

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Tietotekniikan koulutusohjelma

**LASERKEILAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN
VIRTUAALITODELLISUUDESSA JA LISÄTYSSÄ
TODELLISUUDESSA**

Työn tarkastaja(t): D.Sc. (tech) Jussi Kasurinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Engineering Science

Tietotekniikan koulutusohjelma

Aleksi Mäkelä

Laserkeilauksen hyödyntäminen virtuaalitodellisuudessa ja lisätyssä todellisuudessa

Kandidaatintyö 2020

26 sivua, 10 kuvaa

Työn tarkastajat: D.Sc. (tech) Jussi Kasurinen

Hakusanat: laserkeilaus, 3d-malli, virtuaalitodellisuus, lisätty todellisuus

Keywords: laser scanning, 3d-model, virtual reality, augmented reality

Virtuaali- ja lisättyä todellisuutta hyödyntäviä tekniikoita on pääosin käytetty viihdeteollisuudessa. Laserkeilauksesta saatavilla pistepilvistä luoduilla 3D-malleilla sisällöntuottoa voidaan automatisoida ja tehostaa. Laserkeilausta on pääosin käytetty erilaisten rakennusten ja tilojen kuvaamiseen. Kuvatuista tiloista on muodostettu CAD-malleja, joita on voitu tarkastella perinteisiltä näytöiltä yleensä itse mallinnusohjelmassa. Laserkeilausta ja 3D-mallintamista on myös käytetty luolien, puiden, ihmisten, elinten ja esineiden mallintamisessa. Laserkeilauksesta saatavien pistepilvien esittämiseen ja pakkaamiseen on kehitelty useita keinoja. Eri metodeissa korostuu tarve luoda 3D-malleja nopeasti ja tehokkaasti suuresta datamäärästä huolimatta. Viimeisen kymmenen vuoden aikana laserkeilausta, virtuaali- tai lisättyä todellisuutta yhdistävien patenttien hakumäärä on noussut eksponentiaalisesti.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Degree Programme in Software Engineering

Aleksi Mäkelä

Utilization of laser scanning in virtual reality and augmented reality

Bachelor's Thesis 2020

26 pages, 10 figures

Examiners: D.Sc. (tech) Jussi Kasurinen

Keywords: laser scanning, 3d-model, virtual reality, augmented reality

Technologies utilizing virtual reality and augmented reality have mostly been used in entertainment industry. By using 3D-models created from point clouds from laser scanning content production can be automated and streamlined. Laser scanning has mostly been used to scan different structures and rooms. The scanned rooms have been turned into CAD models which are viewed through the modelling software itself. Laser scanning and 3D-modelling have also been used to model caves, trees, people, organs and objects. Multiple ways for the display and compression of point clouds obtained through laser scanning have been developed. Each method is highlighted by the need to create 3D-models fast and efficiently despite the large volume of data. In the past ten years the amount of patents combining laser scanning, virtual reality and augmented reality has grown exponentially.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	3
1.1 TAUSTA.....	3
1.2 TAVOITTEET JA RAJAUKSET.....	3
1.3 TYÖN RAKENNE.....	3
2 LASERKEILAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN 3D-MALLINNUKSESSA.....	5
2.1 LASERKEILAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN ILMAKUVAUKSESSA.....	5
2.2 SISÄTILAN MUUNTAMINEN VIRTUAALIYMPÄRISTÖKSI.....	6
2.3 RAKENNELMIEN JA LUOLIEN LASERKEILAUUS JA MUUNTAMINEN 3D-MALLEIKSI.....	6
2.4 PUUMASSAN MITTAUS LASERKEILAUKSELLE.....	8
2.5 MUSEOIDEN JA MUSEOESINEIDEN KEILAUUS JA MALLINNUS.....	9
2.6 IHMISTEN JA ELINTEN KEILAAMIEN.....	11
3 PISTEPILVEN MUUNTAMINEN 3D-MALLIKSI.....	12
3.1 PISTEPILVEN PAKKAUSSTANDARDI.....	12
3.2 POLYGONIVERKON RAKENNUSALGORITMEJA.....	13
3.3 VAIHTOEHTOISET MENETELMÄT.....	14
4 JOHTAVAT YRITYKSET JA TULEVAISUUS.....	16
4.1 PATENTTITIEKANNAT.....	16
4.1.1 <i>The Lens</i>	16
4.1.2 <i>Google Patents</i>	18
4.2 TULEVAISUUS.....	18
5 YHTEENVETO.....	20
LÄHTEET.....	21

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

AR	Augmented reality
AVC	Advanced Video Coding
CAD	Computer-aided design
CLSM	Confocal laser scanning microscopy
EPO	European Patent Office
HEVC	High Efficiency Video Coding
ISO	International Organization for Standardization
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LIDAR	Light detection and ranging
MPEG	Moving Picture Experts Group
PCC	Point Cloud Compression
USPTO	United States Patent and Trademark Office
VR	Virtual reality

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Lisättyä todellisuutta (augmented reality, AR) ja virtuaalitodellisuutta (virtual reality, VR) on viime vuosina hyödynnetty pääosin viihdeteknologiassa. Tekniikoita on käytetty myös erilaisissa harjoittelusimulaatioissa, sekä erilaisten 3D-ympäristöjen tutkimisessa esimerkiksi lääketieteessä [1]. Suurin osa käytetyistä 3D-ympäristöistä on käsin luotuja. Luomalla ympäristöt laserkeilauksella, voidaan työtä automatisoida sekä pystytään rakentamaan malleja oikean maailman rakennuksista ja tiloista. Laserkeilauksella tarkoitetaan näkyvien tai näkymättömien lasersäteiden kontrolloitua heijastamista pinnasta [2]. Laserkeilauksen tuloksena saadaan pistepilvi, josta voidaan muodostaa kolmiulotteinen malli.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, miten laserkeilausta hyödynnetään virtuaali- ja lisätyn todellisuuden sisällön tuottamisessa. Lisäksi on tarkoitus kertoa miten laserkeilauksesta saatavista pistepilvistä muodostetaan käytettävissä oleva 3D-ympäristö. Työssä myös luodaan katsaus tämän hetken johtaviin yrityksiin virtuaali- ja lisätyn todellisuuden, sekä laserkeilauksen sarolla. Työn ulkopuolelle on rajattu virtuaalilasien tekniset yksityiskohdat ja toiminta sekä laserkeilauksessa käytettävien työkalujen vertailu. Tavoitteisiin päästään tutkimalla aiheeseen liittyvää kirjallisuutta ja artikkeleita. Johtavien yritysten asemaa voidaan tutkia vertailemalla niiden julkaisemien patenttien määrällä.

