

Tomi Porras

# TISLAUSKOLONNIN 3D-MALLINNUS

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Tomi Porras: Tislauskolonnin 3D-mallinnus, 3D-modeling of the distillation column  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Automaatiotekniikka  
Toukokuu 2019

---

Tässä työssä tutkitaan eri vaihtoehtoja 3D-mallin tekemiseen. Kokeellisessa osuudessa tavoitteena on 3D-mallin luominen Tampereen teknillisen yliopiston sähkökonehallin tislauskolonnista, jossa yhtä tutkituista mallinnusmenetelmistä käytetään mallin toteuttamiseen. Tavoitteena on selvittää, mikä menetelmä mahdollistaa parhaan lopputuloksen.

Projektissa toteutettava 3D-malli on tarkoitettu automaatiotekniikan laboratorion opetuskäyttöön.

Avainsanat: Kolmiulotteinen mallinnus, CAD, Image-based Modeling

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. 3D-MALLINNUS.....	2
2.1 CAD-mallinnus .....	2
2.1.1 Rautalankamallinnus.....	2
2.1.2 Pintamallinnus .....	3
2.1.3 Kiinteä mallinnus.....	3
2.2 Image-Based Modeling .....	4
2.2.1 Pikselistä 3D-pisteeksi .....	4
2.2.2 3D-pisteestä malliksi .....	5
2.2.3 Kuvien valinta .....	6
2.3 3D-skannaus.....	7
2.3.1 Laserskannaus .....	7
2.3.2 Structured-light-skanneri.....	8
2.3.3 RGB-D-kamera .....	8
3. 3D-MALLIN TOTEUTUS .....	10
3.1 Mallinnus SOLIDWORKS:lla .....	10
3.2 Mallinnus AutoDesk ReCap:lla.....	12
4. TULOKSET .....	15
4.1 IBM-malli.....	15
4.2 CAD-malli.....	16
5. YHTEENVETO.....	17
LÄHTEET .....	18
LIITE A: KOLONNIMALLIN KOMPONENTIT.....	19

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>IBM-mallin pintatekstuurit ja visuaalinen kuori</i> .....	6
<b>Kuva 2.</b>	<i>Leikkausgeometria. (a) Heikko leikkaus ja pieni suhde; (b) Vahva leikkaus ja suuri suhde. (Alsadik et.al 2014, s. 5788)</i> .....	7
<b>Kuva 3.</b>	<i>Kuvaus structured light järjestelmästä (Geng 2010, s. 131)</i> .....	8
<b>Kuva 4.</b>	<i>Hervannan RoboLabissa Microsoft Kinect-kameralla kuvattu RGB-D pistepilvi</i> .....	9
<b>Kuva 5.</b>	<i>Kappaleen pohjan luonnos ja muodostettu 3D-muoto</i> .....	11
<b>Kuva 6.</b>	<i>Tislauskolonnin huipun malli työn eri vaiheissa</i> .....	11
<b>Kuva 7.</b>	<i>SOLIDWORKS:lla mallinnettu keskeneräinen kokoonpano</i> .....	12
<b>Kuva 8.</b>	<i>ReCap-ohjelmalla muodostettu ensimmäinen malli kohteen yläkerran kokonaisrakenteesta</i> .....	13
<b>Kuva 9.</b>	<i>Tornin huipun malli 23 syötekuvaa (vasen) ja 45 syötekuvaa (oikea)</i> .....	14
<b>Kuva 10.</b>	<i>Kohteen yläkerran IBM-malli</i> .....	15
<b>Kuva 11.</b>	<i>Kohteesta muodostettu CAD-malli</i> .....	16

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

2D	Kaksiulotteinen
3D	Kolmiulotteinen
CAD	Computer Aided Design
IBMR	Image-Based Modeling and Rendering
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection and Ranging
RGB	Red, Green, Blue
RGB-D	Red, Green, Blue and Depth

