



# **LiDAR-anturilla varustetun älypuhelimien käyttö 3D-mallinnukseen pelikehityksessä**

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö  
Tieto- ja viestintäteknikka, insinööri (AMK)  
Syksy, 2023  
Joni Salonen

Tieto- ja viestintäteknikka, insinööri (AMK)

Tekijä Joni Salonen

Työn nimi LiDAR-anturilla varustetun älypuhelimien käyttö pelikehityksessä 3D-mallinnukseen

Ohjaaja Mika Virolainen

Tiivistelmä

Vuosi 2023

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää käyttökelpoisia 3D-malleja käyttäen Applen LiDAR-anturia, joka löytyy uudemmissa iPhone Pro -malleista sekä uudemmissa iPad Pro -malleista.

Projektissa perehdyttiin Fotogrammetrialla luodun 3D-mallin luomiseen, optimointiin ja muokkausprosessiin, ennen kuin sitä voidaan käyttää pelimooitorissa. Tekniikan avulla saatiin hyvinkin realistisen oloisia 3D-malleja tuotua oikeasta ympäristöstä pelikäyttöön.

Projektissa suoritettiin kolmen erityyppisen kohteen 3D-mallintaminen käyttäen fotogrammetriaa LiDAR mobiililaitteilla. Ensimmäinen kohde oli alikulku, joka kulki rautatien alitse. Kohde valittiin sillä tämän mallisen kohteen mallinnus perinteisellä fotogrammetrian tavalla olisi hyvin hankalaa, ellei mahdotonta. Toisessa kohteessa kokeiltiin, kuinka menetelmä selviää isomman alueen mallintamisesta, joten tähän kohteeksi valikoitui skeittipuisto. Kolmannessa kohdassa kokeiltiin useiden mallikappaleiden kuvaamista eri tekniikoilla ja niiden käyttöä samassa tilassa. Tähän valikoitui huonekaluja, jotka asetettiin huoneeseen.

Tulevaisuudessa tekniikalle on varmasti käyttöä, sillä se voisi nopeuttaa mallinnukseen kuluva aikaa merkittävästi. Erityisesti aikaa säästyisi tekstuuriin luomisessa sekä fotorealististen yksityiskohtien luomisessa. Tekniikka myös mahdollisesti laskee fotogrammetrian käyttökustannuksia 3D-mallin luomiseen, kun lähes kaikilta jo löytyy valmiiksi älypuhelin taskustaan, jolla voitaisiin tehdä laadukkaita mallinnuksia peliin.

Molemmissa käytetyissä laitteissa oli omat huonot ja hyvät puolet. iPhonella luoduista malleista saatiin laadukkaampia lopputuloksia, mutta niitä piti kuvata moneen kertaan sekä editoida huomattavasti enemmän kuin iPadilla. iPadilla mallinnetuissa 3D -malleissa oli huomattavasti vähemmän reikiä. Mallit saatiin luotua huomattavasti nopeammin tehokkaamman M1 -sirun vuoksi. Tekstuuriin laatu oli läheltä tarkastellessa selkeästi huonompi kuin iPhonella kuvatuissa. Kuvaamisen aikana iPhonella saatiin myös kuvattua helposti kuvakulmista joihin iPad ei mahtunut.

Avainsanat Fotogrammetria, laserskannaus, Pelikehitys, 3D-mallinnus

Sivut 49 sivua

---

The purpose of the thesis was to develop usable 3D models using Apple's LiDAR sensor, which can be found in newer iPhone Pro models and newer iPad Pro models. The project introduced the creation, optimization and editing process of a 3D model created with photogrammetry before it can be used in a game engine. With the help of technology, very realistic 3D models could be imported from the actual environment for game development use.

In the project, 3D modeling of three different types of objects was performed using photogrammetry with LiDAR mobile devices. The first object was an underpass that ran under a railroad. It was chosen because modeling an object of this size using traditional photogrammetry would be very difficult, if not impossible. As for the second object it was tested how the method copes with modeling a larger area, therefore a skate park was chosen as this site. Regarding the third object, was tried modeling several model pieces with two techniques and using them in the same space. For this, furniture was selected and placed in the room. Both of the devices used had their own advantages and disadvantages. The models created on the iPhone produced results of better quality, but they had to be photographed many times and edited significantly more than on the iPad. The 3D models modeled on the iPad had considerably fewer holes and could be created significantly faster due to the more powerful M1 chip. The quality of the texture was clearly worse when viewed up close than when photographed with an iPhone. During filming, the iPhone was also able to shoot easily from angles where the iPad could not fit.

In the future, the technique will certainly be used, as it can significantly reduce the time spent on 3D modeling. Time would be saved in creating textures and creating photorealistic details. The technology also potentially lowers the costs of using photogrammetry to create a 3D model, when almost everyone already has a smartphone in their pocket that could be used to make high-quality modeling for a game.

Keywords Photogrammetry, laser scanning, game development, 3D modeling

Pages 49 pages

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	3D-mallinnus .....	2
2.1	3D-Mallinnustekniikoita .....	3
2.2	Fotogrammetria .....	5
3	3D-mallien optimointi.....	8
4	LiDAR teknologia .....	10
4.1	LiDAR historia.....	12
4.2	Käyttökohteet.....	13
5	Projektissa käytetyt laitteet ja ohjelmat.....	14
6	Sovelluskohde.....	16
6.1	Suunnittelu.....	16
6.2	Toteutus.....	17
6.2.1	Ensimmäinen kohde .....	18
6.2.2	Toinen kohde.....	28
6.2.3	Kolmas kohde.....	32
7	Pohdinta.....	37
	Lähteet .....	44

## Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1. Epätasaisesti valaistu pöydän pinta. ....	7
Kuva 2. Valon taittumisen vuoksi vääristynyt pinnan tekstuuri.....	7
Kuva 3. LiDAR iToF -menetelmällä. ....	11
Kuva 4. LiDAR dTOF -menetelmällä. ....	12
Kuva 5. suora- ja epäsuora mittaustekniikka.....	12
Kuva 6. Maastonkartoitus lentokoneella.....	13
Kuva 7. Kohde, josta ensimmäinen 3D-malli luotiin.....	19

Kuva 8. Kohteessa oli paljon yksityiskohtia .....	19
Kuva 9. Kuvattu 3D-malli. ....	20
Kuva 10. Automaattisesti luotu teksturi kuva 8K resoluutiolla.....	21
Kuva 11. Kuvatun mallin pinnat.....	21
Kuva 12. Ohjelmalla saatiin helposti rajattua mallista ulkopuoliset asiat pois rajaus työkalulla. .....	23
Kuva 13. Geometrian korjaustyökalu. ....	24
Kuva 14. Pintojen optimointi.....	24
Kuva 15. Lopullinen malli ennen tekstuuria. ....	25
Kuva 16. Mallin lopullinen teksturi. ....	26
Kuva 17. Lopullinen malli Unity pelimoottorissa. ....	27
Kuva 18. Ympäristö mallin ympärillä saa mallin sopimaan maastoon.....	27
Kuva 19. Maasto oli muovattava mallin ympärille. ....	28
Kuva 20. Jokelan skeittipuisto. ....	29
Kuva 21. Kuvattu 3D-malli.....	29
Kuva 22. Lopullinen 3D-malli skeittipuistosta. ....	30
Kuva 23. 2048x2048 resoluutiolla tekstuurista jäi epätarkka. ....	31
Kuva 24. Mallin koon vuoksi resoluutiota oli nostettava.....	31
Kuva 25. Mobiililaitteella luodut 3D-mallinnetut huonekalut pelimoottorissa. ....	33

Kuva 26. Ahtaat välit tuottivat ongelmia. ....	34
Kuva 27. Prosessoinnin aikana syntynyt virhe. ....	35
Kuva 28. Fotogrammetrialla tuotettu heikkolaatuinen 3D-mallinnus. ....	36
Kuva 29. Eroja fotogrammetrialla ja 3D-skannauksella tuotetuissa mallinuksissa. ....	37
Kuva 30. Yllä iPhonella kuvattu skeittipuisto ja alla iPadilla kuvattu alikulku.....	40
Kuva 31. 3D-Malli siirtynyt kuvaamisen aikana. ....	41

# 1 Johdanto

Teknologia kehitty vauhdilla ja tämän mukana markkinoille tulee jatkuvasti tarkempia ja yleensä kalliimpia laitteita. Kuluttajahintaluokan laitteilla harvoin saadaan tehtyä ammattitasoista fotogrammetriaa ja alusta asti luotu 3D-mallinnus vie paljon aikaa sekä vaatii suurta ammattitaitoa. Ostamalla saadaan käyttövalmiita laadukkaita 3D -malleja, joita voidaan suoraan käyttää pelikehityksessä, mutta yleensä laadukkaat valmiit mallit maksavat kymmenistä jopa satoihin euroihin, jonka vuoksi pienellä budjetilla toimivilla pelikehittäjillä ei ole resursseja käyttää näitä projekteissansa. Ulkoistettujen mallinnusten jatkojalostaminen kyseisen projektin tyyliin on erittäin vaikeaa. Tämän vuoksi on löydettävä jo valmiiksi kyseisen projektin tyyliin ja budjettiin sopivat mallit, joka voi olla yllättävän vaikeaa satojen mallien joukosta. Laadukkaat mallinnukseen käytettävät ohjelmat kuten Adoben Substance 3D -ohjelmistot ovat erittäin kalliita. Näiden syiden vuoksi monet Indie-pelit eivät ole visuaalisesti näyttäviä. Yhä useampi pelaaja hakee visuaalisesti näyttävää grafiikkaa pelistä, jonka vuoksi monet pienet tiimit eivät nouse isojen pelikehittäjien seasta kuluttajan silmiin huonon visuaalisen kokemuksen vuoksi, mielenkiintoisista pelimekaniikoista tai loistavasta tarinankerronnasta huolimatta. Mikäli laadukkaiden fotorealistic grafiikoiden luomiseen voidaan käyttää omaa puhelinta sekä ympäristöä, joka löytyy lähistöltä, voidaan helpottaa ja nopeuttaa erityisesti pelin 3D-mallien luonti prosessia sekä mahdollistaa muun muassa fotorealistic Indie-pelejä.

Puhelimet ovat kehittyneet erittäin paljon lähivuosina, eikä kehittyminen tule näillä näkymin loppumaan. Puhelimien kamerat ovat nousseet erittäin suureen arvoon niin tuotannossa kuin muussakin valokuvaamisessa. Apple teki erittäin suuren muutoksen 30.8.2023 tapahtuneessa Apple event -julkaisutapahtumassa. Kyseinen tilaisuus oli kokonaan kuvattu iPhoneella. (Apple, 2023) Puhelimilla nykyään voidaan tehdä lähes kaikkea työtehtävistä pelaamiseen.

Projektin tavoitteena on tutkia, voidaanko tuottaa laadukkaita fotorealistic 3D- malleja pelikäyttöön käyttäen puhelimesta löytyvää laitteistoa ja ilmaiseksi käytettävää ohjelmistoa. Tämä mahdollistaisi huomattavasti useamman harrastelu- tai työprojektin laadukkaamman lopputuloksen sekä lyhentäisi projektien kehitysaikaa huomattavasti ja näin ollen madaltaisi projektin kustannuksia.

Projektissa käytetään Applen iPhone 15 Pro Max -puhelinta sekä viidennen sukupolven iPad Pro -tablettia mallien taltioimiseen. Mallinnetut 3D-mallit optimoidaan pelikäyttöä varten tietokoneella.

Työssä keskitytään erilaisten kohteiden kuvaamiseen ja mallintamiseen sekä iPhonella, että iPadilla. Tarkastellaan mihin käyttökohteisiin menettely sopii sekä verrataan laitteiden suoriutumista tehtävistä.

Tavoitteena on mallintaa useampi toisistaan hyvin erilaisia skenaarioita käyttäen LiDAR-anturilla varustettuja mobiililaitteita. Valmiit 3D-mallinnukset tullaan optimoimaan pelikehitystä varten. Optimoidut mallinnukset tuodaan pelimoottoriin, jolloin kyseisiä malleja voidaan käyttää pelikehityksessä. Tavoitteena on mallintaa kohteita, jotka olisivat hyvin vaikeita, jollei mahdollisia mallinnettavia perinteisen fotogrammetrian avulla kaksiulotteisista valokuvista kolmiulotteisiksi malleiksi.

Työn lopputuloksena on tarkoitus luoda laadukkaita optimoituja kappaleita hyvin nopealla menetelmällä, joita voidaan käyttää pelimoottorissa ja pelikehitysprojektien lopputuloksissa.

## 2 3D-mallinnus

3D-mallinnuksella yleensä tarkoitetaan prosessia, jossa luodaan kolmiulotteinen kappale digitaalisessa ympäristössä (Adobe Substance 3D, n.d.). 3D-mallinuksen aikana voidaan kappaleelle määrittää kohteen koko, muoto ja tekstuuri. Prosessissa yleensä muovataan tai rakennetaan pisteiden, viivojen ja pintojen (engl. polygon) avulla kolmiulotteisen kappaleen luomiseksi (Adobe, n.d.). 3D-mallit koostuvat pohjimmiltaan pisteistä, jotka koostavat yhdessä pintojen kanssa verkon ja toimivat 3D-mallin runkona. Mallin pisteiden sijaintia x-, y- ja z-koordinaatteina muokkaamalla saadaan muokattua mallin muotoa. (SelfCad, 2020)

Yleisin tapa 3D-mallinuksen lähtöpisteelle on geometrisesti hyvin yksinkertainen muoto kuten kuutio tai pallo. Tätä joko muovaamalla tai pisteitä ja pintoja lisäämällä saadaan muodostettua halutun muotoinen kolmiulotteinen kappale. (Abbitt, 2020)

3D-mallinnukselle on paljon käyttötarkoituksia. Suurimpana käyttökohteena toimii viihdeteollisuus. 3D malleja käytetään niin animaatioelokuvissa kuin peleissäkin. (Adobe Substance 3D n.d.) 3D malleja käytetään muun muassa hahmojen, rekvisiitan, esineiden ja kokonaisien maailmojen luomiseen. Nämä 3D-mallit ovat ensimmäinen mihin yleensä



viihteen kuluttaja kiinnittää huomiota huomaamattaan, sillä siihen sisältyy lähes kaikkeen mikä ruudulla näkyy. (90 Seconds, 2023) 3D malleja voidaan animoida halutulla tavalla. Tätä käytetään niin animaatioiden ja elokuvien kuin pelien välielokuvissa ja mainonnassakin. 3D malleja käytetään myös erikoisefektien luomiseen niin animaatio- kuin näytelyihinkin elokuvaan ja sarjoihin. (Bondarenko, 2023) 3D-mallinnuksilla saadaan tarkasteltua, miltä efektit näyttävät kohtauksessa sekä sopiiko niiden ilme kohtaukseen. Lähiaikoina suureksi osaksi 3D-mallinnukselle on noussut 3D tulostus (FutureLearn, n.d.). 3D tulostuksen avulla voidaan suunnitella ja luoda kolmiulotteisia esineitä, joista voidaan tulostaa kolmiulotteisia esineitä muovista. (3d Printing, n.d.) 3D -tulostuksen mahdollisuudet ovat erittäin laajat. Arkkitehtuurialalla on 3D-mallintaminen noussut myös erittäin suureen arvoon. Kolmiulotteisilla malleilla voidaan esitellä suunnitelmat paljon selkeämmin asiakkaille, kuin kaksiulotteisilla kuvilla (Wayne, 2022). Lähestulkoon kaikista myyntiin tulevista tuotteista luodaan ensin kolmiulotteiset mallinnukset ennen ensimmäistä prototyyppiä, sillä siitä monesti huomataan virheitä suunnitelmissa, jotka voidaan korjata ennen prototyypin luomiseen kuluvaan aikaan ja resursseja. (Hattfield, 2020)

3D-mallit yleensä luodaan 3D-mallinnukseen tarkoitetuilla ohjelmilla kuten Blender, 3DS Max tai Adobe Substance 3D modeler (Pickavance, 2023). Mallinnus on kuitenkin hidas prosessi. Pelimoottoreissakin on yleensä mahdollista luoda 3D -malleja, mutta erilaisissa mallinnukseen tarkoitetuissa ohjelmissa on yleensä huomattavasti paremmat työkalut mallien rakentamiseen (Yurchenko, 2023). Valmiit mallit voidaan tuoda käsittelyn jälkeen pelimoottoriin, jossa ne voidaan sijoittaa pelimaailmaan. Pelimoottoreissa on myös yleensä jonkinlainen kauppapaikka, jossa voidaan myydä ja ostaa käyttövalmiita 3D -malleja (Ocean, 2023).