1.3 Työn rakenne

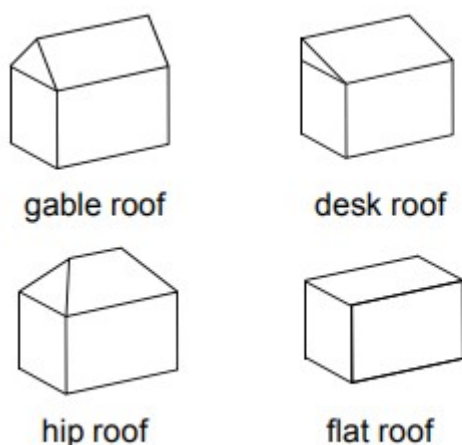
Tämän työn toisessa luvussa luodaan kirjallisuuskatsaus aiheeseen liittyviin tutkielmiin ja esitellään lisätyn todellisuuden, virtuaalitodellisuuden ja laserkeilauksen peruseriaatteen. Kolmannessa luvussa esitellään, miten käytännössä laserkeilauksen tuloksena saaduista pistepilvistä luodaan 3D-ympäristö, jota voidaan tutkia virtuaalilaseilla. Lisäksi esitetään haasteita ja erilaisia tekniikoita laadun parantamiseksi. Neljännessä luvussa selvitetään, mitkä yritykset hyödyntävät edellä mainittuja teknologioita eniten. Vertailemalla julkaistujen ja haettujen patenttien määrää saadaan selville johtavat yritykset. Lisäksi

pohditaan laserkeilauksen hyötyjä virtuaali- ja lisätyn todellisuuden näkökulmista ja mahdollisia tulevaisuuden näkymiä.

2 LASERKEILAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN 3D-MALLINNUKSESSA

2.1 Laserkeilauksen hyödyntäminen ilmakuvauksessa

Laserkeilausta on hyödynnetty 3D-mallin luomiseen kaupungin kuvauksessa [3]. Tutkimuksessa käytettiin TopoSys-laserskannerisysteemin keilauksen lisäksi rakennussuunnittelukarttoja ja ilmakuvantamisen valokuvia. Rakennussuunnitelmien avulla rakennettiin perusmuodot, joista 3D-malli luotaisiin. Perusmuodoiksi valittiin tasakatto, pulpettikatto, harjakatto sekä aumakatto, joista voitiin yhdistellä monimutkaisempia muotoja Boolean joukko-opin unioneilla, leikkauksilla ja vähennyksillä. Rakennussuunnitelmista saatiin myös talojen reunat ja suunnat, joille yksinkertaiset muodot voitaisiin mallintaa. Laserkeilausdatasta saatiin tiedot talojen korkeudesta ja kattojen muodoista ja mittaustuloksia verrattiin yksinkertaisiin geometrisiin muotoihin, joita talojen katot ja seinät muodostavat. Talojen seinustoja varten tekstuurit saatiin kuvaamalla katutasosta Kodak DC 120 -kameralla. Kuviin lisättiin kulmamerkinnot rakennuksille käsin ja esteiden takana olevat kulmat pääteltiin kattojen reunoista, jotta matemaattisin muunnoksien avulla saataisiin tekstuurit seinustoille. Talot rakennettiin vertailutulosten perusteella automaattisesti uudelleen 3D-malleiksi, joita voitiin tutkia laaditun graafisen käyttöliittymän avulla.



Kuva 1. Kattotyypit yksinkertaisina muotoina (vasen) ja Laserkeilausdatan päälle uudelleenmallinnetut rakennukset (oikea) [3]

2.2 Sisätilan muuntaminen virtuaaliympäristöksi

Pistepilvi voidaan myös näyttää virtuaalitodellisuudessa suoraan ilman sen muuntamista 3D-malleiksi [4]. Tutkimuksessa liikkuvaan robottiin kytketyllä RIEGL VZ-400 3D-laserskannerilla ja Canon 1000D DSLR -kameralla kuvatusta pistepilvestä luotiin virtuaalinen ympäristö. Ympäristön tutkiminen toteutettiin Oculus Rift (Developer Edition) virtuaalilaseilla. Tutkimuksessa huomattiin, että virtuaalilasien läpi katsotun pistepilvenä näytetyn virtuaalitodellisuuden virtuaaliseen ja muut esineet näyttivät kiinteiltä tarpeeksi etäältä katsoessa. Siirtyessä lähemmäs objekteja ne kuitenkin vaikuttivat haihtuvan ilmaan. Virtuaalitalan objektien etäisyyksien havaitsemiseen vaikuttaa se, että ilmassa leijuvat 3D-pisteet antavat ristiriitaisia kokemuksia etäisyydestä, joita ei koeta oikeassa maailmassa. 3DTK-ohjelmistolla toteutetussa virtuaaliympäristössä pystyttiin esittämään 10-20 miljoonaa 3D-pistettä jatkuvassa renderöinnissä 60Hz päivitystaajuudella. Pisteitä noudetaan quadtree-esitystavasta kunnes kulunut Oculus Riftin asettama tavoitekuvataajuus on mennyt. Tämä metodi mahdollisti optimoidun kuvataajuuden, mutta jokaisen kuvan pisteiden määrä oli vaihteleva.