# 1. JOHDANTO

Fyysisten kappaleiden mallintaminen virtuaaliseen ympäristöön on tärkeä työvaihe usealla eri alueella. Oli kyseessä sitten mallinnus teollisuuden tarpeisiin, opetuskäyttöön tai kulttuurihistorian säilyttämiseen, mahdollisimman tarkan mallin luominen on haaste. Mallin tarkkuuden vaatimus riippuu mallin käyttökohteesta, jolloin tarkkuudella voidaan tarkoittaa esimerkiksi yksityiskohtaista tai mittasuhteiltaan fyysistä vastinettaan mahdollisimman paljon vastaavaa mallia.

Perinteisellä tietokoneavusteisella suunnittelulla voidaan työ- tai valokuvia hyödyntämällä muodostaa todenmukainen ja tarkka malli monimutkaisestakin kohteesta. Tällainen mallinnus on kuitenkin työlästä ja saatava malli voi olla vain niin tarkka, kuin siihen käytetyt tekniset dokumentit.

Digitaalisten kameroiden ja tietokoneiden laskentatehon kehittyessä, myös näiden käyttökohteet ovat monipuolistuneet. Digitaalisten kameroiden kuvista voidaan yksittäistä pikseliä tarkastelemalla kerätä monipuolista tietoa. Tiedon ja mittausten keräämistä kaksiulotteisista kohteista, ja niiden hyödyntämistä kolmiulotteisten pisteiden muodostamiseksi kutsutaan fotogrammetriaksi (Fryer et al. 2007, s. 9).

Myös suoraan kohdekappaleen ulkopinnasta voidaan hankkia pistetietoja, käyttämällä tarkoitukseen sopivaa työkalua, kuten laserskanneria. Kuviin tai laserskannauksiin perustuvissa menetelmissä suurin työ on lähdedatan hankkimisessa ja tarkastelussa, sillä kuvista ja pistepilvistä mallinnettaessa, varsinaisen mallinnuksen suorittaa tietokoneohjelma.

Työssä käsitellään ensin erilaisia menetelmiä 3D-mallinnukseen. Menetelmiä tutkitaan työn projektiosuuden kohdekappaleen mallinnuksen tarkkuutta ajatellen. Kahta selvite-tyistä menetelmistä tarkastellaan kokeellisesti muodostaen mahdollisimman tarkka malli tislaukolonnista. Muodostettuja tuloksia tarkastellaan luvussa 4 ja lopuksi niiden perusteella tiivistetään suoritus ja johtopäätökset 3D-mallinnuksesta tässä projektissa.

## 2. 3D-MALLINNUS

Kolmiulotteisen mallinnuksen tarkoituksena on tuottaa matemaattinen esitys objektin mistä tahansa pinnasta kolmiulotteisesti käyttäen tarkoitukseen kehitettyä ohjelmistoa. Mallinnusohjelma kuvaa kappaletta kolmiulotteisen avaruuden pisteillä, joiden välille luodaan geometrisia muotoja, kuten monikulmioita, viivoja sekä käyriä pinnamuotoja.

### 2.1 CAD-mallinnus

Tietokoneiden kehittyessä myös niiden avulla suoritettavat toiminnot ovat muuttuneet vaativammiksi. Digitaalisten tietokoneiden laskentatehon parantuessa yksi merkittävimmin kehittyneistä osa-alueista on tietokoneavusteinen suunnittelu. Teollisuuden tarpeisiin vaadittujen monimutkaisten työkuvioiden piirtäminen käsin on voitu korvata tietokoneavusteisesti. Laskentatehon lisäksi interaktiivisten graafisten käyttöliittymien yleistyminen ja yksinkertaistuminen on mahdollistanut sujuvamman vuorovaikutuksen käyttäjän ja tietokoneen välille. Aiemmin käyttäjä antoi tietokoneelle käskyjä reikäkorttien tai filmikeloiden avulla tietokoneen antaessa vastauksia raakana numerodatana. Tämä vaati käyttäjiltä osaamista tietokoneohjelmoinnissa, jotta tietokoneen käyttäminen oli mahdollista. Graafiset käyttöliittymät ovat mahdollistaneet CAD-järjestelmien käytön tietotekniikkaan perehtymättömällekin käyttäjälle, mikä puolestaan mahdollistaa nopeamman suunnitteluprosessin. (Krouse 1984, s. 6)

