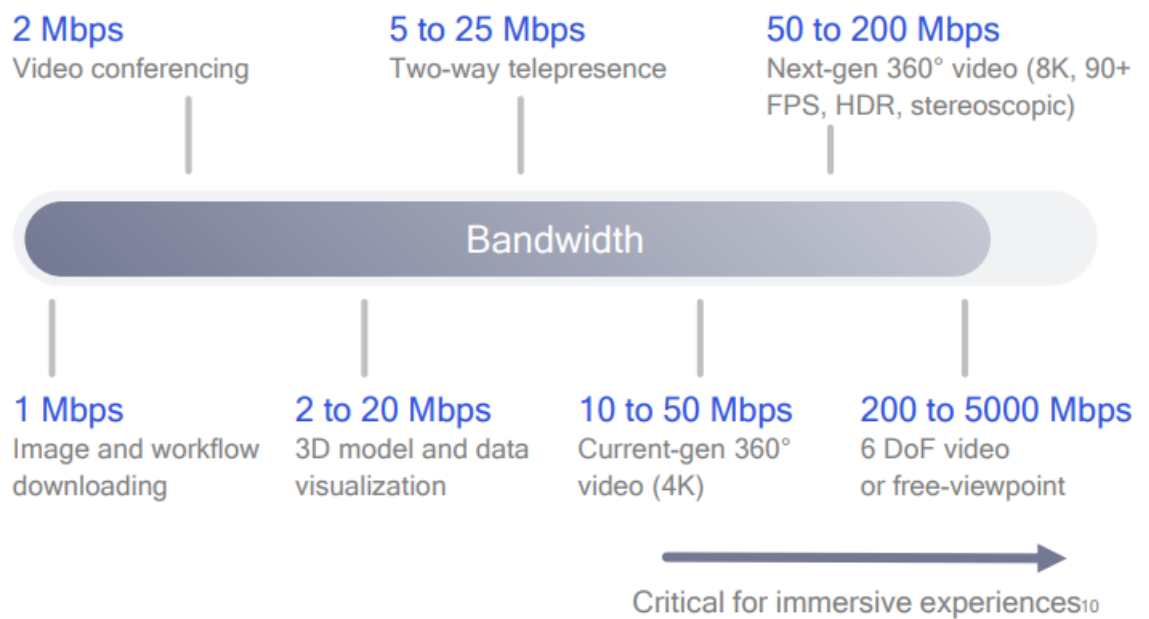
Testaamisprosessiin tuli myös erinäisiä ongelmia. Testaamiseen käytetty Asus Zenfone 6 -puhelin päivitettiin uudempaan käyttöjärjestelmäversioon projektin aikana, jolloin osa projektissa olleesta ohjelmistosta ei tuntunut enää toimivan laitteella. Ohjelmaa kirjoitettiin uudelleen nopealla aikataululla ja käyttämällä oikoteitä, jotta se saatiin jälleen toimimaan testilaitteella. Toiminta ei kuitenkaan ollut enää yhtä luotettavaa päivityksen jälkeen. Puhelin on saanut uuden päivityksen projektin aktiivisen testaamisen loputtua, ja siinä oli muutoksena mainittu korjaus kameran kaatumiseen kolmannen osapuolen sovelluksissa. Projektia voitaisiin siis testata uudelleen luotettavammin, mutta ohjelmaa saattaisi joutua uudelleen kirjoittamaan jälleen.

5.2 Projektin ja AR-kehityksen potentiaali

Projekti osoitti syväterävyyden simuloinnin toimivuuden ainakin mobiililaitteilla, joten Gribbing Oy ottaa projektissa tehdyn kehitystyön käyttöön 3D-mallinnusohjelmassaan lähitulevaisuudessa. Projekti osoitti myös potentiaalia optisten ominaisuuksien hyödyntämiselle laajennettua todellisuutta kehitettäessä, ja optisten ominaisuuksien käyttämistä tulisi tutkia lisää useammalta eri kannalta, jotta voidaan selvittää uusia tapoja ja syventää immersiota sekä lisätä uusia tapoja kanssakäydä virtuaalisten objektien kanssa.