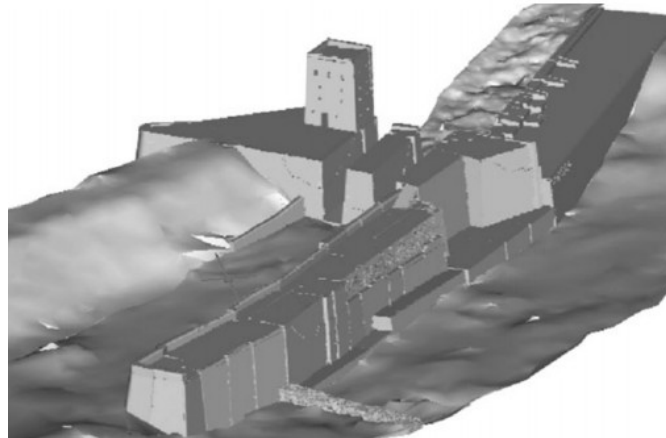


Kuva 2. Käyttäjä kävelemässä kohti työpistettä [4]

2.3 Rakennelmien ja luolien laserkeilaus ja muuntaminen 3D-malleiksi

Virtuaalimaailman luomiseen laserkeilausta on käytetty myös muinaisen padon laskukanavan mallintamisessa Jemenin Maribissa [5]. Kuvaamisessa käytettiin Fujifilm FinePix S2 pro -kameraa ja maaston keilaamiseen Trimble GS100 laserskanneria. Koko laskukanavan kuvantaminen vaati yhteensä 19 skanneriasemaa, joiden sijainnit merkattiin ylös RealWorks Survey 5.0 työkalulla. Skanneriasemien kuvat yhdistettiin manuaalisesti

hyödyntäen kuvauksessa käytettyjä referenssipisteitä. PHIDIAS -ohjelmalla yhdisetty kuvat ja pistepilvet mahdollistivat monoplotting -menetelmän käytön, jossa laserkeilauksen 3D-dataa täydennettiin valokuvan yksityiskohdilla. Mallit tallennettiin CAD-objekteina DXF- tai DWG -tiedostomuotoon, jotta dataa voitaisiin hallita AutoCADilla. Interaktiivista esitysmuotoa varten käytettiin AECViz -ohjelmistoa, jossa käyttäjä pystyy kääntämään 3D-mallia ja zoomaamaan eri yksityiskohtiin.



Kuva 3. AutoCAD:illa luotu 3D-malli laskukanavasta [5]

3D-mallin muodostaminen liikkuvan laserskannerin ja muiden sensoreiden datasta on kokeiltu tunnelin kunnossapidon automatisoinnissa [6]. Tutkimuksessa tunnelin seinämien kartoittamiseen kokeiltiin liikkuvaa Orthos Plus -monisensorisysteemiä. Käytetty Orthos Plus -prototyyppi sisälsi Rieglin valmistaman 3D-laserkeilaimen, Nikon 90D -kameran ja Leica TPS1200 -takymetrin. Kaikki kolme sensoria oli kiinnitetty kevyeen metallirunkoon, joka sisälsi myös virtalähteen, hallintatietokoneen ja WLAN-näytön kauko-ohjausta varten. Tunnelin seinistä haluttiin löytää mahdollisia murtumia, märkiä alueita ja muita epämuodostumia, joita voitaisiin tarkkailla liikkuvalla sensorisysteemillä. Lisäksi tutkimuksessa esiteltiin virtuaalitodellisuustyökalu, jolla voidaan dokumentoida tunnelin suunnitelmia, optimoida tunnelin tukirakenteita ja mallintaa geologisia ominaisuuksia. Työkalulla pystytään esimerkiksi vertailemaan tunnelin porausreikiin asetettujen sauvaekstensometriä mittausten, jotka kertovat tunnelin epämuodostumista. Verrattuna aiemmin käytössä olleisiin ihmisten operoimiin takymetreihin ja kameroihin, liikkuva monisensorisysteemi ei kuitenkaan tutkimuksen mukaan voi korvata niitä täysin. Suurimpana rajoittavana tekijänä nähtiin se, ettei laserskannausteknologia ollut resurssien

kannalta kilpailukykyinen jo vakiintuneessa käytössä olevaan takymetrimittauksiin perustuvaan optiseen 3D-uppoumamonitorointiin.



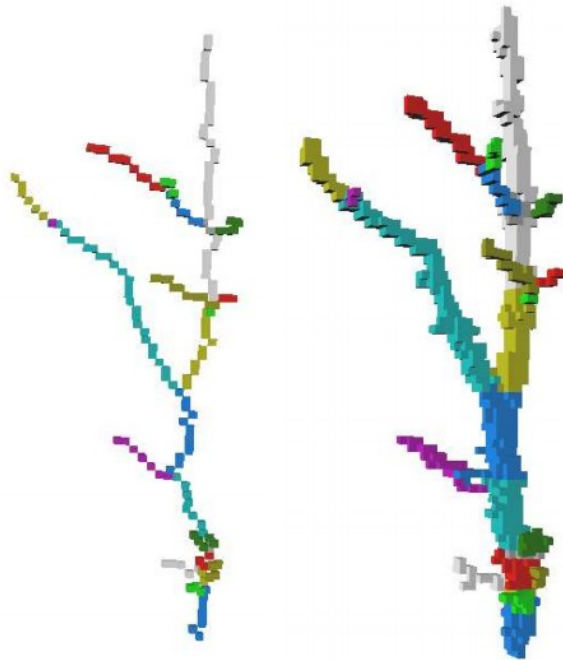
Kuva 4. Orthos Plus -prototyyppi [6]

Kalliopaljastumien geologisten ominaisuuksien mallintamiseen on käytetty laserkeilausta ja 3D-mallintamista [7]. Tutkimuksessa kallioita kuvattiin Riegl LMS Z360i -laserkeilaimella ja Nikon D100 kameraa. Kuvatusta datasta muodostettiin 3D-mallit Visualisation ToolKit -ohjelmistolla. Kalliopaljastumien halkeamia, railoja ja kerrospintoja on pystytty havainnoimaan virtuaalitodellisuuteen luoduilla interaktiivisilla pinnoilla. Laserkeilauksella muodostettujen mallien hyödyiksi havaittiin kalliopaljastumien kokonaisvaltainen tutkiminen, etätyöskentelyn hyödyt ja mallien suora vertailu kolmiulotteiseen seismisen heijastumisen dataan.

2.4 Puumassan mittaus laserkeilauksella

Laserkeilauksesta saatavia pistepilviä on myös kokeiltu talousmetsän puiden mallintamisessa [8]. Tutkimuksessa pistepilvidatasta muodostettavien kolmiulotteisten puiden runkojen ja oksien pituuksia sekä paksuuksia haluttiin mitata puutavaran määrän arvioimiseksi. Puiden mallintamiseen hyödynnettiin useista suunnista kuvattuja pistepilviä sekä kolmiulotteista, aiemmin 2D-rasterigrafiikassa käytettyä algoritmia. Pistepilvet muutettiin kolmiulotteiseksi bittikarttakuviksi, joiden yksittäisiä pisteitä verrattiin lähipisteisiin yhtenäisen puun muodon muodostamiseksi ja puun tyhjän sisustan

täyttämiseksi. Lisäksi yksittäiset oksat ja eri puut pystyttiin erottelemaan redusoimalla puun rungot ja oksat yhdeksi vokseliksi ja käyttämällä Dijkstran algoritmia.