## 2.1 3D-Mallinnustekniikoita

3D-mallintamiseen käytetyt tekniikat voidaan karkeasti jakaa viiteen osa-alaan: tilavuusmallinnus (engl. solid modeling), pintamallinnus (engl. surface modeling), lankamallinnus (engl. wireframe modeling), digitaalinen kuvanveisto, (engl. digital sculpting) ja fotogrammetria (engl. photogrammetry). (3D-ace, 2021)

Tilavuusmallinnus on tarkkuutta vaativin tietokoneavusteinen suunnittelu (CAD) (Computer Aided Design) malli. Tilavuusmallinnuksessa yleensä työskennellään geometrisesti yksinkertaisilla muodoilla kuten kuutio, pallo tai kaari. Painoarvo tekniikassa on fyysisissä ominaisuuksissa kuten massassa, tiheyksissä ja ulkoisten voimien vaikutuksessa (Spatial,

n.d.). Tämän vuoksi kappaleita voidaan testata kuin ne olisivat fyysisiä kokonaisuusiatodellisessa maailmassa. Tilavuusmallinnus on CAD-tekniikoista eniten käytetty tutkimuksissa ja suunnittelussa, sillä se simuloi kappaleiden ulkokuorta ja sisäpuolta (Spatial, n.d.). Tämän vuoksi kappaleet voidaan leikata auki niiden sisäisten yksityiskohtien paljastamiseksi (pcmag, n.d.). Mallinnusmenetelmää hyödynnetään erityisesti 3D tulostamisessa, sillä kappaleet eivät ole onttoja (pcmag, n.d.).

Pintamallinnus on CAD-tekniikka, jonka avulla voidaan luoda visuaalisia kolmiulotteisia kappaleita. Nämä kappaleet voivat olla mekaanisia komponentteja kuten moottorinosia tai orgaanisia elämänmuotoja, kuten eläimet tai puut. Pintamallinnukset koostuvat ulkokuoresta ja ääriviivoista, joten ne ovat onttoja (Spatial, n.d.). Malleja ei voida leikata auki onttonuden vuoksi. Erona tilavuusmallinnukseen syntyy siitä, että kappale voi olla geometrisesti tai fyysisesti mahdoton eikä siinä oteta huomioon massaa tai fysiikoita. (Spatial, n.d.) Tämä mahdollistaa kappaleiden mallinnuksen, jotka olisivat fyysisesti tai geometrialtaan mahdottomia.

Lankamallinnuksessa mallit koostuvat enimmäkseen pisteistä, viivoista ja käyristä, jotka ilmaisevat kappaleen muotoa (Tiigimägi, n.d.). Lankamallinnuksella tuotetut 3D-mallit eivät ole kiinteitä, vaan enemmänkin luurankoesitys kappaleesta. Lankamallinnusta käytetään enimmäkseen karkeana viitteenä siitä millainen kappale voisi olla. Tekniikka on nopea ja vaivaton tapa luoda karkeita malleja muun muassa demonstrointi tarkoitukseen. (Rouse, 2017)

Digitaalinen kuvanveisto on tekniikka, jossa mallista muovataan haluttu lopputulos. Pintaa työstetään vetämällä, työntämällä nipistämällä ja tasoittamalla haluttuun muotoon. (Heginbotham, n.d.) Työ yleensä aloitetaan geometriallisesti yksinkertaisesta muodosta kuten pallo tai kuutio. Alkuperäisestä muodosta muovataan ensin hyvin karkea muoto lopullisesta kappaleesta. Tämän jälkeen malliin lisätään suurempia yksityiskohtia muovaamalla kuten nenä tai eläimen kynnet. (Heginbotham, n.d.) Pienemmät yksityiskohdat voidaan luoda normaali- ja tekstuurikartoilla (Tiigimägi, n.d.). Tekniikalla yleensä syntyy hyvin pintamäärältään suuria kappaleita (engl. high-poly). Käyttötarkoituksen mukaan mallien pintamäärää on optimoitava ennen kuin niitä voidaan käyttää muun muassa pelikehityksessä. Kappaleista luodaan tällöin pintamäärältään matala versio (engl. Low-poly). (Prafulla, 2022) Tekniikka on teho vaatimukseltaan erittäin raskas prosessi. Etenkin suurella pintojen määrällä. Tekniikka muistuttaa hyvin paljon saven muovaamista. Tämän vuoksi Adoben Substance 3D modeler mallinnusohjelmassa on virtuaalisen todellisuuden tuki, jolla

tekniikka on tuotu hyvin maanläheiseksi. Virtuaalisen todellisuuden tuen kanssa malleja muovataan käsin, kuin ne olisivat oikeita muovattavia kappaleita. (Adobe Substance 3D, 2022)

## 2.2 Fotogrammetria

Fotogrammetria on tekniikka, jolla saadaan luotua digitaalisia 3D-kappaleita oikeista esineistä tai paikoista sen koosta riippumatta. Perinteisessä fotogrammetriassa otetaan useita valokuvia kappaleesta useasta eri kulmasta niin, että valokuvissa on tarpeeksi päällekkäisyyttä, jotta niistä saadaan luotua 3D-kappale. Ideaalisessa lopputuloksessa päällekkäisyyttä tulisi olla noin 60 %. (Sketchfab, 2015) Valokuvia tarvitaan jokaisesta suunnasta niin, ettei kappaleesta jää kuvaamattomia kohtia. Mikäli kohteesta jää kuvaamattomia kohtia, syntyy 3D-malliin reikiä tai muita virheitä (Luhmann ym., 2013). Tekniikka vaatii erityistä huolellisuutta, jotta lopputuloksesta saadaan käyttökelpoinen. Fotogrammetria on erittäin käytännöllinen arkeologisissa kohteissa sekä vanhoissa tai heikossa kohteissa sillä itse malliin ei tarvitse koskea (Wessex Archeology, n.d.).

Fotogrammetriassa hyödynnetään kolmiomittausta. Kolmio mittauksessa määritetään pisteen sijainti kaikilta kolmelta akselilta. Kuvia otetaan useammasta eri kuvakulmasta, joista voidaan muodostaa akseli kameran ja kohteen eri pintojen välille. Kameran sijainnin ja orientaation perusteella voidaan laskea kohteen X-, Y- ja Z-koordinaatit. (Geodetic Services, n.d.) Z-koordinaattia voidaan tarkentaa huomattavasti valotutkan avulla (engl. light detection and ranging) (LiDAR) (Paul, 2018). Tällöin tekniikkaa yleensä kutsutaan nimellä Laserskannaus.

Yksityiskohtaiset pinnat, kuten kivet sopivat hyvin tähän tarkoitukseen, sillä pinnasta löytyy useita pisteitä, joista voidaan mallin orientaatiota seurata. Tasaiset yksiväriset pinnat monesti epäonnistuvat, sillä niissä ei ole yksityiskohtia, joista kappaleen orientaatiota voidaan seurata. (Photomodeler n.d) Tämä saadaan korjattua lisäämällä seurantapisteitä esimerkiksi erivärisillä lapuilla, jotka voidaan mallin muokkausvaiheessa digitaalisesti poistaa 3D-mallinuksesta.

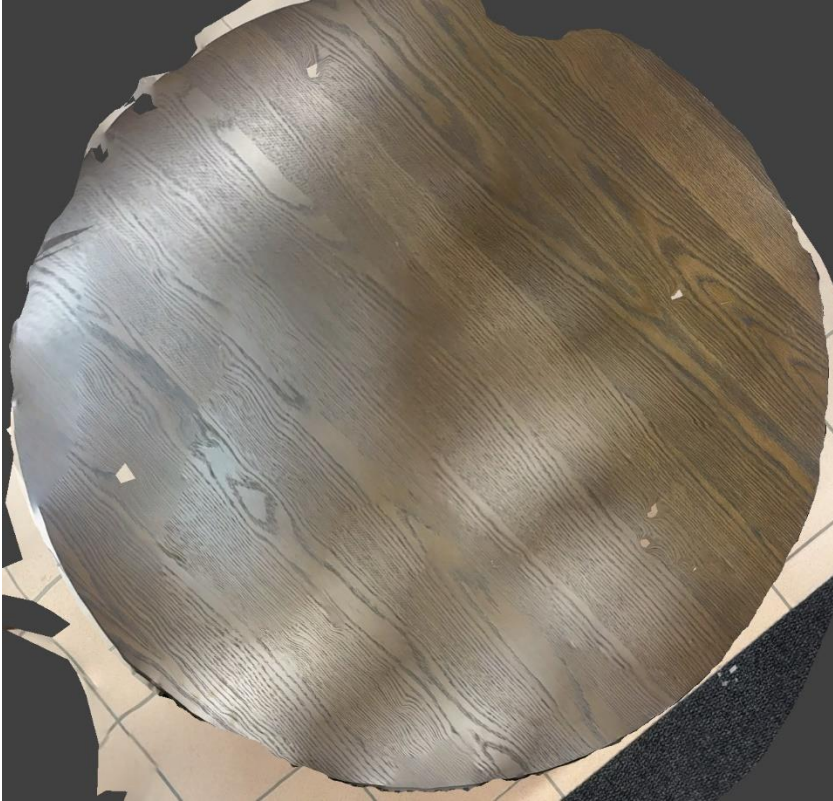
Fotogrammetriassa yleisesti ottaen ohuet ja kapeat yksityiskohdat tulevat erittäin huonosti näkyviin. Erilaisilla tekniikoilla voidaan saada pienempiäkin yksityiskohtia mukaan mallinnukseen. Nämä pinnat voivat kuitenkin tuottaa mallin käsittelyssä ongelmia, sillä ohuet pinnat näkyvät huonommin valokuvissa. (Artec3D, 2018) Pienissä pintaloissa on myös huomattavasti vähemmän geometriaa, jolloin niistä on vaikeaa saada tarkkaa Z-

koordinaattia. Valotutka tarkentaa Z-koordinaattia tarpeeksi, jotta tämän avulla saadaan huomattavasti yksityiskohtaisempia ja pienempiä kohteita esiin lopulliseen mallikappaleeseen. (Skyline software systems, 2020)

Läpinäkyvät pinnat tuottavat erityisesti ongelmia kohteisiin. Mikäli kohteessa on läpinäkyviä pintoja kuten lasi, nämä aiheuttavat vääristymiä tai huonolaatuisia pintoja. Kun kohteessa oleva lasi korvataan useilla valokuvilla, jotka saattavat olla eri kuvakulmista. Pinnan grafiikasta tulee läpinäkyvän pinnan vuoksi erittäin vääristynyt. Kohteet, joissa on tasaisia pintoja ilman kontrastin vaihtelua ovat vaikeita mallinnettavia kohteita fotogrammetrian avulla. Kohteiden tasaiset ja yksiväriset pinnat yleensä ohitetaan mallin automatisoidussa luomisessa, joten niihin tulee usein reikä tai muita vääristymiä. (Zuza. 2018) Pelikehityksen kannalta tekstuurin vääristymisestä ei ole suurta haittaa sillä kohteen tekstuuria saadaan muokattua läpinäkyvien osien kohdalta lasin mukaiseksi (World of level design 2022).

Heijastavat pinnat tuottavat vaikeuksia varsinkin epätasaisessa valaistuksessa. Mallin pintatekstuuri koostuu useista eri sijainneista ja kuvakulmista otetuista valokuvista, kuten kuvasta 1 huomataan, voi epätasaisen valon heijastuminen tuottaa useita valopilkkuja mallin pintaan. Jos mallissa on kiiltävä pinta ja se kuvataan tasaisessa valossa, tulee mallista erittäin ylivalottuneen näköinen. Mikäli kohteessa on kaarevaa läpinäkyvää pintaa, valonheijastuksen vuoksi kohteen tekstuuri vääristyy ja lopputulokseksi tulee aaltoileva tekstuuri kuten kuvasta 2 huomataan. LiDAR-anturin keräämän lisädatan vuoksi kuvan 2 mallinnuksen muoto on oikein, vaikka tekstuuri kiertää aaltoilevalla tavalla. Fotogrammetrialla toteutettuna myös mallin muoto kiertää samalla tavalla.

Kuva 1. Epätasaisesti valaistu pöydän pinta.



Kuva 2. Valon taittumisen vuoksi vääristynyt pinnan tekstuuri.



Tekniikan rajoitusten vuoksi perinteisellä fotogrammetrian tavalla on erittäin monimutkaista mallintaa alikulkuja tai tunneleita, sillä digitaaliset valokuvat eivät sisällä tarpeeksi dataa tällaisen suorittamiseen. Pelkkien valokuvien kaksiulotteisen datan perusteella, on lähes mahdotonta kertoa mistä kohdasta mallikappaleita valokuva on otettu. Aalto yliopiston maanalainen tutkimuslaboratorio sai mallinnettua kymmenen metrisen tunneliosuuden käyttäen 360 kameraa (Janiszewski ym., 2022). 360-asteinen valokuva sisältää huomattavasti enemmän dataa kuin perusvalokuva, jonka vuoksi tämä projekti on onnistunut. Tarkentamalla z-koordinaattia valotutkan avulla saadaan hyvinkin nopeasti mallinnettua ilman 360-kameraakin kohteen mukaisia kappaleita fotogrammetriaa hyväksikäyttäen.

Fotogrammetrialla on useita käyttökohteita. Fotogrammetriaa käytetään Ylivoimaisesti eniten maaston kartoitukseen ja karttojen luomiseen (Britannica, n.d.). Lisäksi Fotogrammetriaa käytetään erilaisten projektien suunnitteluun ja seuraamiseen. Fotogrammetrian avulla saadaan luotua 3D-malli kohteesta, johon projekti tehdään. Tällöin projekti voidaan suunnitella ja toteuttaa virtuaalisesti ennalta. (FlyGuys) Tämä nopeuttaa projektin kulkua sekä lisää projektin turvallisuutta. Koko ajan lisääntyvänä määränä fotogrammetriaa käytetään myös asuntojen välityksessä. Saadaan luotua 3D-malleja kohteista, joiden avulla alustava esittely onnistuu tarkemmin ilman, että tarvitsee saapua paikanpäälle. (White Horse Web Solutions, n.d.) Fotogrammetriasta on tullut iso osa pelikehitystä. Microsoft Flight Simulatorissa on useita kaupunkeja ja lentokenttiä luotu käyttäen Fotogrammetriaa (Aquila Simulations, 2020). Monessa Electronic Arts'in julkaisemassa pelissä on käytetty fotogrammetriaa hyväksi pelien kehityksessä. Todella iso osa Star Wars Battlefront -pelin ympäristöstä ja hahmojen yksityiskohdista on luotu käyttäen fotogrammetriaa. (Hamilton & Brown, 2016)

### **3 3D-mallien optimointi**

Merriam-Webster sanakirja määrittelee optimoinnin teoksi prosessiksi tai menetelmäksi, joka tekee jostakin suunnittelusta, järjestelmästä tai päätöksestä mahdollisimman täydellisen, tehokkaan tai toimivan (Merriam-Webster, 2023).