Potentiaali laajennettuun todellisuuteen keskittyville sovelluksille ja teknologioille on edelleen valtava päätellen projektin tuottamasta edistyksestä ja projektin toteutuksen nopeudesta ja pienestä työsuorittajien määrästä. Vaikka suuret valtavirtayhtiöt keskittyvätkin luomaan uutta vahvempaa laitteistoa laajennettua todellisuutta varten, suurimmat innovaatiot saattavat hyvinkin olla ohjelmiston puolella. Jos, tai kun, suuret yritykset ovat saaneet laitteistonsa kehityksen valmiiksi, ne yhtiöt todennäköisesti siirtyvät ohjelmiston kehitykseen, ja silloin nähdään uusi harppaus laajennetun todellisuuden edistykssellisyydessä.

Laajennetun todellisuuden laaja omaksuminen on vielä tapahtumatta, mutta 5G-tekniikan yleistymisen myötä laajennettua todellisuutta käyttävien sovellusten laadun ja määrän voidaan olettaa kasvavan, kun sovellusten vaatima prosessointi voidaan hoitaa etänä käyttäen 5G:n suuria tiedonsiirtonopeuksia ja pientä latenssia. Kuvassa 19 voidaan nähdä, kuinka laajennetun todellisuuden kasvava tarkkuus kasvattaa suuresti vaadittua tiedonsiirtonopeutta.



Kuva 19. Laajennetun todellisuuden kasvavan visuaalisen tarkkuuden vaatima datansiirtonopeuden kasvu visualisoituna [42, s. 10].

5G-tekniikka myös mahdollistaa selainpohjaisten AR-sovellusten kehittämisen ja yleistä jätää verkkopohjaisen prosessoinnin kehityksen, mikä takaa paremman visuaalisen tarkkuuden ilman päätelaitteen tehon käyttöä. 5G siis mahdollistaa suuremman immersion mahdollistamalla suuremmalla tiedonsiirtonopeudella paremman visuaalisen laadun ja kevyemmät laitteet, mikä parantaa immersiota.

6 Yhteenveto

Insinööriyössä selvitettiin, kuinka laajennettua todellisuutta voitaisiin parantaa käyttäen kameran optisia ominaisuuksia. Tavoitteena oli luoda vahvempaa immersiota hyödyntäen syvyysterävyyttä ja luoda tapa tehdä tarkkoja valintoja rajoittamalla käyttäjän valintamahdollisuuksia jakamalla virtuaaliset objektit fokuksessa ja ei-fokuksessa oleviin. Työ suoritettiin toimeksiantona Gribbing Oy:lle, ja sen kuului toimia konseptitodistuksena patenttihakemusta varten.

Projektin alussa tehdyllä tutkimusjaksolla todettiin, ettei vastaavaa ratkaisua ole ehdotettu immersion lisäämiseen tai tarkempien valintojen tekemiseen. Vaikutti siltä, ettei näitä asioita ole nähty niin tärkeänä ratkaistavaksi. Tutkimusjakson lopulla päädyttiin lähestymistapaan, jossa käytettiin päätelaitteen kamerasta saatavaa metadataa laajennettun todellisuuden virtuaalisen kameran optisten ominaisuuksien simulointia varten.

Kehitettäessä konseptitodistusprojektia huomattiin, että mobiilikameroissa on puutteita. Nämä puutteet hankaloittivat kehityksen jatkamista ja tekivät lopullisesta konseptitodistuksesta heikomman kuin oli odotettu. Siitä huolimatta projekti tuotti tulosta ja lisäsi immersiota testaamisessa, ja valintojen rajaaminen vain fokuksessa oleviin objekteihin onnistui. Mutta mobiilikameroiden puutteiden vuoksi valintojen rajaaminen päättyi olemaan valitettavan oikukasta. Fokusalueen kokoa ei voi muuttaa kuin muuttamalla polttopisteen sijaintia. Myös mobiililaitteiden prosessointitehon heikkouden vuoksi virtuaalisten objektien lisääminen testiympäristöön heikensi virkistystaajuutta optimoinnista huolimatta. Tämän vuoksi tulevaisuudessa prosessointi voitaisiin tehdä etänä 5G-tekniikan avulla tai paikallisesti, kun mobiililaitteiden prosessointiteho kasvaa kehityksen myötä.

Projektista lähetettiin patenttihakemus Gribbing Oy:n nimissä, ja projektissa kehitetty teknologia, jolla simuloidaan syväterävyyttä ja erotellaan virtuaaliset objektit toisistaan syväterävyuden perusteella, on tarkoitus ottaa osaksi Gribbing Oy:n 3D-mallinnusohjelmaa lähitulevaisuudessa.