Yksi tärkeimmistä ominaisuuksista tietokoneavusteisessa suunnittelussa on geometrinen mallinnus, jolla muodostetaan jonkin kappaleen geometrinen muoto. Tietokone tulkitsee tämän kuvallisen esityksen matemaattiseksi malliksi, jota voidaan kutsua käytettäväksi ja muokattavaksi muissa CAD-toiminnoissa. Geometrisella mallinnuksella voidaan luoda kaksi- tai kolmiulotteisia malleja. Tietokoneavusteinen kolmiulotteinen mallinnus voidaan jakaa kolmeen kategoriaan, rautalankamalleihin, pintamalleihin sekä kiinteisiin malleihin (Krouse 1984, s. 56).

#### 2.1.1 Rautalankamallinnus

Rautalankamalleissa käyttäjä luo kolmiulotteisen esityksen avaruuden pisteillä ja käyrillä. Rautalankamallit ovat yksinkertaisimpia kolmiulotteisia geometrisia malleja, joiden laatimiseen ei tietokoneelta mene paljoa aikaa tai muistia. Malleilla voidaan tarkasti paikantaa virheet mallin pintojen jatkuvuudessa, mutta kappaleen varsinaisista pinnoista

sillä ei voida välittää tietoa. Rautalankamallissa myöskään isometrisessä näkymässä sisä- ja ulkopiirteiden eroa ei voida havaita.

Mallista voidaan piilottaa näkyvistä tai katkoviivoittaa sellaiset viivat, jotka jäisivät isometrisessä tarkastelussa piiloon, jolloin mallia voidaan tulkita kiinteänä kappaleena, joskin malli kuitenkin edustaa lähinnä kappaleen kuorta (Krouse 1984, s. 59). Rautalankamallinnus on hyödyllistä kappaleen mallinnuksen suunnittelun alkuvaiheessa. Mallia voidaan käyttää viitekehyksenä ja -geometriaan jatkossa tehtävälle monimutkaisemmalle mallinnukselle ja muokkaukselle (AutoCad User's Guide).

## 2.1.2 Pintamallinnus

Pintamallinnus mahdollistaa rautalankamallia yksityiskohtaisemman mallinnustavan, jolla voidaan tarkasti kuvata mallikappaleen ulkoisia piirteitä. Käyttäjä yhdistää erilaisia pintaelementtejä avaruuden viivojen välille. Mahdollisia pintaelementtejä ovat avaruuden tasot, käyrät tasopinnat, pyörähdys- sekä pyyhkäisyypinnat, nurkkatasoitepinnat (fillet) ja muotoillut pinnat (Krouse 1984, s. 62; AutoCAD User's Guide). Käyrillä tasopinnoilla tarkoitetaan sellaisia pintoja, jotka muodostetaan kuvaamalla jokin käyrä kahden avaruuden suoran välille. Pyörähdyspinnalla tarkoitetaan jonkin käyrän pyörittämistä avaruudessa ympyrän radan mukaisesti, kun taas pyyhkäisyypinnassa käyrää liikutetaan jonkin toisen käyrän mukaisesti. Nurkkatasoitepinta yhdistää kaksi pintaa pyöristäen muodostuvan kulman. Muotoilluilla pinnoilla voidaan mallintaa monimutkaisia kappaleita ja pinnanmuotoja, mikä on haastavaa perinteisempiä mallinnuselementtejä käyttäen.