Pelikehityksessä optimoinnilla yleensä tarkoitetaan pelin ominaisuuksien tehovaatimuksen alentamista, jolloin ohjelma käyttää vähemmän laskentatehoa jokaiseen prosessiin. Tällöin peli pyörii tehokkaammin ja pelikokemus paranee. Jokaisella pelillä tai ohjelmalla on

käytettävissä rajallinen määrä resursseja käyttäjän tietokoneesta, pelikonsolista tai mobiililaitteesta. (Garney & Preisz, 2011, ss. 11—12)

Pelikehityksen aikana määritetään kohdeyleisölle tyypillisen laitteiston laskentateho. Pelaamisen näkökulmasta tietokoneen laskentatehoon tärkeimmät vaikuttavat komponentit ovat näytönohjain (GPU) (engl. Graphics Processing Unit), prosessori (CPU) (engl. Central Processing Unit) sekä RAM-muisti (engl. Random-Access Memory) (Dell, 2021). Peliä kehitettäessä tietokoneelle on huomioitava laaja määrä komponentteja eri valmistajilta, hintaluokista ja laaja määrä yleisimpiä resoluutioita sekä kuvasuhteita (Pan, 2017.). Pelien konsoliversioita kehitettäessä on otettava huomioon saman konsolin mahdolliset toiset versiot, kuten Playstation 4 konsolin Playstation 4 Pro, Playstation 4 ja Playstation 4 slim versiot, tai Microsoftin Xbox series x ja series s mallit. Tämän lisäksi yleisimmät resoluutiot, joilla konsoleita pelataan.

Optimointi on erittäin suuri osa pelin kehityskaarta, mutta sen ei tulisi määrittää kaikkia pelin ominaisuuksia. Laskentatehon käyttöä on tärkeää pitää silmällä koko projektin ajan, mutta ylimääräistä liikaoptimointia tulisi välttää. Liikaoptimointi voi hidastaa projektin etenemistä, rajoittaa pelin mahdollisuuksia tai johtaa ongelmiin, joiden korjaaminen voi olla erittäin hankalaa ja aikaa vievää.

Pelimaailmassa yleensä on useita eri 3D -malleja ruudulla samanaikaisesti. Lähes kaikki tilaa vaativat ja näkyvät objektit kuten rakennukset, esineet, henkilöt ja eläimet ovat 3D -malleja. (Unity. 2017) Mikäli nämä eivät ole tarpeeksi optimoituja voivat ne tehdä pilata pelikokemuksen. Muun muassa Cities Skylines 2 pelissä jokaisella henkilöllä on erittäin tarkkaan mallinnetut hampaat, vaikka ne eivät pelikokemuksen aikana ole näkyvissä. Nämä vievät huomattavasti laskentatehoa, mikäli hahmoja on erittäin paljon ruudulla samanaikaisesti. (Yin-Poole, 2023) Pelikehityksen optimoinnissa on hyvä pitää mielessä se, että vaikuttaako tämä laskentatehoa vievä yksityiskohta pelikokemukseen.

3D-mallien suurimmat laskentatehoon vaikuttavat tekijät ovat pintojen määrä ja geometria. Pintojen määrää laskemalla voidaan vaikuttaa mallin tehovaatimukseen ja tiedostokokoon. Tehokas tapa minimoida pintojen määrä, on poistaa pintoja mallin suunnilta, jotka eivät ole näkyvissä pelin aikana. Loistava esimerkki tästä löytyy Counter Strike Global Offensive pelin karttoja tarkasteltaessa. Kartan reunoilla sijaitsevilla rakennuksilla ei ole muita pintoja kuin julkisivu, sillä ne eivät ole näkyvissä pelaajalle kesken pelin. (The Library Cs Go, n.d.) Pienemmät yksityiskohdat malleissa voidaan korvata normaalikartalla. Normaali kartat

sisältävät tiedon pintakuviosta, jonka avulla voidaan lisätä yksityiskohtia mallin pinnalle kuten kuoppia, naarmuja tai pinnassa olevia muttereita. (Unity, 2018) Nämä yksityiskohdat voitaisiin tehdä myös geometrialla, mutta tämä olisi todella raskasta laitteistolle. Näihin käytetään yleensä normaalikarttaa. Tämä yksinkertaistaa pinnan geometriaa ja pintojen määrää, jolloin mallin renderöinti on huomattavasti kevyempää. (Unity, 2018) Pienentämällä mallien tekstuurin resoluutiota, voidaan vaikuttaa lopullisen pelin tiedostokokoon ja muistin kulutukseen. Pakkaamalla kuvatiedostot JPG-muotoon tai PNG – tiedostomuodolla voidaan myös pienentää tiedostokokoa. Nämä eivät kuitenkaan vaikuta suoritusmuistiin. (Vintage Is The New Old, 2023)

Fysiikkaperusteinen renderöinti (PBR) (engl. Physivally Based Rendering) käyttää useampaa renderöinti tekniikkaa, joilla pyritään saavuttamaan realistisempaa grafiikkaa mallintamalla valon käyttäytymistä. Menetelmän tavoitteena on minimoida työn määrä, joka vaaditaan grafiikan tuottamiseen erilaisiin valoisuusolosuhteisiin. (Learn OpenGL, n.d.) Tämä on varsinkin fotorealismia hakevissa peleissä erittäin yleinen tapa valon käyttäytymisen mallintamiselle ilman säteenseurannan laskennallista vaatavuutta. Tämän avulla voidaan luoda tekstuurikarttoja, joilla voidaan korvata suuria määriä materiaaleja, jolloin mallin teho vaatimukset laskevat. Menetelmä keskittyy enimmäkseen heijastumiseen, diffuusioon läpinäkyvyyteen ja metallisuuteen. Suorituskykyä voidaan myös lisätä vähentämällä heijastusta kohteesta, eli lisäämällä mallin karheutta. (Learn OpenGL, n.d.)

## 4 LiDAR teknologia

Valon lentoajan avulla etäisyyttä mittaava (engl. light detection and ranging) (LiDAR) valotutka on optinen tutkan tavalla toimiva laite, joka on ollut käytössä jo kauan, mutta vasta lähiaikoina se on otettu suuremmin käyttöön. Sen toimintaperiaate perustuu laservalon pulssiin, jonka takaisin heijastuessaan TOF (engl. Time-of-Flight) -vastaanottimeen, lasketaan etäisyys tunnetun valonnopeuden ja mitatun valon matka-ajan perusteella. (ToF-Insights, n.d.)

Tekniikkaa käytetään enimmäkseen kahdella eri tavalla. Suoralla dToF (engl. direct ToF) -mittaustekniikalla anturissa on laservalon lähetin ja yleensä pyörivä peili. Laservalon pulsseja heijastetaan kuvan 3 mukaisella tavalla pyörivän peilin avulla useisiin eri suuntiin, ja valon takaisin heijastuessaan vastaanottimeen lasketaan etäisyys kappaleeseen tunnetun valonnopeuden ja mitatun valon matka-ajan perusteella. Kun valopulseja on lähetetty ja vastaanotettu riittävä määrä, saadaan datan perusteella luotua kokonaisuus, joka on nimetty

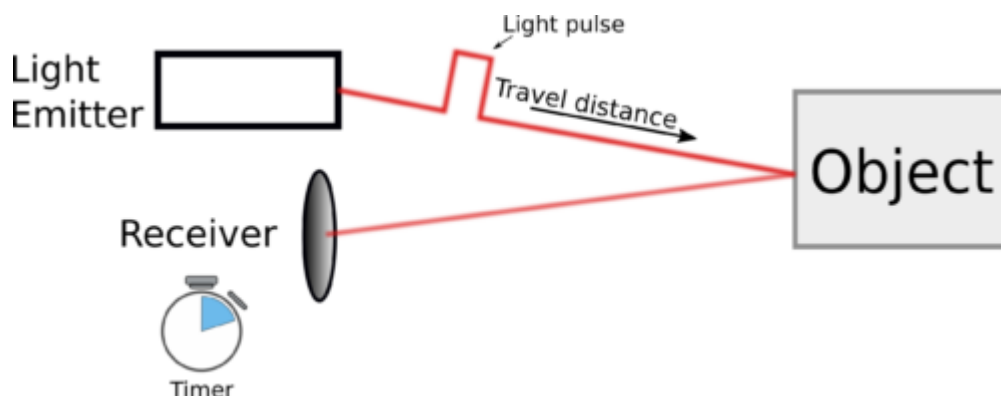


pistepilveksi. Pistepilven avulla saadaan luotua verkko, joka muodostaa kolmiulotteisen kappaleen. Menetelmän avulla saadaan mitattua huomattavasti pidempiä matkoja kuin epäsuoralla mittaustavalla. Suoran mittaustekniikka toimii paremmin sumuisessa tai pölyisessä ympäristössä sekä se antaa tarkemman lopputuloksen. Tekniikan haittoina on se, että pyörivän peilin vuoksi anturi on isokokoisempi ja kalliimpi, jonka vuoksi sitä ei voida hyödyntää mobiililaitteissa. (ToF-Insights, n.d.)

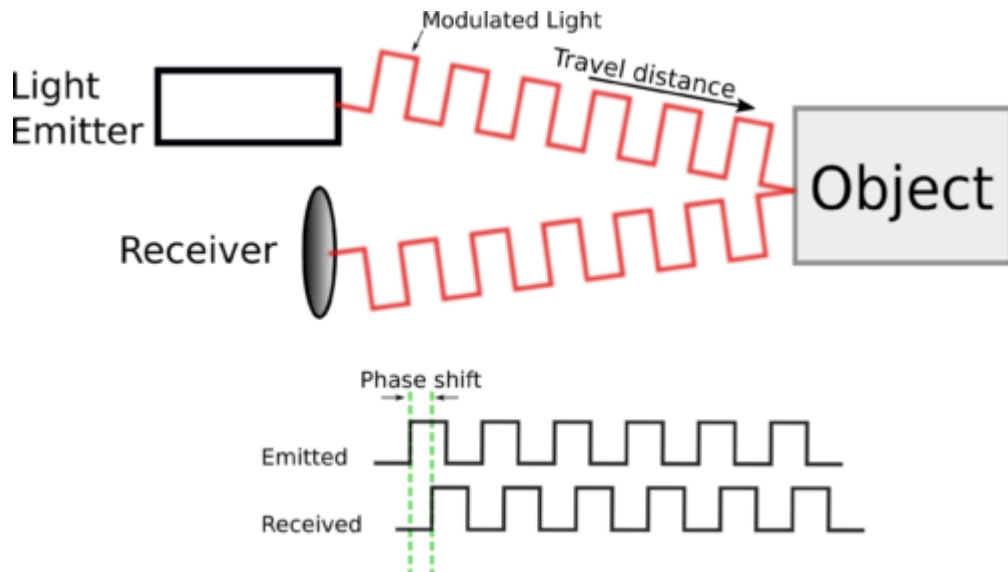
Epäsuoralla iToF (engl. indirect ToF) -mittaustekniikka on uudempi menetelmä lähietäisyydeltä mittaamiseen. Epäsuoralla mittaustaktiikalla laservaloa ei lähetetä pulsseina, vaan jatkuvana valona, joka moduloidaan. Valon takaisin kappaleesta heijastuessaan vastaanottimeen lasketaan vaihesiirron avulla valon kulkema matka kohteeseen kuvan 4 mukaisella tavalla. Kun valon vaihdekulman siirtymistä saadaan tietoa kappaleen jokaiselta pinnalta, saadaan datan perusteella luotua kokonaisuus, joka on nimetty pistepilveksi (engl. Point cloud). Pistepilven avulla saadaan luotua verkko, joka muodostaa kolmiulotteisen kappaleen. (Pointfuse, 2020)

Kuvan 5 mukaisen LiDAR-anturin luoman datan perusteella muodostetaan pistepilvi, joka muodostaa kappaleen. Tätä mittaus tekniikkaa kutsutaan myös ToF -kameraksi. Tällä mekaniikalla toimivassa anturissa ei ole liikkuvia osia, jonka vuoksi se on huomattavasti pitkäikäisempi, edullisempi ja pienempi, joten sitä voidaan hyödyntää myös mobiililaitteissa. Anturi toimii vain lyhyillä etäisyyksillä. Skannaaminen tehtävä hitaampaa, jotta saadaan tarpeeksi tarkka lopputulos. (ToF-Insights, n.d.)

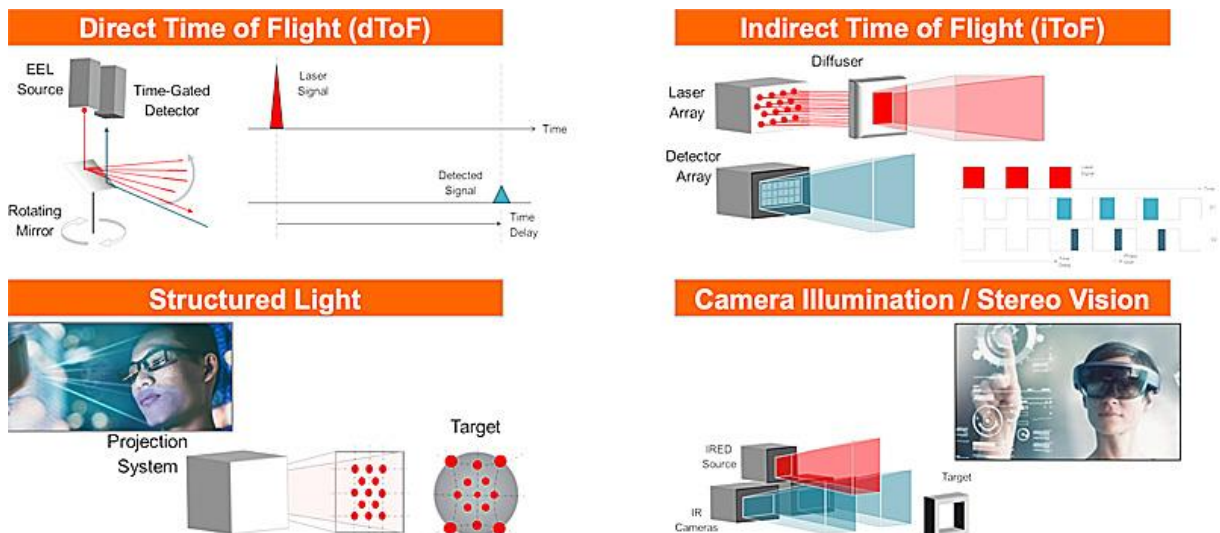
Kuva 3. LiDAR iToF -menetelmällä (ToF-Insights, n.d.).



Kuva 4. LiDAR dTOF -menetelmällä (ToF-Insights, n.d.).



Kuva 5. suora- ja epäsuora mittaustekniikka (Etn, 2022).



## 4.1 LiDAR historia

LiDARin konseptin kehitti Edward Hutchinson Synge vuonna 1930, joka käytti hyväkseen voimakkaita valoja tutkiessaan atmosfääriä (Weaire, n.d). Ensimmäisen kerran LiDAR teknologiaa käytettiin mittaamiseen vuonna 1938, kun meteorologit mittasivat valon pulsseilla pilvien korkeutta (Acroname, 2020). LiDARin nykyistä muotoa alettiin käyttämään nopeasti laservalon kehityksen jälkeen vuonna 1960. Laservalon toimiessa lyhyemmällä

aaltopituudella, se voi heijastua pienemmistä esineistä. Tämän vuoksi laservalolla pystyttiin tarkasti mittaamaan etäisyyttä muun muassa pilviin tai vesipisaroihin. 1960-luvulla LiDAR-tekniikkaa laajennettiin meteorologian ulkopuolelle ja erilaiset ilmasovellukset alkoivat käyttämään LiDAR-anturia. Tämä mahdollisti sen, että yli lennettäessä voitiin luoda visuaalisia kuvia maa- tai vesimassoista. Tämä teki LiDARista tärkeän työkalun geologiassa ja meren tutkimuksessa. (Hesai, 2023) NASA alkoi investoida LiDARiin edistyneenä navigointi- ja tunnistusteknologiana 1970-luvulla (Acroname, 2020). Varhaiset maakartat Marsista, Merkuriuksesta ja kuusta ovat kaikki luotu käyttäen LiDAR-skannereita (Hesai, 2023).