Lähteet

1. Augmented reality market size - growth, trends, and forecasts (2020 - 2025). 2019. Verkkoaineisto. Mordor Intelligence, Inc. <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/augmented-reality-market>>. Luettu 11.2.2020.
2. Grib3D's 2019 overview. 2020. Verkkoaineisto. Gribbing Oy. <<https://grib3d.com/grib3ds-2019-overview/>>. Luettu 1.5.2020.
3. Azuma, Ronald. 1997. A Survey of Augmented Reality. Hughes Research Laboratories.
4. Heilig, Morton. 1961. Sensorama Simulator. United States Patent Office.
5. Kangdon, Lee. 2012. Augmented Reality in Education and Training. Tech Trends.
6. Barfield, Woodrow. 2017. Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. CRC Press.
7. Arth, Clemens; Gruber, Lukas; Grasset, Raphael; Langlotz, Tobias; Mulloni, Alessandro; Schmalstieg, Dieter & Wagner, Daniel. 2015. The History of Mobile Augmented reality. Graz University of Technology.
8. Google Lens. Verkkoaineisto. Google LLC. <<https://lens.google.com/>>. Luettu 30.3.2020.
9. Wikitude world browser used on an iPhone. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/Wikitude-world-browser-used-on-an-iPhone-Courtesy-of-Wikimedia-Commons_fig1_282490665>. Luettu 1.4.2020.
10. HoloLens (1st gen). 2019. Verkkoaineisto. Microsoft Ltd. <<https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/hololens1-hardware>>. Luettu 15.3.2020
11. Stein, Scott. 2020. Pokemon Go changed the way people look at their phones forever. Verkkoaineisto. CNET. <<https://www.cnet.com/news/for-better-or-worse-pokemon-go-is-ars-signature-killer-app/>>. Luettu 15.3.2020.
12. Babilinski, Krystian & Linowes, Jonathan. 2017. Augmented Reality for Developers. Packt Publishing.
13. Our Augmented Reality Journey Continues. 2017. Verkkoaineisto. Niantic, Inc. <<https://nianticlabs.com/blog/arjourney/>>. Luettu 15.4.2020.

14. Gosalia, Anuj. 2018. Announcing ARCore 1.0 and new updates to Google Lens. Verkkoaineisto. Google LLC. <<https://www.blog.google/products/arcore/announcing-arcore-10-and-new-updates-google-lens/>>. Luettu 15.4.2020.
15. Perez, Sarah. 2018. ARKit-only apps top 13 million installs, nearly half from games. Verkkoaineisto. Tech Crunch. <<https://techcrunch.com/2018/03/28/arkit-only-apps-top-13-million-installs-nearly-half-are-games/>>. Luettu 1.4.2020.
16. Extend reality with XR-1 Developer Edition. Verkkoaineisto. Varjo Technologies Oy. <<https://varjo.com/products/xr-1/>>. Luettu 15.3.2020.
17. Simon, Michael. 2019. Minecraft Earth busts out of the box as a Pokemon Go-inspired mobile AR game. Verkkoaineisto. PCWorld. <<https://www.pcworld.com/article/3396137/minecraft-earth-mobile-ar-microsoft.html>>. Luettu 15.4.2020.
18. Takahashi, Dean. 2018. Spatial raises \$8 million for augmented reality collaboration platform. Verkkoaineisto. Venture Beat, Inc. <<https://venturebeat.com/2018/10/24/spatial-raises-8-million-for-augmented-reality-collaboration-platform/>>. Luettu 15.4.2020.
19. Horwitz, Jeremy. 2020. Spatial, Nreal, and 5G carriers team up for holographic collaborative AR. Verkkoaineisto. Venture Beat, Inc. <<https://venturebeat.com/2020/02/20/spatial-nreal-and-5g-carriers-team-up-for-holographic-collaborative-ar/>>. Luettu 15.4.2020.
20. Martin, Brett. 2018. Augmented Reality. Norwood House Press.
21. Correlation: Focal Length & Magnification. Verkkoaineisto. Light Mircroscope. <<https://light-microscope.net/en/optical-enlargement/correlation-focal-length-magnification/>>. Luettu 30.4.2020.
22. Optiikkaa valokuvaajille. Verkkoaineisto. DigiFAQ. <http://digifaq.info/digi_omat/optiikka/>. Luettu 15.4.2020.
23. Cox, Spencer. 2019. What is F-Stop and How Does it Work? Verkkoaineisto. Photography Life. <<https://photographylife.com/f-stop>>. Luettu 30.4.2020.
24. Kameran asetukset. Verkkoaineisto. Scandinavian Photo AB. <<https://www.scandinavianphoto.fi/inspiroidu/vinkit-niksit/kameran-asetukset---osa-1---aukko>>. Luettu 1.4.2020.
25. Boke-efekti aloittelijoille. Verkkoaineisto. Nikon UK Ltd. <https://www.nikon.fi/fi_FI/learn-and-explore/photography-articles.tag/learn_and_explore/photography_articles/bokeh-for-beginners.dcr>. Luettu 1.4.2020.