Kuva 5. Segmentoitu runkokehikko (vasen) ja segmentoitu 3D-puu (oikea) [8]

2.5 Museoiden ja museoesineiden keilaus ja mallinnus

Museoesineiden muuntaminen 3D-malleiksi mahdollistaa niiden tarkastelun lähempää sekä helposti pystytettävien näyttelyiden luomisen [9]. Tutkimuksessa käytettiin Scansystems S.R.L.:n valmistamaa valoskanneria 3D-mallin luomiseen ja Nikon D200 -kameraa tekstuurin hankkimiseen. Minolta Polygon Editing Tool ja Scanprobe ohjelmistoja käytettiin keilausdatan muuttamiseksi 3D-malleiksi ja pinnan polygonien muodostamiseen. Avoimeen lähdekoodin perustuvalla MeshLab-työkalulla malleja jälkikäsiteltiin siistimällä niitä ja täyttämällä aukot. Puuttuvien osien mallintaminen ja muiden hienosäätöjen tekeminen toteutettiin Rhinoceros 3D-mallinnusohjelmalla. Tekstuureja varten kameralla saatettiin ottaa yli 100 kuvaa yksittäisistä, varsinkin pyöreistä esineistä, kuten vaaseista. Kuvien manuaaliseen muokkaamiseen, rajaamiseen, väritasapainon säätöön ja käärimiseen mallien ympärille käytettiin paljon aikaa, jotta tekstuurissa ei olisi heijastumia, värieroja tai muita eroavaisuuksia. Sekä laserkeilauksessa että valokuvaamisessa ongelmiksi havaittiin tummien ja kiiltävien pintojen vaikutus laitteiston toimivuuteen, mikä vaikutti

jälkikäsitteilyn työn määrään. Virtuaalimuseota varten käytettiin Virtools Dev 4.0 -ohjelmistoa, jolla voitiin tehdä nopeasti multimediasovelluksia. Virtuaalimuseossa käyttäjä pystyi selaamaan museoesinekokoelmaa, tutkimaan esineitä vapaamuotoisesti eri suunnista ja kuuntelemaan teoksen historiaa.

Laserkeilauksella on myös mallinnettu kokonainen museo [10]. Vanhan-Segebergin museo mallinnettiin laserkeilaamalla IMAGER 5006h -laserskannerilla ulkoa sekä sisältä ja tekstuurit malleille saatiin Nikon D40 ja D90 kameroilla. Laserkeilauksen pistepilvistä 3D-mallit saatiin AutoCAD:iin lisätyllä PointCloud -liitännäisellä. Kun yksittäisen elementin kuvan mittaukset saatiin valmiiksi, voitiin luoda murtoviivat (polylines), joista muodostettiin myöhemmin pinnat. Suorakulmaisten särmiöiden, sylintereiden, ympyröiden ja muiden geometrinen primitiivien avulla voitiin rakentaa kaikki yksinkertaiset objektien muodot, kun taas monimutkaisempiin osiin käytettiin CADin Boolean operaatioita. Valokuvista saadut tekstuurit lisättiin objekteihin tekstuureina Autodesk 3ds Max -ohjelmistolla. Virtuaalisen museon interaktiivisuutta varten tarvittiin myös pelimoottori. Tutkimuksessa virtuaalitodellisuuden luomiseen päädyttiin käyttämään Epic Gamesin Unreal -pelimoottoria, sillä sen visuaalisiin komentosarjoihin perustuva Blueprint -systemi mahdollisti myös tietojenkäsittelytieteeseen perehtymättömän henkilön luoda interaktiivista sisältöä. Virtuaaliseen museoon käyttäjä pääsi HTC Vive -virtuaalilaseilla. Virtuaalilasit mahdollistivat ympäristön tutkimisen vapaasti oikean ihmisen näkökulmasta ja HTC Viven liikeohjaimilla käyttäjä pystyi valitsemaan tutkittavan materiaalin, kuten museon arkkitehtuurin historian.



Kuva 5. Vanhan-Segebergin museo virtuaalimuseo [10]

2.6 Ihmisten ja elinten keilaamien

Laserskannausta ja 3D-mallintamista on myös hyödynnetty lääketieteessä istukan verisuonien muodostumisen tutkimisessa [11]. Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) -tekniikalla on kuvattu raskauden alkuvaiheessa tapahtuvaa hiusverisuonien muodostumista. Bio-Rad MRC 1024 CLSM-skannerilla kuvattiin 15-20 μm osioita 512 x 512 kokoisiksi kuviksi. Neliseinäisen Barcon I-Space laitteen seinille heijastetaan tietokoneella luodut kuvat, jotka käyttäjät voivat nähdä syvyyssnäön mahdollistavilla, erityisillä polarisoituneilla lasilla. Lasit sisältävät lisäksi käyttäjän pään liikkeet tunnistavat sensorit, jotta kuvan perspektiivi voidaan säätää tilanteeseen oikeaksi. Kolmiulotteisiksi malleiksi luodut kuvat ovat mahdollistaneet syvyyden havainnoinnin ja intuitiivisen 3D-mallin käsittelemisen.

Laserkeilauksella on myös mallinnettu ihmisiä [12]. Tutkimuksessa korvattiin yleensä liikkuvissa 3D-hahmoissa käytössä oleva, animaatiot mahdollistava runko yksinkertaisemmalla prosessilla. Tutkimuksessa esitettiin tapa luoda eri liikkeitä suorittavista ihmisistä 3D-malli, jolle saatiin myös animaatio laserkeilausdatasta.

3 PISTEPILVEN MUUNTAMINEN 3D-MALLIKSI

3.1 Pistepilven pakkausstandardi

Pistepilvien pakkaamiseen on kehitelty standardia, sillä 3D-media vaatii suuria datamääriä ja tehokkaat pakkausteknologian halutaan saada kaikkien käyttöön [13]. Videonpakkaustapoihin keskittynyt työryhmä MPEG (Moving Picture Experts Group) on kehittänyt avointa standardia 3D pistepilvien kompaktiin esittämiseen, joka on tarkoitus julkaista vuoden 2020 alkupuolella. ISO standardina julkaistavaa Point Cloud Compression (PCC) -teknologiaa ei ole tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa vielä julkaistu.