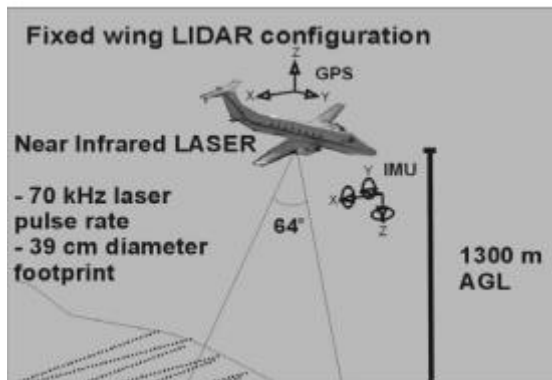
Tekniikka on alun perin nimetty nimellä "Colidar" nimellä (engl. Coherent light detecting and ranging) joka oli periytynyt "radar" nimestä (engl. radio detecting and ranging) (Noaa, 2023). Nykyisin tekniikan nimeä on lyhennetty termiksi LiDAR nimellä (engl. light detecting and ranging)

## 4.2 Käyttökohteet

Käyttökohteita LiDAR-antureille on useita, joista yleisin on maaston kartoitus. Maaston kartoitus onnistuu luomalla pistepilveä maastoon lennettäessä maaston yllä kuvan 6 mukaisella tavalla. Valotutkan avulla saadaan mitattua maaston korkeuden muutoksia maassa ja muilla planeetoilla. Erittäin ison osan saaneena uudempana ominaisuutena itse ajavat autot sekä robotit, kuten ruoan kuljetus robotit käyttävät LiDAR-antureita suunnistamiseen sekä esteiden välttelyyn. (Ortiz, 2023) Poliisin käyttämät nopeuden mittaus työkalut myös käyttävät LiDAR-anturia mitattavan kohteen nopeuden mittaamiseen (Traffic law guys, n.d.). LiDAR-anturien avulla myös tutkitaan alueita, joihin ei ole turvallista mennä, kuten tulivuoren toimintaa tai kaivostunneleita (Hesai, 2023).

Pelikehityksessä LiDAR-anturia ei ole vielä paljoa mallinnukseen käytetty. Assetto Corsa ja iRacing ajosimulaatio pelien ajoratoja on kehitetty hyväksikäyttäen valotutkia. Radat on luotu käyttäen dronea ja autoja, joissa on LiDAR-anturit. Ajorata on luotu pistepilven perusteella, jolloin saadaan hyvin tarkasti uudelleen luotua rata digitaalisessa muodossa. (Cozzens, 2022) Build the earth, Minecraft projektissa on käytetty hyväksi LiDAR-antureita maaston korkeudenmuutoksissa (Alps bte, n.d.).

Kuva 6. Maastonkartoitus lentokoneella (Nova Scotia Community college, n.d.).



Ensimmäinen etäisyystunnistusanturitekniikalla varustettu älypuhelin on ollut saatavilla jo vuoden 2016 Lenovon Phab 2 Pro -puhelimesta lähtien (Amadeo, 2021). Ensimmäinen LiDAR-anturilla varustettu älypuhelin Samsung galaxy S10 julkaistiin vuonna 2019 (Balaji, 2021). Apple lanseerasi vuonna 2020 neljännen sukupolven iPad pro -tabletin, joka oli ensimmäinen laite, joka sisälsi Applen LiDAR-anturin (Apple, n.d.-a). Samana vuonna Apple julkaisi iPhone 12 Pro -älypuhelimien, joka oli ensimmäinen Applen puhelin, joka sisälsi LiDAR-anturin (Apple, n.d.-b). Applen laitteissa LiDAR-anturi toimii integroituna kameran kanssa tarkentamassa AR (engl. Augmented Reality) kokemusta. iPhoneissa -anturia käytetään enimmäkseen yökuvaustilan parantamiseen sekä mittaustyökaluna. Uusista mobiililaitteista Applen iPhone Pro ja iPad Pro -mallit ovat ainoat laitteet, joista löytyy LiDAR-anturi tämän suuren valmistuskustannuksen vuoksi. (Amadeo, 2021)

## 5 Projektissa käytetyt laitteet ja ohjelmat

Projektissa käytetyt iPhone 15 Pro Max ja viidennen sukupolven iPad Pro ovat Yhdysvaltalaisen Steve Jobsin, Steve Wozniakin ja Ronald Waynen 1976 perustaman Apple Computer, nykyisin Apple Inc., -yhtiön valmistamia älylaitteita. iPhone 15 Pro Max on vuoden 2023 malli. Laitteen takaa löytyy kolme kameraobjektiivia. Pääkamera on 48mpx, 24 mm, f/1.78 aukolla. Ensimmäinen lisäkamera on ultralaajakamera, joka on 12mpx 13 mm, f/2.2 aukolla ja 120° kuvakulmalla. Toinen lisäkamera on 5x telekamera, joka on 12mpx 120 mm, f/2.8 aukolla. Kameroiden lisäksi mallista löytyy LiDAR-anturi. (Apple n.d.-b) Viidennen sukupolven iPad on vuoden 2021 malli. Laitteen takaa löytyy kaksi kameraobjektiivia. Pääkamera on 12mpx, f/1.8 aukolla ja lisäkamera on ultralaajakamera 10mpx f/2.4 aukolla ja 125° kuvakulmalla. (Apple n.d.-a)

Kohteiden mallintamiseen käytettiin Scaniverse -sovellusta. Scaniverse on Toolbox AI:n kehittämä ilmainen sovellus iPhoneille ja iPadille, jonka avulla saadaan luotua 3D-malleja

oikeista kappaleista. Sovellus on saatavilla iPhone ja iPad Malleille, joissa on A12 Bionic siru tai uudempi. Parhaat lopputulokset mallintamiseen saadaan kuitenkin malleilla, joista löytyy Applen LiDAR-anturi (iPhone 12 Pro ja uudemmat Pro -mallit sekä neljännen sukupolven iPad pro tai uudemmat Pro -mallit). (Scaniverse, n.d.) Scaniverse valikoitui käytetyksi ohjelmaksi, sillä se oli helppokäyttöinen, ilmainen ja sovelluksesta pystyi tuomaan mallit käyttökelpoisissa formaateissa. Moni ohjelmista osoittautui muuten ilmaiseksi, mutta jos halusi ohjelmasta tuoda mallin esimerkiksi FBX muodossa, täytyi tästä maksaa. Muun muassa Polycam vaikutti erittäin lupaavalta ohjelmalta, mutta mallin FBX-muodossa tuominen vaati pro tilauksen sovellukseen, joka maksoi 17,99 € kuukaudessa tai kertaostona 599,99 € (Polycam, n.d.). Scaniverse sovelluksessa oli riittävästi muokkaus toimintoja. Ohjelmalla saatiin helposti ja nopeasti rajattua virheet tai kohteen ulkopuolelta vahingossa mallinnukseen mukaan tulleet kohteet pois mallikappaleesta. Sovelluksesta myös löytyi yleisimmät värisävytys vaihtoehdot.

Scaniverse-ohjelmalla ei voitu käyttää fotogrammetriaa lainkaan ilman LiDAR-anturin tuomaa lisädataa. Tämän vuoksi eri tekniikoiden testaamiseen valikoitui 3D Scanner App™-sovellus. 3D Scanner App™-sovellus on Laan Labsin kehittämä ilmainen ohjelma, joka on ladattavissa Applen App storesta. Se on saatavilla iPhonelle, iPadille, iPod touchille ja Macille. (Laan Labs, n.d.) 3Dscannauksessa tämä ohjelma ei ollut yhtä hyvä kuin Scaniverse. Sovellus valikoitui työkaluksi sillä muut kokeillut sovellukset eivät antaneet luoda 3D-mallinnusta ilman LiDAR-anturin apua.

Geometrian korjaamiseen ja optimointiin käytettiin Instant Meshes ohjelmaa. Instant Meshes on ilmainen ohjelma, joka automatisoi algoritmin avulla retopologiaa. Instant Meshes on saatavilla Windows, Linux ja MacOS- käyttöjärjestelmille. (Wenzel, 2019)

Mallin viimeistelyyn käytettiin Blenderiä. Blender on ilmainen avoimen lähdekoodin ohjelma, jolla voidaan luoda tai muokata 3D malleja. Blender on vuonna 1998 julkaistu avoimen lähdekoodin Mallinnusohjelma. Blender käyttää polygonipohjaista mallinnusta. Blender on saatavilla Windows, Linux ja MacOS- käyttöjärjestelmille. (Blender, n.d.)

Pelimoottorilla tarkoitetaan ohjelmiston kehitysympäristöä, jonka on tarkoitus optimoida ja yksinkertaistaa pelikehitystä muun muassa omien renderöinti-, fysiikka-, - ääni-, - ja animaatiomoottoreiden avulla. Ensisijainen ohjelmointikieli yleensä myös vaihtelee pelimoottoreiden välillä. Esimerkiksi Unityn ensisijainen ohjelmointikieli on C#, kun taas

Unreal Enginen ensisijainen ohjelmointi kieli on C++. Unity valikoitui tähän käyttöön, sillä se on tutuin pelimoottori sekä C# on tutuin ohjelmointi kieli. (Unity, n.d.)

Pelimoottorina käytössä oli Unity. Unity on Unity Technologiensin vuonna 2005 julkaisema monialustainen pelimoottori. Unity käyttää C# -ohjelmistokieltä. Unitysta löytyy ilmaiseksi saatavan version lisäksi myös maksullinen Unity Pro -versio. (Unity, n.d.)

## 6 Sovelluskohde

Tässä luvussa käsitellään mallinnusprojektin kulkua suunnittelusta pelimoottoriin. Ensimmäisessä alaluvussa suunnitellaan ja pohjustetaan kohteiden valintaan vaikuttavia tekijöitä. Toinen alaluku keskittyy projektin konkreettiseen tekemiseen.

### 6.1 Suunnittelu

Toteutettavan projektin tarkoituksena on hyödyntää fotogrammetriaa ja Applen LiDAR valotutkalla varustettuja mobiililaitteita pelikehityksessä, ja tuoda oikeita kappaleita peliin objekteina. Tämä helpottaisi mallinnus prosessia ja vähentäisi huomattavasti 3D-mallinnukseen kuluvaan aikaa.

Mallinnustapa onnistuu vain, jos kyseinen kohde on fyysisesti kuvattavissa. Ensin on kuvattava mallinnettavan kohteen tai alueen jokainen näkyvillä oleva pinta. Ensimmäiseksi kohteeksi valikoituu vanha junaradan alittava alikulku. Päätökseen vaikutti kohteen yksityiskohtaisuus sekä se, että mallin muodon vuoksi kohteen kuvaaminen on tällä menetelmällä hyvin yksinkertaista, mutta perinteisellä fotogrammetrian menetelmällä erittäin monimutkaista. Alikululle on pelimaailmassa useita käyttökohteita. Sen tunnelma on helposti muokattavissa riippuen pelin tunnelmasta.

Toisena kohteena on tarkoitus kuvata isompi alue, ja selvittää miten tekniikka sopii isomman alueen mallinnukseen. Alueen mallinnuksessa on otettava kohteen suuren koon vuoksi optimointi eri tavalla huomioon. Mikäli kohdetta tarkastellaan läheltä, on tekstuuri oltava tarkempi, jotta läheltä tarkastellessa lopputuloksen tekstuuri ei ole huonolaatuinen. Kohteeksi valikoituu Jokelan skeittipuisto. Skeittipuistoissa on paljon monimutkaisia muotoja ja spraymaalilla maalattuja taideteoksia yksityiskohtineen. Muotojen mallinnukseen käsin menisi paljon aikaa ja vaivaa sekä yksityiskohtaisten maalauksien piirtämiseen tarvitaan

taiteellisuutta, kärsivällisyyttä ja ammattitaitoa, joten näistä saataisiin suuri hyöty kohteen tekstuuriin.

Kolmantena kohteenä on tarkoitus kuvata useampi kohde erilaisissa valaistuksissa ja koota näistä mallinuksista huone, jossa on useampi mobiililaitteella kuvattu kohde. Tähän valikoituu Maskun kalustetalon Hyvinkään myymälä, jossa mallinnetaan useampi huonekalu, ja verrataan erilaisissa valaistuksissa kuvattuja kohteita ja 3D-mallinnuksien skaalautuvuutta.

Mallien mahdolliset reiät ja muut häiriöt geometriassa on korjattava. Mallit on myös optimoitava muokkausvaiheessa, jotta nämä sopivat käytettäviksi pelimoottoreissa.

3D -skannatusta mallista tullaan tekemään geometrisesti kevyempi kappale, jonka pintojen määrää muokataan niin, että mallia tai useita malleja voidaan käyttää pelissä ilman suuria tehovaatimuksia. Prosessissa mallikappale tulee menettämään tekstuurin, joten kohteelle määritetään uv-koordinaatisto, jotta siihen saadaan kypsennettyä alkuperäisestä optimoimattomasta kappaleesta diffuusi-, normaali- ja ympäristön okklusiokartat uuteen malliin.

Pelimoottorissa tullaan luomaan malleille collider verkko, jottei pelaaja pysty kävelemään mallin läpi ja kohteita pystytään käyttämään halutulla tavalla. Kohteiden ympärillä olevaa maastoa on myös muovattava malleille sopivaksi, jotta kohteet sopeutuvat pelimaailmaan.

## 6.2 Toteutus

Projektin toteutus lähti käyntiin etsimällä hyviä kohteita pelimaailmaan tuotavaksi. Hyviksi kohteiksi osoittautuivat kohteet, joissa paljon grafiikkaa kuten graffiteja tai yksityiskohtainen tekstuuri kuten kivinen pinta. Näistä tuli parhaita lopputuloksia riittävän yksityiskohtaisuuden vuoksi automaattiseen mallin orientoimiseen eikä päällekkäisiä pintoja tai reikiä oikeastaan syntynyt. Tämän lisäksi näissä oli isoin hyöty, sillä kohteiden tekstuurista tuli hyvin vakuuttava suoraan, joten sitä ei tarvitsisi muokata.

Projektin kannalta oli tärkeää valita projektille suotuisat sääolosuhteet, sillä aurinkoisella säällä syntyi varjoja sekä vääränlaista valoa mallien päälle. Varjoja ei malliin saisi syntyä. Mikäli pelissä on dynaaminen päivän- ja yön kierto sekä useampia eri sääolosuhteita, ei aurinkoisella säällä kuvatun mallin valaistus eikä varjot sovi ympäristöönsä. Tämä tuottaa lopputuloksesta hyvin sekavan. Valoa piti myös olla paljon, sillä valon määrä vaikutti paljon

mallin laatuun kameran suljinajan muuttuessa. Parhaan lopputuloksen sai valoisenä pilvisenä päivänä, jolloin oli tasainen runsas valo.