26. Sidney, Ray. 2002. Applied Photographic Optics. Focal.
27. Convex lens - perfect. 2017. Verkkoaineisto. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Convex_lens_-_perfect.svg>. Luettu 1.4.2020.
28. Convex lens - circle of confusion. 2017. Verkkoaineisto. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Convex_lens_-_circle_of_confusion.svg>. Luettu 1.4.2020.
29. Dempsey, Tom. 2013. Compare digital camera sensor sizes: 1"-Type, 4/3, APS-C, full frame 35mm. Verkkoaineisto. PhotoSeek. <<http://photoseek.com/2013/compare-digital-camera-sensor-sizes-full-frame-35mm-aps-c-micro-four-thirds-1-inch-type/>>. Luettu 30.4.2020.
30. Chouinard, Jon. 2017. What is a lens optical format? Can I use any machine vision camera with any format? NOT!. Verkkoaineisto. 1stVision. <<https://www.1stvision.com/machine-vision-solutions/2017/08/how-does-a-lens-optical-format-relate-to-machine-vision-cameras.html>>. Luettu 30.4.2020.
31. Camera Lens New No.1. 1997. Carl Zeiss.
32. Vorenkamp, Todd. 2016. Depth of Field, Part II: The Math. Verkkoaineisto. B&H Photo. <<https://www.bhphotovideo.com/explora/photography/tips-and-solutions/depth-field-part-2>>. Luettu 30.4.2020.
33. Number of mobile augmented reality (AR) users worldwide from 2015 to 2023. Verkkoaineisto. Statista Inc. <<https://www.statista.com/statistics/1098630/global-mobile-augmented-reality-ar-users/>>. Luettu 30.4.2020.
34. Clarke, Arthur. 1962. Profiles of the Future: An Enquiry into the Limits of the Possible. Indigo.
35. Jacobson, David. 1997. Frequently Asked Questions regarding lenses. Verkkoaineisto. Photographic Lenses FAQ. <<http://www.faqs.org/faqs/rec-photo/lenses/faq/>>. Luettu 1.4.2020.
36. Optical Formulas and Their Application. 1972. Kodak Publication. Eastman Kodak Company.
37. Joensuu, Janne. 2016. 3D-alan sanasto. Kajaanin Ammattikorkeakoulu.
38. Learn Bokeh In Photography. 2019. Verkkoaineisto. ElectroDealPro. <<https://electrodealpro.com/learn-bokeh-in-photography/>>. Luettu 1.4.2020.

39. Samsung Takes Mobile Photography to the Next Level with Industry's First 108Mp Image Sensor for Smartphones. 2019. Verkkoaineisto. Samsung Electronics Co., Ltd. <<https://news.samsung.com/global/samsung-takes-mobile-photography-to-the-next-level-with-industrys-first-108mp-image-sensor-for-smartphones>>. Luettu 15.4.2020.
40. Gelsinger, Pat. 2006. Moore's Law - The Genius Lives On. Verkkoaineisto. IEEE. <https://web.archive.org/web/20070713083830/http://www.ieee.org/portal/site/sscs/menuitem.f07ee9e3b2a01d06bb9305765bac26c8/index.jsp?&pName=sscs_level1_article&TheCat=2165&path=sscs%2F06Sept&file=Gelsinger.xml>. Luettu 11.4.2020.
41. Struwig, Michael. 2017. Visualizing Moore's Law. Verkkoaineisto. Not So Big Data Blog. <<https://notsobigdatablog.com/2017/11/29/visualizing-moores-law/>>. Luettu 13.4.2020.
42. VR and AR pushing connectivity limits. 2018. Qualcomm Technologies, Inc.