Vaikka pintamallinnuksella voidaan kappaletta kuvata yksityiskohtaisesti, kuvaa se edelleen vain kappaleen ulkoista olemusta. Sillä yksittäinen pintarakenne on ohut kuori (shell) (Krouse 1984, s. 56), ei niistä muodostettua 3D-mallia voida analysoida fysikaalisten ominaisuuksien, kuten tilavuuden tai massan, perusteella.

## 2.1.3 Kiinteä mallinnus

CAD-mallinnuksen hyödyllisin ominaisuus on kiinteiden mallien luominen. Vaikka rautalanka- ja pintamallinnuksella voidaan ulkoisesti kuvata kiinteätä kappaletta, mahdollistaa kiinteä mallinnus kappaleen tarkemman analysoinnin. Tarkoista pintamalleista voidaan muuntaa kiinteitä kappaleita muodostamalla malli pintojen rajaamasta alueesta. Toinen kiinteässä mallinnuksessa käytetty metodi on jakaa mikä tahansa monimutkainen kiinteä kappale geometrisiin perusyksiköihin, kuten kuutioihin, särmiöihin, palloihin sekä ellipsoideihin (Krouse 1984, s. 63). Näitä kantamuotoja yhdistämällä ja niiden välisillä summilla, erotuksilla, unioneilla ja leikkauksilla voidaan mallintaa useita kappaleita.



Nykyaikaisilla CAD-ohjelmilla voidaan kaksiulotteisista luonnoksista pursottamalla (extrude) muodostaa kolmiulotteisia profiileja (Introducing SOLIDWORKS 2015, s. 103). Näitä profiileja muokkaamalla erilaisilla työkaluilla voidaan tietokoneella muodostaa malleja samoilla periaatteilla kuin kipsivalussa ja kuvanveistossa. CAD-mallinnuksen yksi hyödyistä on useiden mallinnettujen osien yhdistäminen kokoonpanoksi, jolloin kohdekappaletta ei tarvitse mallintaa yhtenä kokonaisuutena. Kokoonpanon mallinnus voidaan toteuttaa joko Bottom-up tai Top-down periaatteella (Introducing SOLIDWORKS 2015, s. 55). Alhaalta ylöspäin mallinnettaessa, ensin luodaan osat erillisinä malleina, jotka liitetään kokoonpanoon. Ylhäältä alaspäin työskenneltäessä, aloitetaan mallinnus kokoonpanosta, jonka parametreja voidaan käyttää viitteenä seuraavissa osissa.

## 2.2 Image-Based Modeling

Valokuvia voidaan käyttää hyödyksi kolmiulotteisessa mallinnuksessa käyttämällä niitä viitteinä, joiden perusteella voidaan luoda CAD-malleja 3D-piirto-ohjelmalla. Tällainen mallintaminen antaa kuitenkin vain karkean mallin kohdekappaleesta, sillä valokuva on 2D-esitys 3D-kappaleesta. Ilman viitetietoja kohdekappaleen fyysisiin mittoihin on tarkan 3D-mallin tuottaminen vaikeaa. Monimutkaisten kappaleiden mallintamista varten on kehitetty erilaisia järjestelmiä ja ohjelmia. Nämä ohjelmat mahdollistavat valokuvien käytön syötteinä, joista 3D-malli muodostetaan. Tällöin puhutaan kuviin perustuvasta mallinnuksesta, 'Image-based Modelingista'.

### 2.2.1 Pikselistä 3D-pisteeksi

Kameralla kuvia otettaessa projisoi se pisteen kolmiulotteisesta ympäristöstä kaksiulotteiseksi pisteeksi. Digitaalisissa valokuvissa tällaista pistettä kutsutaan pikseliksi, jolla on paikka kuvan x,y-koordinaatistossa. Kuvassa oleva pikseli voidaan tunnistaa ja sitä voidaan verrata muihin samasta kohteesta otettujen kuvien pikseleihin. Kuvan pikseliä voidaan sanoa mallinnuksen kannalta kiinnostavaksi, jos se voidaan tunnistaa toisessa kuvassa, joka on otettu eri kuvakulmasta. Useasta lähteestä havainnoimalla ja tunnistamalla pikseli voidaan sen paikka tulkita 3D-avaruudessa. Kolmiulotteisesta avaruudesta voidaan havaita piste ja tulkita sen paikka, jos kyseistä pistettä havainnoidaan vähintään kahdesta eri lähteestä. (Quan & Kanade 2014, s. 78) Tällainen avaruuden piste voidaan muuttaa mallinnukseen soveltuvaksi 3D-pisteeksi.