Malleiksi valikoitui kohteita, joissa oli paljon yksityiskohteita, sillä niistä sai parhaan hyödyn lopulliseen optimoituun malliin. Parhaiten toimivat muun muassa urbaanien kaupunkien reunoilla sijaitsevat alikulut, joissa oli paljon graffiteja sekä kivet ja muut luonnonkohteet, joissa oli paljon graafisia yksityiskohtia. Erityisesti ongelmia tuottivat pinnat, jotka olivat kiiltäviä, ohuita, tai läpinäkyviä. Mallien tekstuurit koostuvat useista eri kuvakulmista otetuista valokuvista, jolloin kiiltävät tai läpikuultavat pinnat aiheuttivat erittäin vääristyneen tai epätasaisen pinnan. Huomattavasti helpotti se, että mallit pystyttiin renderöimään lopulliseen muotoon paikan päällä. Tämä mahdollisti mallien tarkemman tarkastelun heti ja tarvittaessa mallit pystyttiin kuvaamaan heti uudelleen. Myöhemmin ei tarvinnut lähteä uudelleen kuvaamaan.

### **6.2.1 Ensimmäinen kohde**

Ensimmäiseksi kohteeksi valikoitui alikulku, joka sijaitsi Hyvinkäällä. Kohde kuvissa 7 ja 8. Tämä valikoitui kohteeksi, koska siinä oli kiviset seinät, paljon graffiteja ja Mallin muodon vuoksi kohteen kuvaaminen on tällä menetelmällä hyvin yksinkertaista, mutta perinteisellä fotogrammetrian menetelmällä erittäin monimutkaista. Kohde oli myös helppo optimoida yksinkertaisen muodon vuoksi sekä kohde tuntui käytännölliseltä pelikäytössä. Kohteen keskellä oli selkeästi hämärämpää, mutta tämä ei haitannut sillä valaisemattomissa alikuluissa yleensä on hämärämpää keskellä ilman lisättyä valaistusta. Malli kuvattiin viidennen sukupolven iPad Pro:lla.



Kuva 7. Kohde, josta ensimmäinen 3D-malli luotiin.



Kuva 8. Kohteessa oli paljon yksityiskohtia



Kohdetta kuvatessa kokeiltiin useita eri tapoja kuvata kyseinen malli parhaan lopputuloksen saamiseksi. Parhaaksi tavaksi osoittautui kuvata kaikki yhdellä läpikävelykerralla, sillä jos jouduttiin mennä takaisinpäin, saattoi helposti tulla päällekkäisiä pintoja, joka aiheutti reikiä lopulliseen malliin. Kohteessa oli paljon vaihtelua seinien syvyydessä isojen kivien vuoksi, joista alikulku oli rakennettu. Tämän vuoksi seinät oli kuvattava useista eri suunnista. Kivien

jokainen näkyvä kohta oli kuvattava, ettei malliin jäänyt reikiä. Kuvasta 9 nähdään, että malli onnistui hyvin.

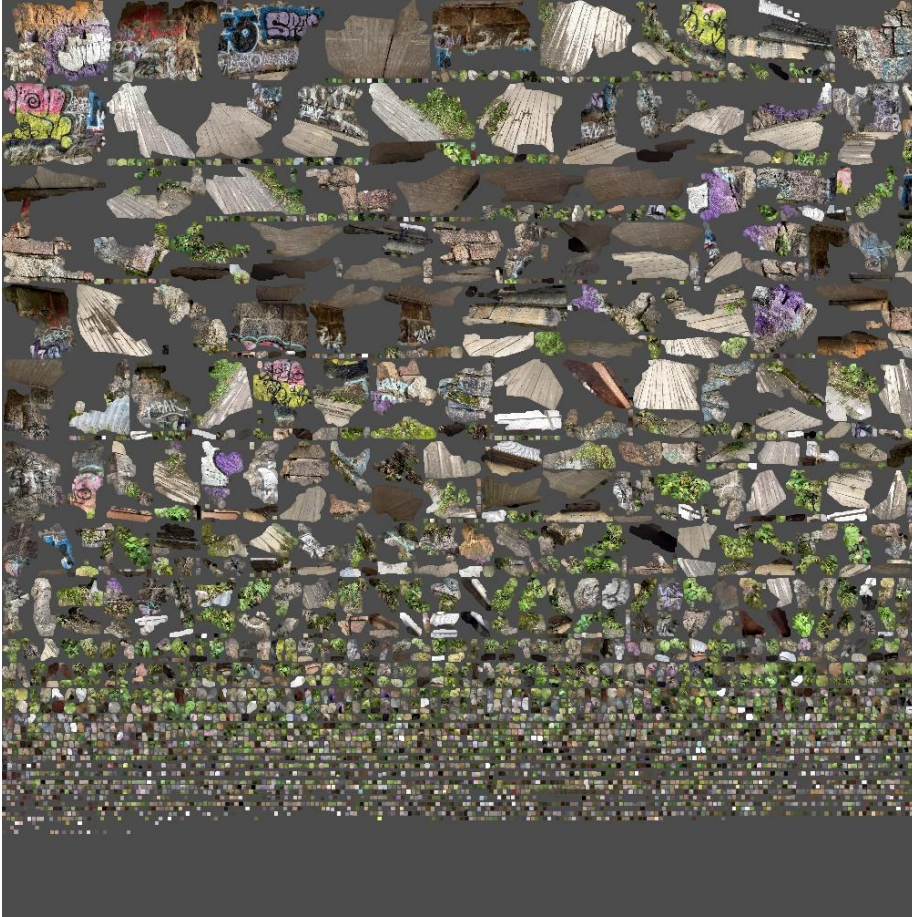
Ympärillä kasvavat kasvit oli leikattava pois mallista, sillä näistä ei olisi saanut hyvää lopputuolista ohuiden pintojen vuoksi. Mallin tarkastelun jälkeen mallin todettiin olevan hyvä muutamaa reikää maassa lukuun ottamatta, jotka voitaisiin paikata mallia muokatessa. Mallin tekstuuri muodostui iPadin kameran ottamista valokuvista 8K resoluutiona olevaan kuvaan täyttäen kuvaa riveinä kuvaamisen tahtiin. Tekstuuriin käytetyn kuvan resoluutio vaihteli kohteen koon mukaan. Tämän vuoksi ennen kuvaamisen aloittamista oli valittava minkä kokoista kohdetta ollaan kuvaamassa. Tekstuurissa oli selkeästi priorisoitu isoja pintoja, kuten maata sekä seiniä. Priorisoidut pinnat olivat automaattisesti luodussa tekstuuritiedostossa ensimmäisenä. Valokuvien koko pieneni tekstuuritiedostossa rivien edetessä. Kuvan 10 mukaisesti. Mallin geometria on optimoitava ennen kuin sitä voidaan käyttää pelimoottorissa, sillä siinä oli hyvin sekava geometria sekä 180 tuhatta pinta, joka on liikaa pelikäyttöön tulevassa objektissa. Mallin erittäin sekava geometria ja suuri pintojen määrä nähdään kuvassa 11.

Kuva 9. Kuvattu 3D-malli.

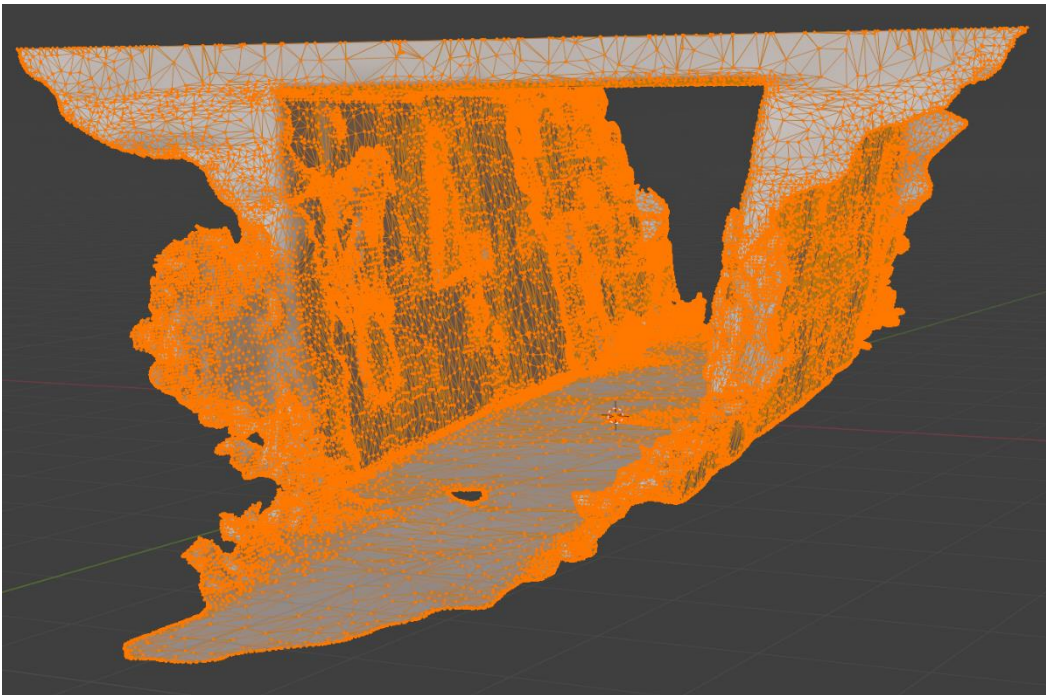




Kuva 10. Automaattisesti luotu tekstuuri kuva 8K resoluutiolla.

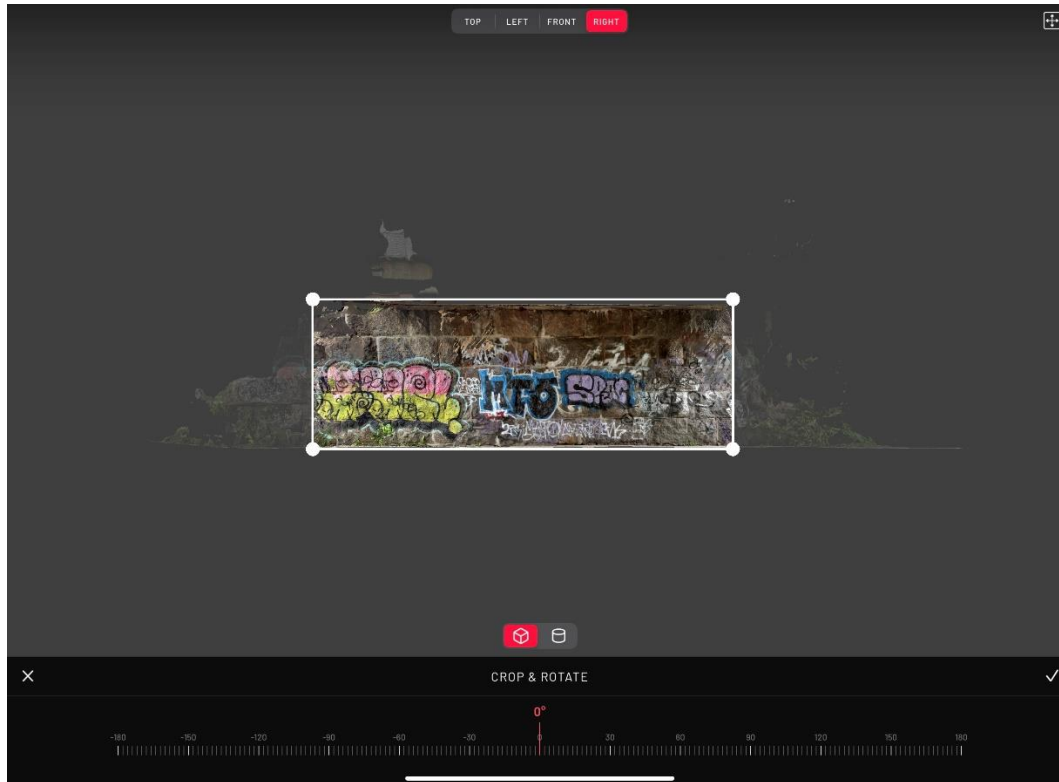


Kuva 11. Kuvatun mallin pinnat.

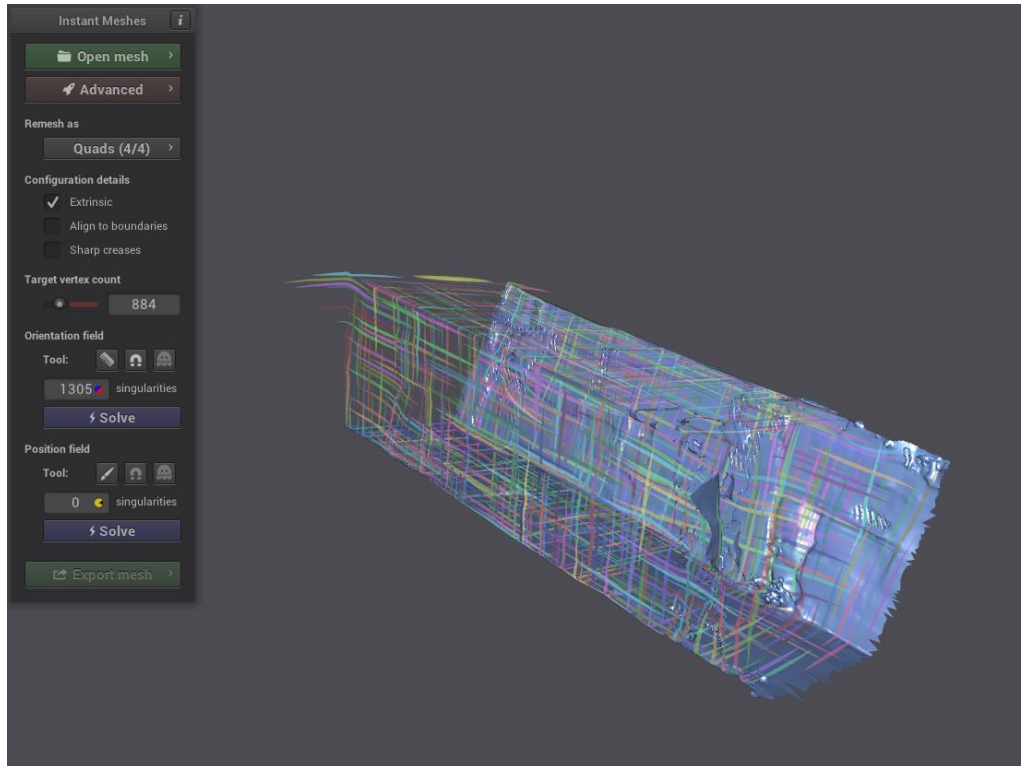


Kun mallit oli saatu kuvattua ja näihin oltiin tyytyväisiä, oli aika muokkaamiselle ja optimoinnille. Käytössä olleella Scaniverse sovelluksella saatiin helposti rajattua kohteen ulkopuolelta tarkoituksettomasti mallinnukseen mukaan tulleet kohteet ja mallin ulkopuoliset ongelmakohdat pois rajaustyökalulla kuvan 12 mukaisesti. Mallinnuksessa on erittäin paljon pintoja sekä hajonnutta geometriaa. Mallinuksista olisi saatu käsin optimoimalla huomattavasti optimoidumpi, mutta automatisoidulla Instant Meshes -ohjelmalla saadaan huomattavasti nopeutettua ja helpotettua tätä prosessia. Instant Meshes -ohjelma erikoistuu fotogrammetrian luomaan hajonneen geometrian korjaamiseen ja pintamäärän optimoimiseen. Ohjelmalla saadaan valittua millä tavalla pinnat virtaavat pitkin mallia kuvan 13 tavalla. Mallin geometria oli jo huomattavasti parempi, mutta ohjelman kampa työkalulla saadaan hienosäädettyä sitä mihin mallinnuksen pintojen reunat asettuvat. Kampa työkalulla piirrettiin kulmiin ja muihin pintojen taitoksiin rajat, jotta pintojen reunat asettuisivat kohdilleen eikä pinnat taipuisi väärällä tavalla. Mallien optimointi tällä ohjelmalla oli helppoa. Ohjelma ensin kertoi, kuinka monta pintaa mallissa oli, ja liukusäätimellä pystyi säätämään pintojen tavoite määrää prosentteina ylöspäin tai alaspäin. Kuvasta 14 havaitaan, että malliin tuli esille suuria selkeitä reikiä pintojen määrän vähentämisen jälkeen. Nämä reiät olisi kuitenkin helppo korjata blenderissä. Suuret reiät johtuivat siitä, että malliin oli syntynyt pieniä rakoja, jotka eivät olleet näkyviä alkuperäisessä mallissa, mutta kun pintojen määrää pienennettiin, reiät tulivat selkeästi esiin.