Pistepilvi sisältää joukon yksittäisiä 3D pisteitä. Jokaisella pisteellä voi kolmiulotteisen koordinaatiston pisteiden lisäksi olla muuta ominaisuuksia, kuten väri, heijastuskyky tai pintanormaali. Yksittäisillä pisteillä ei ole tilayhteyksiä tai järjestykseen viittaavia yhteyksiä. 3D-grafiikassa yleensä käytettyihin polygoniverkkoihin verrattuna pistepilvet mahdollistavat tehokkaamman reaaliaikaisen prosessoinnin, sillä niissä ei ole tarvetta tallentaa, ylläpitää tai prosessoida pintojen topologista tietoa. Pistepilvidatan yksittäiset pisteet kvantitetaan kuutiokoordinaatistoon, joka sisältää $2^{-d} \times 2^{-d} \times 2^{-d}$ (d yksityiskohtaisuustaso (level of detail)) kokoisia vokseleita, jotka on muodostettu tilavuusjaolla $1 \times 1 \times 1$ kuution juurivokselista. Tuloksena saadut vokselit voidaan lisätä octree -tietorakenteeseen.

Eri tilanteista hyödynnettävälle pistepilvidatalle MPEG PCC -standardia varten määritettiin kolme yleistä kategoriaa: staattinen, muuttuva ja dynaamisesti saatu. Dynaamisesti saatu tieto voidaan hankkia esimerkiksi liikkuvaan ajoneuvoon kiinnitetyistä LIDAR sensoreista. Sensorit keräävät ajoneuvon sijaintiin verrattuna pisteiden sijaintitietoa laserin suunnan ja sensoriin palautuneiden heijastumien etäisyyden ja voimakkuuden perusteella. Yhdistämällä pistetiedot ajoneuvon sijaintiin, voidaan koordinaatistoon muodostaa alkuperäiseen sijaintiin perustuva kartta.



Kuva 6. Pistepilvidatan päälle asetettu kameran kuva mahdollistaa sen esittämisen värillisenä [14].

Pistepilvien pakkauksen tekniikoissa on käytetty 2D-kuvien ja videoiden pakkaamisessa hyödynnettyjä menetelmiä [15]. Lohkoihin ja hierarkkisiin octree-esityksiin perustuvissa metodeissa on pystytty käyttämään samoja metodeja kuin kuvien pikseleihin perustuvissa JPEG, H.264/AVC ja HEVC -standardeissa. JPEG-standardin pikselien koodaamiseen lohkoihin perustuu myös pistepilvissä käytetty avoimen lähdekoodin PCL-ohjelmisto (Point Cloud Library). Keilaustekniikasta riippumattomassa prosessoinnissa pistepilven data esikäsitellään niin, että se muodostaa yhtenäisen ruudukon. Kaksiulotteisissa kuvankäsittelyssä jokainen 2D-lohko sisältää kuvan pikselin sijainnin, joten lohko on täynnä. 3D-lohkoissa voi olla tyhjää tilaa, joten kuvan- ja videonkäsittelyssä käytettyjä intraennakointia (intra prediction) ja lohkoerusteisia muunnoksia ei ole voitu käyttää suoraan vaan niitä muokattu tyhjät sijainnit huomioiviksi.

3.2 Polygoniverkon rakennusalgoritmeja

Pistepilven muuttaminen polygoniverkoksi voidaan tehdä monella eri tapaa. Tavat voidaan luokitella käytettävän menettelytavan, datan tyypin tai esitystavan mukaan [16]. Syötedatan mukaan algoritmit lajitellaan järjestäytymätöntä ja järjestäytyneitä pistepilvidataa käyttäväksi. Järjestäytymättömässä pistepilvidatassa ei ole muuta tietoa, kuin pisteiden avaruudellinen sijainti. Pistepilven sisältämien objektien muodoista ei ole tietoa, joten objektien rakennus tapahtuu pisteiden koherenssin mukaan ja pistepilven pisteiden tulee olla tasaisesti jakautuneita. Järjestäytyneessä pistepilvessä algoritmi voi hyödyntää lisätietona esimerkiksi pintaviivoja (breakline).

Algoritmit voidaan jaotella lisäksi pinta- tai tilavuusorientuneiksi. Pintaorientoituneet algoritmit eivät erottele avoimia ja suljettuja pintoja kun taas tilavuusorientoituneet algoritmit toimivat pääosin suljetuissa pinnoissa ja perustuvat Delaunayn tetraedrisointiin. Lisäksi algoritmit jaotellaan pinnan esitystavan mukaan. Parametrisessa esitystavassa pinnan osat esitetään parametrisina yhtälöinä ja pinnan muodostamiseksi ne voidaan liittää yhteen. Implisiittessä esitystavassa pyritään löytämään tasainen funktio, joka menee jokaisen sijainnin läpi, ja joille funktio pyrkii antamaan tietyn arvon. Simpleksisessä (simplicial) esitystavassa pinta määritellään kokoelmana yksinkertaisia kokonaisuuksia, kuten pisteitä, reunoja ja kolmioita. Approksimoidut pinnat eivät aina sisällä kaikkia alkuperäisiä pisteitä vaan mahdollisimman lähellä olevat pisteet. Etäisyysfunktioilla estimoidaan pinta, jolle pisteiden etäisyys on kaikista lyhyin. Interpoloituja pintoja käytetään kun vaaditaan tarkkoja malleja. Niissä kaikkia syötedatan pisteitä käytetään ja ne yhdistetään virheettömästi.