Pikselillä on valokuvassa kuitenkin paikan lisäksi myös voimakkuuden arvo. Harmaasävyisissä kuvissa yhden pikselin voimakkuus ilmaistaan yhden arvon avulla. Tämä arvo vaihtelee 0:n (musta) ja 255:n (valkoinen) välillä, jolloin yhdelle pikselille on 256 eri harmaasävyä. Värillisten valokuvien pikselien voimakkuus määritetään samalla tavalla,

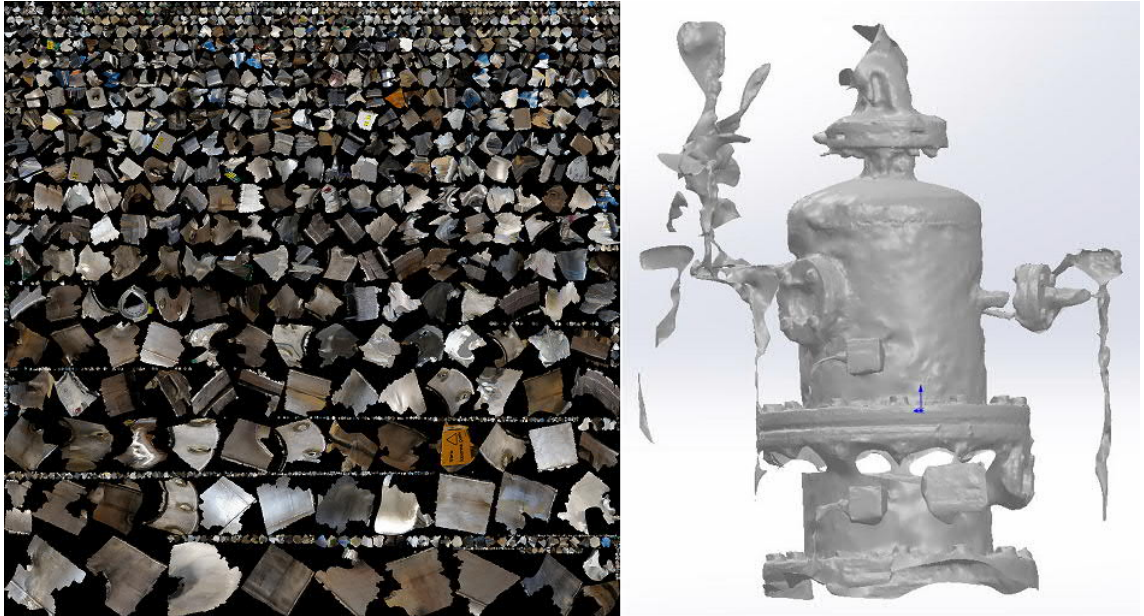
mutta yhden arvon sijaan kolmea arvoa käyttämällä. Mikä tahansa väri voidaan digitaalisesti esittää punaisen, vihreän ja sinisen yhdistelmänä. Näiden värien voimakkuutta kussakin pikselissä kuvataan antamalla arvot 0:n, eli ei kyseistä väriä, ja 255:n, eli väriä on runsaasti, välillä. Yhden pikselin voimakkuus värillisessä kuvassa ilmoitetaan siis muodossa (r,g,b), esimerkiksi (255,0,0) punaiselle ja (255,255,0) keltaiselle.