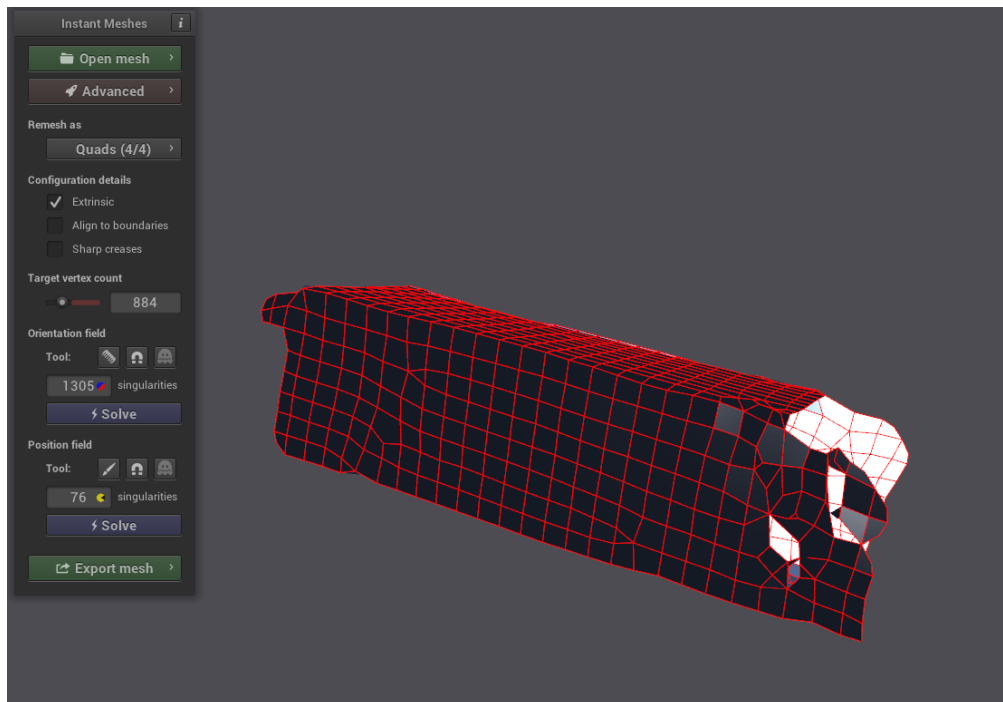
Kuva 12. Ohjelmalla saatiin helposti rajattua mallista ulkopuoliset asiat pois rajaus työkalulla.



Kuva 13. Geometrian korjaustyökalu.



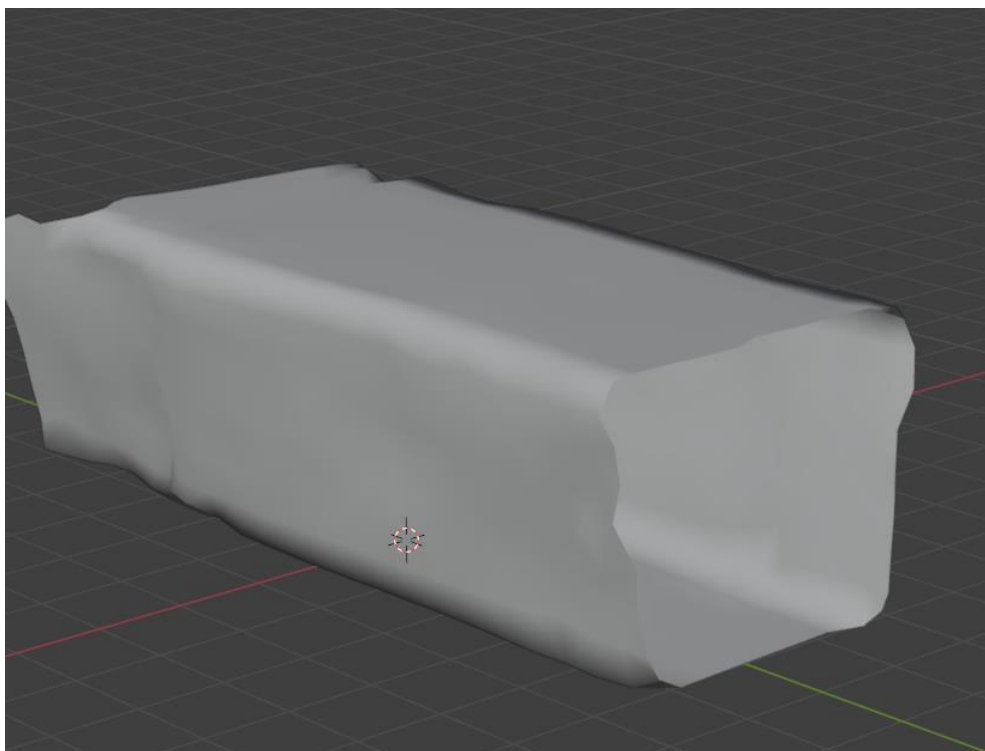
Kuva 14. Pintojen optimointi.



Optimoitu malli tuotiin Blenderiin, jossa oli tarkoitus korjata syntyneet reiät, luoda tekstuurit sekä tehdä viimeiset hienot muutokset. Reikien korjaamiseen Blenderistä löytyi työkalu, jolla

valittiin reiän ympärillä olevat reunat ja työkalu loi yhden uuden pinnan tämän reiän tilalle. Tämän jälkeen hieman suoristeltiin pintoja, jotka olivat selkeästi väärässä kohdassa. Muun muassa liian ulkona tai syvällä. Kohdista, joissa oli edelleen turhan monta pintaa, poistettiin ylimääräiset pinnat ja korvattiin ne yhdellä isommalla pinnalla, jolla saatiin optimoitua mallia hieman lisää. Kuvassa 15 lopullinen mallikappale ennen tekstuurien siirtoa. Tämän jälkeen mallille oli luotava uusi uv-koordinaatisto, sillä geometrian korjaava sekä mallin pintamäärää optimoiva vaihe kadottaa mallinnuksen tekstuurit ja tekstuurien sijainnit. Uv-koordinaatisto luotiin Blenderin smart uv unwrap työkalulla, joka tuotti riittävän hyvän uv-koordinaatiston näin yksinkertaiselle kappaleelle. kappaleeseen kypsennettiin alkuperäisestä optimoimattomasta kappaleesta diffuusi-, normaali- ja ympäristön okklusiokartat uuteen muokattuun malliin. Alkuperäisessä mallissa oli muutama reikä lattiassa, jotka tarvitsivat vielä tekstuurin. Sillä lattiassa oli laaja toistuva kuviointi, saatiin tekstuuri väritettyä helposti tilalle Blenderin leimasin työkalulla. Tämän työkalun avulla saadaan kopioitua tekstuuria toisesta kohdasta siihen kohtaan missä reiät sijaittivat. Kuvassa 16 mallin lopullinen tekstuurikuva tiedosto.

Kuva 15. lopullinen malli ennen tekstuuria.





Kuva 16. Mallin lopullinen tekstuuri.



Malli oli valmis käytettäväksi pelimoottorissa. Pelimoottoriksi valikoitui Unityn kolmannen persoonan valmis sapluuna, johon malli oli suoraan siirrettävissä. Aluksi malli asetettiin maailmaan ja sille asetettiin materiaali ja collider. Kuvassa 17 optimoitu malli tuotuna pelimoottoriin. Maastona käytettiin Unityn terrain peliobjektiivia, josta muovattiin oikean mallinen maasto käyttäen Digger työkalua, joka on ostettavissa unity asset storesta. Maaston muovaus onnistuu myös ilman tätä maksullista työkalua, mutta työkalun käyttäminen helpotti huomattavasti maaston muovaamista ja teksturointia. Unityn terrain objektiivi toimii korkeuskarttana. Maastoa ensin muovattiin korkeammaksi, jotta tämä muistuttaisi matalaa vuorta tai suurta kukkulaa. Maastokarttaan tehtiin reiät alikulun molempiin päihin, jotta pelaaja pääsisi maaston alle. Tämän jälkeen alikulku asetettiin kuvan 18 mukaisesti aukkojen väliin ja maasto muovattiin alikulun ympärille kuvan 19 mukaan mahdollisimman luonnollisesti. Alikulku on heti huomattavasti luonnollisemman ja realistisemmän näköinen. Mallikohteen mitat pysyivät tarkkoina koko prosessin ajan eikä skaalausta tarvinnut malliin tehdä.



Kuva 17. Lopullinen malli Unity pelimoottorissa.



Kuva 18. Ympäristö mallin ympärillä saa mallin sopimaan maastoon.



Kuva 19. Maasto oli muovattava mallin ympärille.



### 6.2.2 Toinen kohde

Tekniikka mahdollistaa isompien alueiden luomiseen 3D -skannauksen avulla. Ison alueen testimallinnukseen valikoitui Jokelan skeittipuisto. Kyseinen skeittipuisto on kuvattuna kuvassa 20. Kyseisessä paikassa oli paljon erilaisia muotoja ja graafisia kuvioita. Alue oli myös sekä riittävän iso tekniikalla alueen luomisen kokeilemiseen että tarpeeksi pieni, jolloin kuvaamisen harjoittelu oli helpompaa. Alue myös vaikutti käytännölliselle pelimaailmassa. Alue mallinnettiin käyttäen iPhone 15 Pro Max -puhelinta. Kuvaaminen vaati hieman suunnittelua, sillä keskellä ollut pooli oli huomattavasti korkeammalla kuin loppupuisto. Kun poolin reunalle noustiin, ohjelma helposti kadotti jo kuvattujen alueiden korkeuden sijainnin, jolloin malliin olisi syntynyt päällekkäisiä pintoja ja reikiä. Mallista saatiin hyvä jättämällä keskiosan pooli viimeiseksi, jolloin ohjelmalla oli enemmän dataa ympäristöstä ja malli pysyi yhdenmukaisena. Kohde oli kuvattava aikana, jolloin se oli märkä. Kuivalla ilmalla kohteessa



on useita käyttäjiä, jolloin kuvaaminen olisi huomattavasti hankalampaa. Kuvasta 21 nähdään, että mallista tuli erittäin hyvä puhelimen laadukkaan kameran vuoksi.

Kuva 20. Jokelan skeittipuisto (Roihuvuo, 2021).



Kuva 21. Kuvattu 3D-malli.



Mallille oli aika suorittaa samat korjaus ja optimointi toimenpiteet kuin ensimmäisellekin kohteelle. Tämä prosessi tapahtui tismalleen samalla tavalla kuin aikaisemminkin, jonka jälkeen malli oli käyttövalmis pelimoottoriin. Pelimoottorissa mallille osoitettiin materiaali ja collider verkko, jotta pelaaja ei vain menisi mallin lävitse ja mallinnusta voitaisiin käyttää tarkoituksen mukaisesti. Tämän jälkeen malli oli käyttövalmis. Kuvassa 22 Lopullinen mallikappale skeittipuistosta.

Kuva 22. Lopullinen 3D-malli skeittipuistosta.



Mallin tekstuuriin päätettiin valita hieman suurempi resoluutio graffitien laadun takaamiseksi. Ensimmäisen kohteeseen tekstuurin tarkkuudeksi valittiin 2048x2048, joka oli mallin koon vuoksi riittävä. Skeittipuistoon tämä resoluutio ei riittänyt niin, että tekstuuri olisi ollut tarkka ympäriinsä. Kuvasta 23 havaitaan, että kohteen tekstuuri jää huonolaatuiseksi riittämättömän tekstuurin resoluution vuoksi. Skeittipuiston tekstuurin laaduksi valittiin 4096x4096, jolloin skeittipuistoon maalatut graffitit pysyivät tarkkalaatuisina ympäriinsä mallia, kuten kuvasta 24 nähdään. Resoluutiota ei voinut myöskään priorisoida tietyille pinnoille, sillä mallin kaikki pinnat olivat nähtävissä ja yhtä tärkeitä.

Kuva 23. 2048x2048 resoluutiolla tekstuurista jäi epätarkka.



Kuva 24. Mallin koon vuoksi resoluutiota oli nostettava.





### 6.2.3 Kolmas kohde

Kolmantena kohteena testattiin huoneen täyttämistä useilla erilaisilla skannatuilla 3D-malleilla ja mallinnus tekniikoilla. Tähän tarkoitukseen käytiin Maskun kalustetalon Hyvinkään myymälässä kuvamassa erilaisia kalusteita, jotka oli tarkoitus asettaa huoneeseen.

Kohteessa kuvattiin sohva, rahi, sänky ja matto. Malleiksi valikoitui kohteet, joissa oli hieman eloisuutta pinnassa, sillä liian kiinteät ja suorat kohteet eivät näyttäneen yhtä realistisilta 3D-mallinnuksena. Huoneen lattialle tulevaksi matoksi valittiin kynnysmatto, jotta päästiin kokeilemaan, miten 3D-mallinnuksien tekstuurit kestivät skaalauksen isompaan kokoon. Sängyksi valittiin malli, jossa oli napitetun tyylinen petauspatja, sillä tasaiseen isoon valkoiseen pintaan tuli helposti suuria reikiä ja epätasaisuuksia kankaan tuomasta tekstuurstusta huolimatta.

Hankaluuksia aiheutti myymälän erittäin epätasainen valaistus. Malleihin tuli helposti varjoja, joita ei ollut näkyvissä kohteessa, mutta kun mallin tekstuuri koostuu useista eri kuvakulmista otetuista valokuvista, kaikki pienet varjot kasvoivat huomattavasti suuremmiksi ja lopputuloksesta tuli helposti huonosti valaistua mallinnus. Huonomman valon vuoksi myös malleista tuli huomattavasti rosoisempia kuin ulkona riittävässä valossa kuvatuista kohteista, joka huomataan kuvan 25 sängystä.

Hankaluuksia aiheutti kohteiden jalat. Jalat olivat yleensä pieniä, jolloin ne ohitettiin kokonaan 3D-mallin automatisoidussa luomisvaiheessa, joten jalat kuvattiin erikseen yksityiskohtaisesti ja lisättiin mallin muokkausvaiheessa.

Kaikille kappaleille tehtiin samat korjaus- ja optimointimenetelmät kuin ensimmäisessäkin kohteessa. Tämän jälkeen mallit olivat valmiita tuotavaksi pelimoottoriin. Pelimoottorissa kohteille määriteltiin materiaalit ja Colliderit. Huoneen seiniä eikä kattoa tehty loppuun asti demonstroinnin vuoksi.

Kuva 25. Mobiililaitteella luodut 3D-mallinnetut huonekalut pelimootorissa.



Kohteista olisi tullut erittäin vakuuttavia 3D-mallinnuksia studio ympäristössä, jossa olisi riittävä valaistus sekä mahdollisuus kunnollisesti mallintaa kohteet. malleihin saatiin hyvin eläväisyyttä asettelemalla tyynyjä erilaisiin kulmiin ja luomalla hajonneisuutta malliin. Tekniikka mahdollistaisi erittäin nopeasti kokonaisten alueiden luomisen käyttäen erilaisia kodeista löytyviä kalusteita ja esineitä.

Kohteessa kokeiltiin mallien skaalautuvuutta. Kuvan 25 matto on mallinnettu käyttäen kynnysmattoa ja skaalaamalla se suuremmaksi. Mallia pystyttiin hyvin skaalaamaan suuremmaksi ilman ongelmia. Mikäli kohteessa on paljon graafisia yksityiskohtia, on mallinnuksen tekstuurin resoluutiotakin skaalattava. Mittasuhteet ovat myös otettava huomioon mallinnuksia skaalattaessa. Kynnysmattojen leveys- ja pituus suhde on hyvin erilainen kuin normaalin lattiamaton.