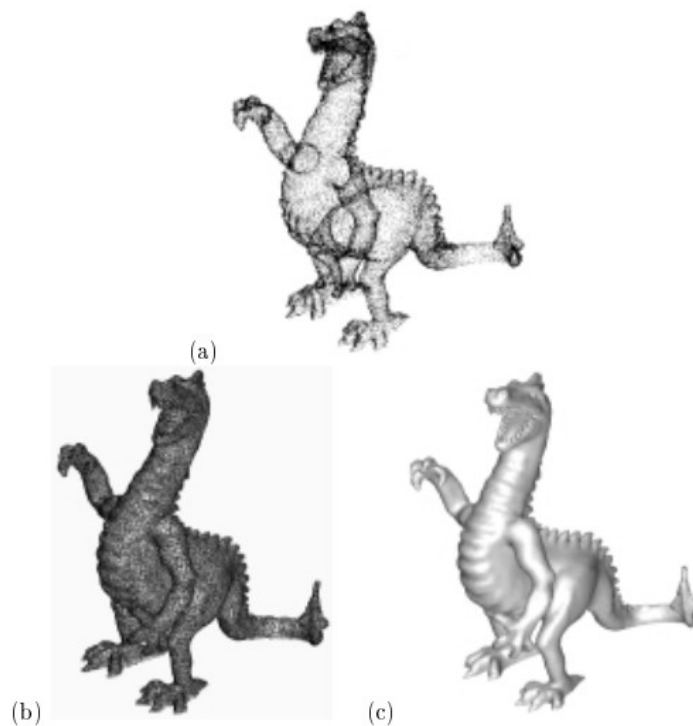
Mallien rakentamisen algoritmit jaotellaan myös niiden mallinnusta varten tekemien oletuksien mukaan. Algoritmit, jotka olettavat tiettyjä topologisia muotoja, kuten tasainen neliöpinta, sylinteri tai pallo, on hyödynnetty varsinkin rakennusten mallintamisessa [3] [10]. Rakenne- tai orientaatiotietoja käyttävät algoritmit voivat esimerkiksi käyttää hyväksi useamman vierekkäin olevan skannerin dataa. Lisäksi voidaan hyödyntää tietoa siitä, mikä on datan sisältämän pinnan suunta.

3.3 Vaihtoehtoiset menetelmät

Laserkeilauksesta saatava pistepilvi muutetaan yleensä polygoniverkoksi. Polygoneilla tarkoitetaan kolmiulotteisessa grafiikassa käytettyjä, yleensä kolmikulmaisia monikulmioita.. Tekstuurit polygoniverkoille saadaan laserkeilausta hyödyntäessä erillisellä kameralla otetusta kuvasta.

Kolmiulotteisen pistejoukon muodostaman pinnan uudelleenrakentamiseen polygoniverkkona lisäksi on myös kehitetty toinen tapa esittää pistepilvi [17]. Tutkimuksessa haluttiin kehittää aika- ja tilakompleksisuudeltaan polygoniverkkoja

tehokkaampi menetelmä. Menetelmän tärkeimpiin käsittelytapoihin kuului datan määrän vähentäminen, virhevääristymän pienentäminen ja esitettävien objektien muokkaamisen mahdollisuus. Toisin kuin perinteisissä polygoniverkoissa, menetelmässä ei käytetä pintoja, joten jokaiselle pisteelle tulee löytää ympäristö erikseen. Jokaiselle pisteelle lasketaan kriteereihin sopivat naapuripisteet, joiden avulla ympäristö voidaan esittää kolmiokaarena. Piirtämällä kaikki kolmiokaaret voidaan esittää pistepilvi. Vaikka kaaret eivät muodosta yhtenäistä verkkoa, se ei kuitenkaan tutkimuksen mukaan sisältänyt havaittavissa olevia osia.



Kuva 7. a) Pistepilven pisteet piirrettynä. b) Pintarenkaat piirrettynä. c) Kolmiokaaria hyödyntävä menetelmä. [17]

4 JOHTAVAT YRITYKSET JA TULEVAISUUS

Tässä luvussa tutkitaan patenttitietokantoihin tehtyjen hakutulosten perusteella laserkeilauksen, virtuaali- ja lisätyn todellisuuden johtavia yrityksiä patenttien määrän perusteella ja pohditaan tulevaa.

4.1 Patenttitietokannat

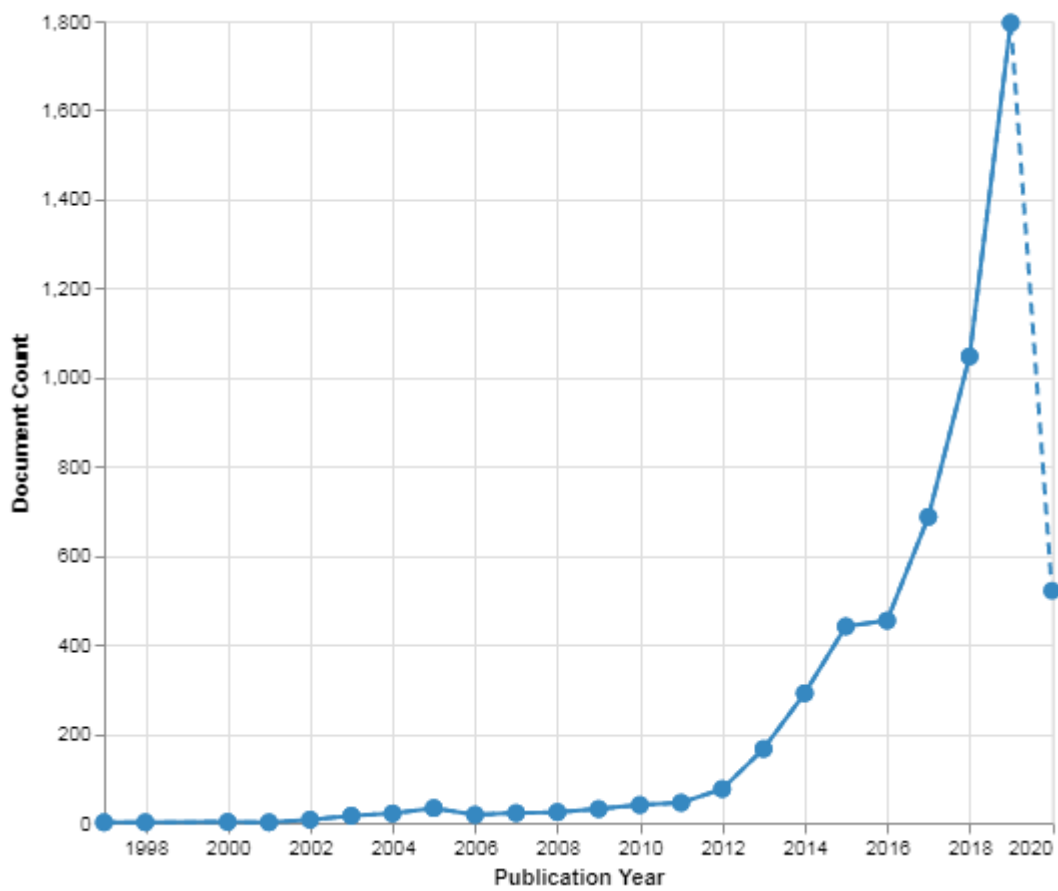
4.1.1 The Lens

The Lens on avoin patenttitietokanta, joka sisältää EPO:n (The European Patent Office), USPTO:n (United States Patent and Trademark Office) ja IP Australian patenttidokumentit [18]. Tietokantaan voidaan suorittaa monimutkaisia hakuja Boolean operaattoreilla, ja hakutuloksina saatavia patenteista voidaan automaattisesti muodostaa esimerkiksi graafeja niiden julkaisuvuoden tai hakijoiden perusteella.