Kohteessa selvitettiin eroa LiDAR-anturin avulla tuotetun 3D-skannauksen ja valokuvilla tuotetun fotogrammetrian eroa. Käytössä ollut Scaniverse-sovellus ei tukenut pelkillä valokuvilla tuotettua fotogrammetriaa lainkaan, vaan piti tähän käyttää toista sovellusta. Tähän käytettiin 3D Scanner App™-sovellusta. Sovelluksessa saatiin valittua käyttöön fotogrammetria joko käyttäen puhelimen yhtä, tai kahta kameraa. Kun molemmat kamerat

ovat käytössä, sovellus käyttää laitteen pääkameraa ja ultralaajakulmakameraa. Kun käytössä on vain yksi kamera, sovellus käyttää vain ultralaajakulmakameraa. Kahdella kameralla kuvatessa sovellus käytti molempia kameroita tunnistukseen kohteen z-akselin suuntaisen etäisyyden. Kun käytössä oli vain yksi kamera, sovellus ei pystynyt tunnistamaan etäisyyttä kohteeseen, joten etäisyyden oli oltava koko ajan vakio. Tarvittaessa tätä pystyttiin korjaamaan optisella zoomilla. Kahdella kameralla kuvatessa zoomaus ei ollut käytettävissä.

Fotogrammetrialla tuotetuissa malleissa oli oltava huomattavasti enemmän tilaa ympärillä. Myymälässä kun oli useita mallituotteita vierekkäin, saattoi kohteen etäisyys vaihdella useasti kuvauksen aikana. Tämä aiheutti ongelmia sekä yhdellä että kahdella kameralla toteutetussa fotogrammetrioissa. Kuvasta 26 nähdään, että tuotteiden välissä oleva maa kohoaa. Tämän vuoksi mallin rungosta tulee vääristynyt. LiDAR-anturin avulla tätä ongelmaa ei syntynyt lainkaan. Välillä fotogrammetrialla tuotetun kappaleen mallinnus oli erittäin rikki kuvan 27 tavalla, ja kohde oli kuvattava uudelleen. Tämä oli erittäin turhauttava huomata noin 15 minuutin prosessoinnin jälkeen. Tämä ongelma saattoi johtua virheestä sovelluksessa tai mallinnuksen prosessointi vaiheessa.

Kuva 26. Ahtaat välit tuottivat ongelmia.





Kuva 27. Prosessoinnin aikana syntynyt virhe.



3D-mallinnusten käsittelyaika kasvoi huomattavasti ilman LiDAR-anturin tuomaa lisädataa. Kahdella kameralla samanaikaisesti kuvatessa prosessointiaika pidentyi noin 20 sekunnista noin 15 minuuttiin. Yhdellä kameralla kuvatessa mallin prosessointiin tarvittiin noin 30 minuuttia. Tämä ilmeisesti johtuu LiDAR-anturin tuomasta lisädatasta, jolloin mallin prosessointi on huomattavasti helpompaa ja nopeampaa. Akun kapasiteetti kului myös huomattavasti nopeampaa mallien prosessoinnissa, kun ei ollut LiDAR-anturi käytössä. Tämä viittaa siihen, että fotogrammetrialla luotujen mallinnusten prosessointi on huomattavasti raskaampaa puhelimen prosessorille.

Malleja tarkastellessa huomattiin, että molemmat fotogrammetrian tavat käyttivät enemmän tallennustilaa. Kaikki LiDAR-anturin avulla tuotetut mallinnukset veivät ennen optimointi- tai korjaus muutoksia noin 35 % vähemmän tallennustilaakin yhdellä kameralla luotu 3D-mallinnus. Mikäli projektiin luodaan useita 3D-mallinnoksia, kasvaa tarvittava tallennustilan määrä merkittävästi. Mallien optimointi prosessin jälkeen ero oli noin 12 %. Kahden kameran avulla luodut mallikappaleet olivat noin 15 % suurempia tiedostoja kuin yhden kameran avulla luodut mallinnukset. Optimointiprosessin jälkeen lopullinen tiedostokoko oli lähes sama.

Fotogrammetrialla tuotetuissa mallinuksissa oli selkeästi parempaa pintageometriaa. Tämän vuoksi mallinnusten pintamäärä oli noin 75 % pienempi kuin LiDAR-anturin avulla luoduissa mallinuksissa. Optimointiprosessin jälkeen eroa ei oikeastaan ollut.

Tallennustilan ja pintamäärän ero tarkastettiin mallintamalla samat kappaleet uudelleen LiDAR-anturia käyttäen samalla sovelluksella, ja erot olivat hyvin lähellä aikaisemmin saatuja tuloksia, joten erot eivät johtuneet erisovellusten toiminnallisista eroista.

LiDAR-anturin avulla mallinnetuissa kappaleissa kohteen mitat pysyivät erittäin hyvin oikeellisina, mutta fotogrammetrialla tuotetun mallin mitat vaihtelivat jokaisella kuvauskerralla.

Fotogrammetrialla tuotetut mallinnukset olivat virheellisempiä kuin LiDAR-anturin avulla tuotetut mallinnukset. Kahdella kameralla ja LiDAR-anturin avulla mallinnetuista saadaan jatkokäsittelmällä hyviä malleja. Yhdellä kameralla mallinnetuissa kohteissa oli selkeästi enemmän ongelmia kuin muissa kohteissa, joka on nähtävissä kuvasta 28. Kuvasta 29 nähdään eroja eri tekniikoilla mallinnettujen 3D-mallinnusten eroja. Vasemmanpuoleinen on kuvattu käyttäen fotogrammetriaa kahdella kameralla ja oikeanpuoleiseen on käytetty avuksi LiDAR-anturia. Kaikkia malleja pitää jatko käsittellä lisää, mutta tekniikoiden avulla luotujen lopputulosten erot eivät olisi yhtä selkeitä.

Kuva 28. Fotogrammetrialla tuotettu heikkolaatuinen 3D-mallinnus.



Kuva 29. Eroja fotogrammetrialla ja 3D-skannauksella tuotetuissa mallinuksissa.



Sovellusten luomien mallinuksien välillä oli eroja. Scaniverse-sovelluksella luodut mallinnukset olivat selkeästi valotukseltaan hämäämpiä. Mikäli eri sovelluksilla luotuja mallinuksia käytetään samassa tilassa, on niiden valotus sovitettava yhteen. Muuten tilasta tulee hyvin sekava, sillä osa mallinuksista ovat selkeästi kirkkaampia kuin osa. Kuvan 29 vasemmanpuoleinen mallinnus on kuvattu 3D Scanner App™-sovelluksella ja oikeanpuoleinen Scaniverse-sovelluksella.

## 7 Pohdinta

Puhelimien kehittyessä voidaan yhä useampi tehtävä suorittaa mobiililaitteilla. Mobiililaitteiden kamerat erityisesti kehittyvät vauhdilla, jonka vuoksi niitä käytetään erilaisissa tuotannoissa kuvaamiseen jatkuvasti enemmän. Laitteilla luodut 3D-mallinnukset olivat erittäin tarkkoja, ja vastasivat kohteita erittäin hyvin.

Projektissa mallintamiseen käytettiin vain Applen mobiililaitteita. Tällä hetkellä markkinoilla ei ole uudempia kuluttajaluokan mobiililaitteita, jotka hyödyntävät LiDAR teknologiaa. LiDAR anturilla varustettuja mallinnukseen tarkoitettuja laitteita kuitenkin löytyy markkinoilta. Kuluttaja hintaluokan laitteilla lähes kaikissa 3D -skannaus laitteissa kantama on noin 70–100 senttimetriä. Tämä hankaloittaa erityisesti isojen alueiden mallintamista, sillä mallia on mallinnettava erittäin läheltä. Lyhyt välimatka vaikeuttaa erityisesti suurempien kohteiden

mallin orientaation seuraamista. Isompien alueiden mallintamisen mahdollisti iPhonen LiDAR –anturi viiden metrin kantama. Useiden alle 600 euron käsikäyttöisten skannereiden arvostelujen yhteisenä tekijänä on huonohko kamera. Todennäköisesti iPhonen kameran laatu on huomattavasti parempi, jonka vuoksi kohteeseen saadaan laadukkaampi tekstuuri. IPhonella ja iPadilla tuotettuja mallinnuksia vertaamalla huomataan laitteilla olevan suuri ero, joten voidaan olettaa, että näillä kuluttajaluokan 3D -skannereilla tuotettu grafiikka ei yllä iPhonella tuotetun grafiikan tasolle. Ammattitasaisten 3D -skannereiden hinnalla saadaan varmasti laadukkaampia mallinnuksia kuin puhelimella, mutta hintaa näillä on usein saman verran kuin koko puhelimella. Käsikäytettäviä 3D -skannereita ei ollut projektin aikana käytettävissä.

Mobiililaitteiden LiDAR-anturin luoma pistepilvi verkolla luotu 3D-malli on yllättävän tarkka. Kameran tarkkuus luo hyvinkin fotorealisticia tekstuureita kohteeseen. Mobiililaitteen käyttäminen fotogrammetrian työkaluna mahdollistaa hyvin monen erilaisen mallinnuksen luomisen isoista alueista pieniin esineisiin. LiDAR tekniikan yhdistäminen lennokkeihin voisi mahdollistaa hyvin nopeasti ja vaivattomasti suurien rakennusten tai ihmiselle vaarallisten alueiden, kuten vanhojen tunnelien mallintamiseen ja tutkimiseen. Prosessia helpotti huomattavasti mobiililaitteiden sirujen tehokkuus. Tämän avulla kappaleet saadaan koosta ja halutusta tarkkuudesta riippuen generoitua lopulliseen muotoonsa muutamissa minuuteissa LiDAR-anturin antaman lisädatan vuoksi. Tämä mahdollisti sen, että mallia pystyttiin tarkastelemaan tarkemmin heti kuvaus prosessin jälkeen. Mikäli malli ei onnistunut toivotulla tavalla. Olisi se saatu kuvattua heti uudelleen.

Luonnon olosuhteissa haasteeksi osoittautuivat sääolosuhteet. Mikäli kohde oli märkä sateen jäljiltä, tuli mallinnettu lopputuloskin olemaan hyvin märän näköinen. Toisena kohteena toiminut skeittipuiston betoni oli hyvinkin tumma tämän vuoksi alueilta, joista se ei ollut vielä kuivunut. Skeittipuiston mallintaminen olisi ollut hyvin hankalaa kuivalla ilmalla puiston käyttäjien vuoksi. Vesilätäköt olisivat aiheuttaneet vahvoja vääristymisiä tai ylivalottumista valon taittumisen vuoksi. Aurinkoinen sää aiheuttaisi liian lämpimällä valolla erittäin valaistuja kohteita, joissa olisi varjoja, jotka eivät reagoisi pelin valaistukseen ja loisi hyvin epäselkeän lopputuloksen kuten kappaleen, jolla olisi kaksi varjoa: Toinen dynaaminen pelin valaistukseen reagoiva, ja toinen staattinen koko ajan paikoillaan pysyvä. Riittämätön valo sai kohteesta hyvin synkän, joka ei sopisi pelissä ympäristön valaistukseen. Huonossa valaistuksessa mallinnetuista kohteista tuli myös pinnaltaan hyvin rosoisia ja epätarkan näköisiä laitteen kameran korkean suljinajan vuoksi. Parhaat sääolosuhteet luonnossa sijaitsevien kohteiden kuvaamiseksi osoittautuivat kirkkaat pilviset päivät, jolloin oli runsas

mahdollisimman tasainen valo. Runsaalla valolla laitteen kameran suljinaika oli huomattavasti lyhyempi, joka johti tarkempiin kuviin laitetta siirrettäessä. Studio-olosuhteissa ei sääolosuhteista tarvitsisi huolehtia.

Projektissa käytettiin Applen viidennen sukupolven iPad pro:ta sekä iPhone 15 pro Maxia. Kuvasta 30 nähdään, että iPhonella kuvatuista malleista tuli parempia lopputuloksia, sillä kyseisestä iPhonesta löytyy huomattavasti parempi kamerajärjestelmä kuin kyseisestä iPadista. iPhonella kuvattuja malleja jouduttiin myös muokkaamaan huomattavasti enemmän, sillä niihin syntyi selkeästi enemmän reikiä ja muita virheitä, jotka oli korjattava manuaalisesti, mutta lopputuloksesta syntyi laadukkaampi 3D-malli. iPhonella kuvaamisen jälkeinen mallin käsittelyaika oli huomattavasti pidempi, joka johtui iPhoneen A17 Pro ja iPadin M1 sirujen tehoerosta. Todennäköisesti tästä samasta syystä iPad pysyi paremmin mallin mukana, ja jonkin pinnan uudelleen kuvaaminen ei heti aiheuttanut uutta pintaa vanhan pinnan eteen niin kuin iPhonella tapahtui. Tämä nähtävissä kuvassa 31. Puhelimella saatiin kuvattua pieniä yksityiskohtia, jotka olivat koloissa joihin tabletti ei mahtunut. Alueiden kuvaamisessa tämä ei ollut ongelmana, mutta huonekaluja kuvatessa tämä osoittautui isoksi eroksi muun muassa sohvatyynyjen kolojen kanssa.



Kuva 30. Yllä iPhoneella kuvattu skeittipuisto ja alla iPadilla kuvattu alikulku.



Isoksi ongelmaksi osoittautui puhelimella kuvatessa se, että iPhoneen ruudulla malli ”tähti” jonka jälkeen 3D-mallin sijainti ei ollut enää synkronoitu kohteen kanssa ja ohjelma alkoi kuvaamaan uutta pintaa kohteeseen väärään z -akselin arvoon. Tämä johti siihen, että kuvaaminen oli aloitettava uudelleen, sillä lopputulokseen olisi tullut kaksi päällekkäistä kappaletta, jotka olivat hieman eri kohdissa ja paljon hajonnutta geometriaa sekä reikiä. iPadilla tätä ei oikeastaan tapahtunut. Isot kohteet oli hyvä saada yhdellä kerralla kuvattua, sillä luotava pistepilviverkko saattoi skannauksen aikana hieman liikkua kuvauksen aikana useasti muuttuneen mobiililaitteen etäisyyden kohteeseen tai virheellisten arvojen vuoksi. Tämä johti siihen, että jos jotain kohtaa kuvattiin uudelleen jälkikäteen, syntyi siihen uusi

pinta, joka oli yleensä hieman vanhan pinnan edessä. Tällöin koko malli oli kuvattava uudelleen. Tämä demonstroituna kuvassa 31.

Kuva 31. 3D-Malli siirtynyt kuvaamisen aikana.



Menetelmä sopii niin pienten kuin suurempienkin alueiden 3D-mallintamiseen. Fotorealistiset kappaleet saadaan luotua hyvinkin helposti. Muokkaamalla tekstuuritiedostoa saadaan kohteesta luotua hyvin erityyisiä mallinnuksia sopimaan pelin muuhun taidetyyliin. Esimerkiksi vahvistamalla kovia reunoja saadaan aikaiseksi sarjakuvamainen lopputulos.

Tekstuureista tuli erittäin hyviä taktiikalla. Suurin hyöty tässä menetelmästä syntyy juuri tekstuurista. Sillä tähän ei tarvitse juurikaan muutoksia tehdä kuvaamisen jälkeen. Uv-kartoitusta muuttamalla saadaan priorisoitua tiettyjä pintoja varaamalla näille enemmän pikseleitä. Tekstuurien yksityiskohtien luomiseen tarvitaan paljon aikaa ja ammattitaitoa, mutta kuvaamalla tekstuurista saatiin fotorealistinen lopputulos ilman sen kummempia taitoja.