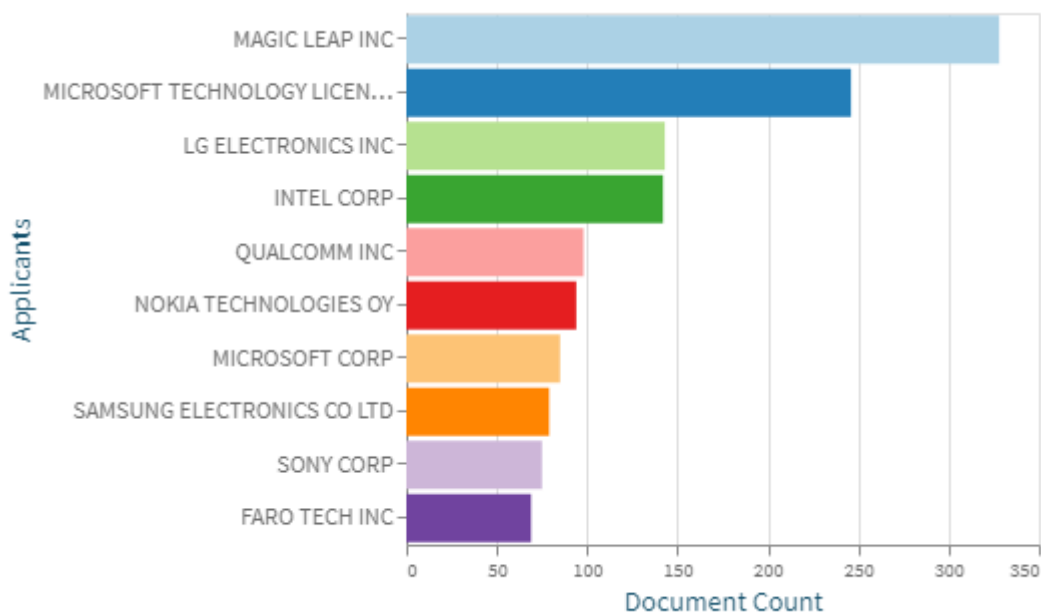
The Lens patenttitietokantaan tehdyllä haulla:

"point cloud" AND ("virtual reality" OR "augmented reality")

patenttien määräksi saatiin 5741. Haettujen patenttien määrä on vuodesta 2012 kasvanut eksponentiaalisesti (Kuva 8). Johtavien hakijoiden joukosta kuluttaja- tai ammattikäyttöön soveltuvia lisätyn tai sekoitetun todellisuuden (mixed reality) virtuaalilaseja ovat Microsoftin Microsoft HoloLens, Qualcommin Qualcomm Snapdragon 835 VRDK, Samsungin Samsung Odyssey ja Samsung Gear VR sekä Sonyn PlayStation VR. Lisäksi Magic Leapilla on Magic Leap One -virtuaalilasit, joita mainostetaan ”puettavana spatiaalisena tietokoneena” [19]. Muita listalta puuttuvia tunnettuja virtuaalilaseja ovat Facebook Technologies LLC:n Oculus Rift, HTC:n ja Valve Corporationin HTC Vive, sekä Valve Corporationin Valve Index. Vuonna 2018 Sonyn markkinaosuus virtuaalitodellisuusmarkkinoilla oli 43,0%, Facebookin 19,4%, HTC:n 13,3% ja Microsoftin 3,2% [20].



Kuva 8. Patentihakemusten määrän nousu 1997-2020.



Kuva 9. Kymmenen eniten patenteja hakenutta yritystä.

4.1.2 Google Patents

Google Patents on patenttietokanta, joka sisältää yli sadan patenttitoimiston patenttijulkaisut ympäri maailmaa [21]. Google Patentsiin suoritettu haku:

((laser scanning) OR (point cloud)) ((virtual reality) OR (augmented reality))

tuotti noin 150 000 tulosta. Kymmenen eniten patenteja hakeneen yrityksen joukkoon kuului samoja yrityksiä, kuin The Lens -tietokantaan suoritettu haku. Eroina olivat kuitenkin listalta löytyvät Huawei Technologies Co., Ltd. ja Tencent Technology (Shenzhen) Co Ltd.

4.2 Tulevaisuus

Haettujen ja myönnettyjen patenttien, sekä yritysten julkaisemien virtuaaliasien määrän eksponentiaalinen nousu varmasti jatkuu tulevina vuosina. Varsinkin kuluttajakäyttöön soveltuvat virtuaalilasit ja puhelinten lisätyn todellisuuden sovellukset nostavat tarvetta helposti ja nopeasti luotaville 3D-malleille, minkä laserkeilaus mahdollistaa. Lisäksi erilaisia työtehtäviä halutaan automatisoida ja tehostaa uusien teknologioiden avulla, joten

todennäköisesti erilaiset laserkeilauksen ja lisätyn todellisuuden yhdistävät prototyypit yleistyvät.

Pistepilvien pakkaukseen kehitteillä olevat menetelmät standardit vähentävät virtuaalitodellisuutta näyttävien laitteiden tehovaatimuksia. Halvemman teknologian helppo saatavuus mahdollistaa suuremmat kuluttajaryhmät, joten sisällöntuotonkin tarve kasvaa. Lisäksi olemassa olevat standardit voivat helpottaa pienten ja uusien yritysten nousua, kun pistepilvien käsittelyyn tarvittavat kirjastot ja menetelmät ovat vapaasti kaikkien saatavissa.