Mallinnetut kohteet ovat hyvin skaalattavissa isommiksi tai pienemmiksi tarpeen mukaan. Kuvan 25 lattiamatto on mallinnettu käyttäen kynnysmattoa, jonka mallinnus on skaalattu

isomman maton kokoiseksi. Suuremmaksi skaalatessa on huomioitava tekstuurin tarkkuus. Mikäli tekstuuri on luotu hyvin pienellä resoluutiolla, tulee mallinnuksesta hyvin matalalaatuinen. Tällä taktiikalla saadaan useita käyttökohteita samoille mallinnuksille.

Muun muassa mallintamalla pieniä käyttöesineitä kuten pulloja, tai mittanauhoja saadaan näistä tarvittaessa skaalattua suuria esineitä peleihin, joissa pelaaja on hyvin pieni ja maasto koostuu suurennetuista esineistä. Mallintamalla suuria esineitä kuten kaapelikeloja, saadaan pienemmäksi skaalaamalla malleista hyvinkin erilaiseen käyttötarkoitukseen sopivia esineitä, kuten ompeluun käytettäviä lankarullia.

Projektissa luotuja 3D-mallinnuksia saadaan jatkokehitettyä käyttäen muita 3D-mallinnuksen taktiikoita, joiden toimintaa on avattu toisessa luvussa. Jatkokehittämällä malleja saadaan mallit sopimaan paremmin työnalla olevan projektin ympäristöön. Useampaa 3D-mallinnustekniikkaa hyödyntämällä saadaan luotua hyvin yksilöllisiä tai suuria kappaleita. Muun muassa kappaleeseen saadaan lisättyä yksityiskohta tai 3D –skannatun kohteen mallinnuksen pohjalta voidaan luoda jotain aivan täysin muuta.

LiDAR-anturi selkeästi helpottaa fotogrammetriaa. Anturin avulla luodut mallit ovat huomattavasti nopeammin prosessoitavissa, jolloin voidaan heti päättää mitä mallille tehdään. Malli on helposti kuvattavissa heti uudelleen, jos mallinnuksessa syntyy jonkinlaista ongelmaa. Kuvausprosessi on sen verran nopea, että lähes kaikki ongelmakohdat on helpompi uudelleen kuvata kuin jälkikäteen muokata mallinnusta. LiDAR-anturin avulla mallinnetut mallinnukset olivat myös pääsääntöisesti laadukkaampia kuin pelkän fotogrammetrian avulla luodut kappaleet.

Projektissa käytetty taktiikka sopii erittäin hyvin projekteihin, joissa on pieni budjetti kehitykselle kuten harrastustarkoituksessa luodut pelit, jolloin ei välttämättä ole riittävää ammattitaitoa fotorealististen mallien luomiseen tyriiden ammattitasaisten ohjelmien avulla tai tiimillä ei ole tarvittavia resursseja valmiiden mallien käyttämiseen projektissa.

Menetelmä voisi helpottaa ja nopeuttaa 3D-mallinnus prosessia huomattavasti. Alusta asti voi manuaalisesti mallintamalla fotorealistisia kohteita mennä useita tunteja ammattitaitoa jo pelkästään tekstuurin luomiseen. Suoraan mobiililaitteesta malleja ei pelimoottoriin voi siirtää, vaan niiden geometria, reiät ja optimointi on korjattava ennen käyttöä. Mutta tähän prosessiin menee huomattavasti vähemmän aikaa ja resursseja kuin kokonaisen mallin tekemiseen alusta alkaen käsin.



Tekniikan hyödyntämistä varten täytyy mallinnettavien kohteiden olla jo olemassa, ja niiden luokse on päästävä. Mitään mielikuvituksen tuotetta kuten lohikäärmeitä ei tällä tekniikalla voi luoda. Kaikki kohdat mallissa, joita ei saada kuvattua tulevat puuttumaan 3D-mallista. Pienet esineet voi laittaa roikkumaan kuvaamisen ajaksi, jolloin niistä saadaan kuvattua jokainen pinta, mutta isojen kohteiden ympärillä on oltava tarpeeksi tilaa, jotta niitä päästään kuvaamaan joka suunnalta.

## Lähteet

3D-Ace. (29.9.2021). *Types of 3d modeling: choosing the right one.* <https://3d-ace.com/blog/types-of-3d-modeling-choosing-the-right-one/>

3d printing. (n.d.). *What is 3D Printing?* <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>

90 Seconds. (4.10.2023). *What is a 3D Modeling Artist?* <https://90seconds.com/what-is/3d-modeling-artist/>

Abbit, G. (24.2.2020). *What to Model & Where to Begin | Starting Out 3D Modelling.* [video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=IrgxisntnRo&ab\\_channel=GrantAbbitt](https://www.youtube.com/watch?v=IrgxisntnRo&ab_channel=GrantAbbitt)

Acroname. (16.1.2020). *The history of lidar.* <https://acroname.com/blog/history-lidar>

Adobe. (n.d.). *What is 3D Modeling?* <https://www.adobe.com/products/substance3d/discover/what-is-3d-modeling.html>

Adobe Substance 3D. (18.10.2022). *First Steps with Substance 3D Modeler - 04 All Tools (VR Mode).* [video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=EYxSXnG2siY&ab\\_channel=AdobeSubstance3D](https://www.youtube.com/watch?v=EYxSXnG2siY&ab_channel=AdobeSubstance3D)

Alps bte. (n.d.). *Recreating our Countries in Minecraft.* Haettu 10.11.2023 osoitteesta <https://alps-bte.com/en/>

Amadeo, R. (9.6.2021). *Google kills its augmented reality "Measure" app.* Ars technical. <https://arstechnica.com/gadgets/2021/06/google-kills-its-augmented-reality-measure-app/>

Apple. (30.8.2023). *Apple Event - October 30.* [video] YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=ctkW3V0Mh-k&t=525s&ab\\_channel=Apple](https://www.youtube.com/watch?v=ctkW3V0Mh-k&t=525s&ab_channel=Apple)

Apple. (n.d.-a). *iPad Pro, 12,9-tuumainen (5. sukupolvi) - Tekniset tiedot.* [https://support.apple.com/kb/SP844?viewlocale=fi\\_FI&locale=fi\\_FI](https://support.apple.com/kb/SP844?viewlocale=fi_FI&locale=fi_FI)

Apple. (n.d.-b). *iPhone 15 Pro.* <https://www.apple.com/fi/iphone-15-pro/specs/>

- Aquila Simulations. [@AquilaSimX]. (18.8.2020). Updated Flight Simulator map to include all of the Points of Interest, custom airports (by edition) and detailed 3D cities (photogrammetry). #MicrosoftFlightSimulator [tviitti] Twitter.  
<https://twitter.com/AquilaSimX/status/1295802039663042561>
- Artec 3D. (9.8.2018). *Thin objects with little or no geometry*. <https://support.artec-group.com/hc/en-us/articles/205049592-Thin-objects-with-little-or-no-geometry>
- Balaji, S. (19.4.2021). *Samsung to skip the ToF sensor again on the upcoming Galaxy S22: Report*. <https://www.gizmochina.com/2021/04/19/385023-samsung-galaxy-s22-no-3d-tof-camera-sensor-report/>
- Blender. (n.d.). *The freedom to create*. <https://www.blender.org/about/>
- Britannica. (n.d.). *Photogrammetry*. <https://www.britannica.com/science/photogrammetry>
- Cozzens, T. (17.10.2023) *How navigation data is used for video game development*. Gps world. <https://www.gpsworld.com/how-navigation-data-is-used-for-video-game-development/>
- Dell technologies. (21.2.2021). *Dellin pelitietokoneiden esittely*.  
<https://www.dell.com/support/kbdoc/fi-fi/000152785/dellin-pelitietokoneiden-esittely>
- Etn. (7.10.2020). *Näin toimii lidar*. <https://etn.fi/index.php/tekniset-artikkelit/14091-naein-toimii-lidar>
- Fenstermaker team. (28.4.2022). *What Cell Phones Have LiDAR?* Fenstermaker.  
<https://blog.fenstermaker.com/what-cell-phones-have-lidar/>
- FlyGuys. (n.d.). *Photogrammetry in Construction*. <https://flyguys.com/photogrammetry-in-construction/>
- FutureLearn. (18.3.2022). *What is 3D modelling and what is it used for?*  
<https://www.futurelearn.com/info/blog/general/what-is-3d-modelling>

- Geodetic Services. (n.d.). *Basics of photogrammetry*. <https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/>
- Hamilton, A. & Brown, K. (2016). *Photogrammetry and Star Wars Battlefront*. Electronic arts. <https://www.ea.com/frostbite/news/photogrammetry-and-star-wars-battlefront>
- Heginbotham, C. (n.d.). *What is 3D Digital Sculpting?* <https://conceptartempire.com/what-is-3d-sculpting/>
- Ilogos. (n.d.). *Is Unreal Engine Good For 3D Modeling?* <https://ilogos.biz/is-unreal-engine-good-for-3d-modeling/>
- Hesai. (18.5.2023). *Brief History of Lidar Technology: How It Started*. <https://www.hesaitech.com/how-automating-your-warehouse-can-help-with-labor-shortages/>
- Janiszewski, M., Torkan, M., Uotinen, L., Rinne, M. (31.11.2022). *Rapid Photogrammetry with a 360-Degree Camera for Tunnel Mapping*. <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/21/5494>
- Laan Labs. (n.d.). *3D Scanner app™*. App Store. <https://apps.apple.com/us/app/3d-scanner-app/id1419913995>
- Library csgo. (n.d.). *Blank Birds Eye View Maps*. <https://thelibrarycsgo.wordpress.com/2012/09/30/blank-birds-eye-view-maps/>
- Luhmann, T., Robson, S., Boehm, J. (27.11.2013). *Close-range photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter. <https://ebookcentral-proquestcom.ezproxy.hamk.fi/lib/hamk-ebooks/reader.action?docID=1563368>
- Merriam-Webster. (27.11.2023). *optimization*. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/optimization>
- Mikepan. (n.d.). *GameEngineBook*. <http://mikepan.com/GameEngineBook/text/08-Optimization.html>

- Ocean. (10.2023). *What is the Unity Asset Store and how do I purchase Assets?*  
<https://support.unity.com/hc/en-us/articles/210142503-What-is-the-Unity-Asset-Store-and-how-do-I-purchase-Assets->
- Ortiz, S. (2.8.2023). *BMW tests next-gen LiDAR to beat Tesla to Level 3 self-driving cars.*  
<https://www.zdnet.com/article/bmw-explores-next-gen-lidar-to-beat-tesla-to-level-autonomous-vehicles/>
- Paul. T. (29.9.2018). *LiDAR Basics: The Coordinate System.* Hackernoon.  
<https://hackernoon.com/lidar-basics-the-coordinate-system-a26529615df9>
- Pcmag. (n.d.). *Solid modeling.* <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/solid-modeling>
- Photo modeler technologies. (n.d.). *Getting the Highest Possible Accuracy with Photogrammetry.* Haettu (13.10.2023) osoitteesta  
<https://www.photomodeler.com/kb/getting-the-highest-possible-accuracy/>
- Pickavance, M. (13.11.2023). *The best 3D modeling software in 2023.*  
<https://www.techradar.com/best/best-3d-modelling-software>
- Polycam. (n.d.). *Polycam 3D Scanner, LiDAR, 360.* Appstore.  
<https://apps.apple.com/fi/app/polycam-3d-scanner-lidar-360/id1532482376?l=fi>
- Prafuella. (14.7.2022). *High poly vs Low poly in 3D Modeling explained in simple terms.*  
<https://www.queppelin.com/high-poly-vs-low-poly-in-3d-modeling/>
- Roihuvuo, I. (10.6.2021). *Jokelan skeittipuisto on yksi lasten ja nuorten hyvinvointia edesauttavista tekijöistä.* [kuva]. Facebook.  
<https://www.facebook.com/ilariroihuvuo2021/photos/a.148288993982304/162382645906272/?type=3>

- Rouse, M. (1.6.2017). *Wireframe Modeling*. Techopedia.  
<https://www.techopedia.com/definition/10061/wireframe-modeling>
- Scaniverse. (n.d.). *Scaniverse - 3D Scanner*. <https://apps.apple.com/us/app/scaniverse-3d-scanner/id1541433223>
- SelfCad. (15.1.2020). *XYZ Coordinates in 3D Workspace | SelfCAD Beginner Modeling*. [video]. YouTube.  
[https://www.youtube.com/watch?v=VMUpqsCVtP0&ab\\_channel=SelfCAD](https://www.youtube.com/watch?v=VMUpqsCVtP0&ab_channel=SelfCAD)
- Sketchfab. (18.6.2015). *How to set up a successful photogrammetry project*.  
<https://sketchfab.com/blogs/community/how-to-set-up-a-successfulphotogrammetry-project/>
- Skyline software systems. (5.5.2020) *LiDAR and Photogrammetry The Tools Behind Accurate 3D Models* [video]. YouTube.  
[https://www.youtube.com/watch?v=XplftlOYYZA&ab\\_channel=SkylineSoftwareSystems](https://www.youtube.com/watch?v=XplftlOYYZA&ab_channel=SkylineSoftwareSystems)
- Spatial. (n.d.) *Glossary – solid modeling*. <https://www.spatial.com/resources/glossary/what-is-solid-modeling>
- Spatial. (n.d.) *Glossary – surface modeling*.  
<https://www.spatial.com/resources/glossary/what-is-surface-modeling>
- Tiigimägi, S. (n.d.). *Miten 3D-mallinnus tehdään? [Kattava opas]*. <https://3dstudio.co/fi/how-to-3d-model/>
- ToF-Insights. (n.d.). *LiDAR and ToF Cameras – Technologies explained*. <https://tof-insights.com/time-of-flight-lidar-and-scanners-technologies-explained/>
- Traffic law guys. (n.d.). *How do Police Measure Speed?* <https://trafficlawguys.com/how-do-police-measure-speed/>

Unity. (2018). *Normal map (bump mapping)*.

<https://docs.unity3d.com/2018.3/Documentation/Manual/StandardShaderMaterialParameterNormalMap.html>

Unity. (2017). *Models*. <https://docs.unity3d.com/560/Documentation/Manual/FBXImporter-Model.html>

Vintage is the new old. (5.22.2023). *How do I reduce the size of a game?*

<https://www.vintageisthenewold.com/game-pedia/how-do-i-reduce-the-size-of-a-game>

Wayne, A. (1.2.2022). *3D Modeling: 4 Types Used in Architectural Projects*.

<https://archicgi.com/architecture/3d-modeling-types-in-architecture/>

Weaire, D. (12.2013) *Synge, Edward Hutchinson*. <https://www.dib.ie/biography/synge-edward-hutchinson-a9583>

Wenzel, J. (3.11.2019) *Instant.meshes*. Github. <https://github.com/wiakob/instant-meshes>

White Horse Web Solutions. (n.d.). *3D Real Estate*.

<https://whitehorsewebsolutions.com/photogrammetry/realestate/>

World of level design. (1.7.2022). *Substance Painter: Complete How to Create Glass Tutorial*. <https://www.worldofleveldesign.com/categories/substance/glass.php>

Yin-Poole, W. (27.10.2023). *Cities Skylines 2 Dev Addresses Character Teeth Controversy*. <https://nordic.ign.com/cities-skylines-ii/74659/news/cities-skylines-2-dev-addresses-character-teeth-controversy>

Zuza, M. (13.3.2018). *Photogrammetry – 3D scanning with just your phone/camera*. Prusa research. [https://blog.prusa3d.com/photogrammetry-3d-scanning-just-phone-camera\\_7811/](https://blog.prusa3d.com/photogrammetry-3d-scanning-just-phone-camera_7811/)