5 YHTEENVETO

Virtuaali- ja lisättyä todellisuutta hyödyntäviä tekniikoita on pääosin käytetty viihdeteollisuudessa. Laserkeilausdatasta luotavilla 3D-malleilla sisällöntuottoa voidaan automatisoida ja tehostaa. Tässä kandidaatintyössä oli tarkoitus selvittää, miten laserkeilausta on hyödynnetty virtuaali- ja lisätyssä todellisuudessa. Laserkeilausta on pääosin käytetty erilaisten rakennusten ja tilojen kuvaamiseen. Kuvatuista tiloista on muodostettu CAD-malleja, joita on voitu tarkastella perinteisiltä näytöiltä yleensä itse mallinnusohjelmassa. Laserkeilausta ja 3D-mallintamista on myös käytetty luolien, puiden, ihmisten, elinten ja esineiden mallintamisessa. Sekä laserkeilaus että tekstuureja varten erillisellä kameralla suoritettu valokuvaus on pääosin tehty käsin, ja lopullisia malleja on hiottu ja paranneltu. Laserskannereita ja kameroita yhdistäviä automaattisia prototyyppejä on kehitetty vain vähän.

Laserkeilauksesta saatavien pistepilvien esittämiseen ja pakkaamiseen on kehitelty useita keinoja. Eri metodeissa korostuu tarve luoda 3D-malleja nopeasti ja tehokkaasti suuresta datamäärästä huolimatta. Audio- ja videopakkaukseen erikoistunut MPEG on kehittänyt pistepilvien esittämiseen standardia, joka on tarkoitus julkaista vuonna 2020. Lisäksi on kokeiltu itse pistepilven esittämistä suoraan ilman mallien luomista.

Viimeisen kymmenen vuoden aikana laserkeilausta, virtuaali- tai lisättyä todellisuutta yhdistävien patenttien hakumäärä on noussut eksponentiaalisesti. Patenttien hakumäärä todennäköisesti jatkaa nousuaan, sillä teknologian kehittyessä kuluttajakäytössä olevat virtuaalitodellisuutta esittävät päätelaitteet yleistyvät ja sisällön tarpeen määrä kasvaa.

LÄHTEET

1. Maloca, P.M., de Carvalho, J.E.R., Heeren, T., Hasler, P.W., Mushtaq, F., Mon-Williams, M., Scholl, H.P., Balaskas, K., Egan, C., Tufail, A. and Witthauer, L., 2018. High-performance virtual reality volume rendering of original optical coherence tomography point-cloud data enhanced with real-time ray casting. *Translational vision science & technology*, 7(4), pp.2-2.
2. G. F: Marshall: *Handbook of Optical and Laser Scanning*, 2nd edition, Marcel Dekker, Inc., 2004.
3. Brenner, C. and Haala, N., 1998. Fast production of virtual reality city models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(part 4), pp.77-84.
4. Bruder, G., Steinicke, F. and Nüchter, A., 2014, March. Poster: Immersive point cloud virtual environments. In *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 161-162). IEEE.
5. Kersten, T.P., 2007. Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications. *International Journal of Architectural Computing*, 5(2), pp.339-354.
6. Chmelina, K., Jansa, J., Hesina, G. and Traxler, C., 2012. A 3-d laser scanning system and scan data processing method for the monitoring of tunnel deformations. *Journal of Applied Geodesy*, 6(3-4), pp.177-185.
7. Trinks, I., Clegg, P., McCaffrey, K., Jones, R., Hobbs, R., Holdsworth, B., Holliman, N., Imber, J., Waggott, S. and Wilson, R., 2005. Mapping and analysing virtual outcrops. *Visual Geosciences*, 10(1), pp.13-19.
8. Gorte, B. and Pfeifer, N., 2004. Structuring laser-scanned trees using 3D mathematical morphology. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(B5), pp.929-933.
9. Bruno, F., Bruno, S., De Sensi, G., Luchi, M.L., Mancuso, S. and Muzzupappa, M., 2010. From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition. *Journal of Cultural Heritage*, 11(1), pp.42-49.

10. Kersten, T.P., Tschirschwitz, F. and Deggim, S., 2017. Development of a virtual museum including a 4D presentation of building history in virtual reality. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, p.361.
11. Van Oppenraaij, R.H., Koning, A.H.J., Lisman, B.A., Boer, K., van den Hoff, M.J.B., van der Spek, P.J., Steegers, E.A. and Exalto, N., 2009. Vasculogenesis and angiogenesis in the first trimester human placenta: an innovative 3D study using an immersive virtual reality system. *Placenta*, 30(3), pp.220-222.
12. de Aguiar, E., Theobalt, C., Stoll, C. and Seidel, H.P., 2007, March. Rapid animation of laser-scanned humans. In *2007 IEEE Virtual Reality Conference* (pp. 223-226). IEEE.
13. Schwarz, S., Preda, M., Baroncini, V., Budagavi, M., Cesar, P., Chou, P.A., Cohen, R.A., Krivokuća, M., Lasserre, S., Li, Z. and Llach, J., 2018. Emerging MPEG standards for point cloud compression. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 9(1), pp.133-148.
14. Mitsubishi Electric's Mobile Mapping System (MMS). Viitattu 8.3.2020. Saatavilla: <http://www.mitsubishielectric.com/bu/mms/index.html>
15. Cohen, R.A., Tian, D. and Vetro, A., 2016, March. Point cloud attribute compression using 3-D intra prediction and shape-adaptive transforms. In *2016 Data Compression Conference (DCC)* (pp. 141-150). IEEE.
16. Remondino, F., 2003. From point cloud to surface: the modeling and visualization problem. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34.
17. Linsen, L., 2001. Point cloud representation. Technical Report, Faculty of Computer Science, University of Karlsruhe: Univ., Fak. für Informatik, Bibliothek.
18. About The Lens. Viitattu 25.3.2020. Saatavilla <https://about.lens.org/>
19. Magic Leap 1 A Thousand Breakthroughs In One. Viitattu 2.4.2020. Saatavilla: <https://www.magicleap.com/en-us/magic-leap-1>
20. Oculus and PlayStation VR Jockey Atop the Virtual Reality Market. Viitattu 2.4.2020. Saatavilla: <https://uk.pcmag.com/sony-playstation-vr/122904/oculus-and-playstation-vr-jockey-atop-the-virtual-reality-market>

21. About Google Patents. Viitattu 5.4.2020. Saatavilla:
<https://support.google.com/faqs/answer/7049585>