Pikselin voimakkuutta verrataan muihin sen ympärillä olevien pikselien voimakkuuksiin. Tämän voimakkuuseron ollessa suuri, voidaan pikseli tulkita kappaleen joksikin reunapisteeksi (Quan & Kanade 2014, s. 80).

### **2.2.2 3D-pisteestä malliksi**

Kolmiulotteisen kappaleen mallintamiseksi valokuvien perusteella vaatii kuvia useista kuvakulmista halutun kappaleen ympäriltä. Mitä enemmän kuvia otetaan, sitä tarkemmin voidaan määrittää pisteiden sijainti 3D-ympäristössä. Näistä kuvista saaduista pisteistä muodostetaan kohteen geometriaa vastaava pistepilvi. Pilven pisteet jaetaan etu- ja taka-alalla oleviin pisteisiin. Taka-alalle sijoitetaan ne pisteet, joita tarkasteltaessa niiden havaitaan olevan eristyksissä tai merkittävästi kauempana verrattuna muihin sekvenssin pisteisiin. Etualalle sijoitetaan pisteet, jotka muodostavat pistepilven suurimman komponentin. Saadusta etualan pistepilvestä voidaan muodostaa kappaletta edustava visuaalinen runko (visual hull). (Quan & Kanade 2014, s. 122).

Syötevalokuvista saatavaa kohdekappaleen ulkokuoren siluettia ja tekstuuria verrataan pisteistä muodostettuun kuoreen. Näiden tietojen perusteella tietokoneohjelma muodostaa syötevalokuvia muistuttavan 3D-mallin. Mallinnetun esimerkkikappaleen syötekuvista kerätyt pintatekstuurit ja muodostettu visuaalinen kuori esitetään kuvassa 1.

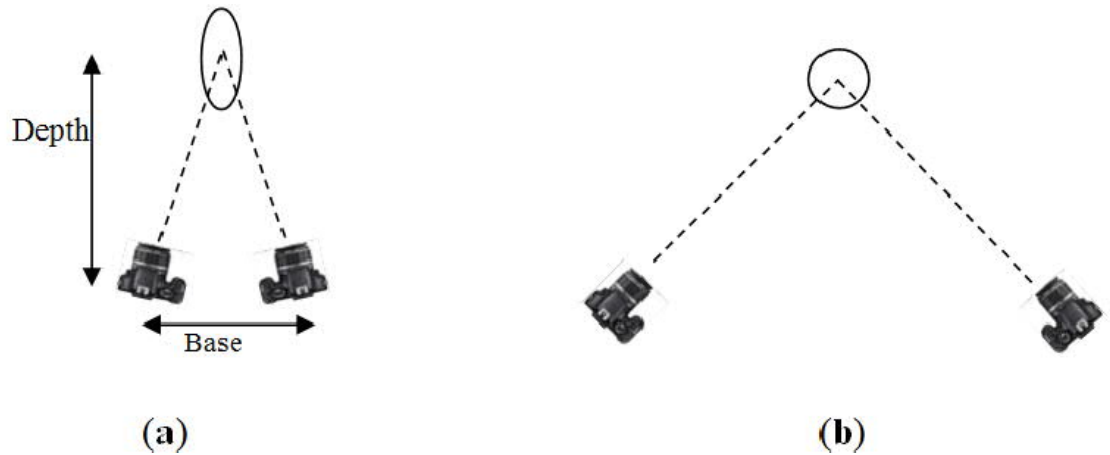


*Kuva 1. IBM-mallin pintatekstuurit ja visuaalinen kuori.*

### 2.2.3 Kuvien valinta

Jotta kuvista saatava malli olisi kyllin tarkka, otetuille kuville on muutamia rajauskeinoja. Tässä projektissa käytettävässä ohjelmassa yhteen malliin käytettävien kuvien yläraja on 100, joten kuvia ei voida ottaa kohdekappaleesta jokaisesta mahdollisesta kuvakulmasta. Artikkelissaan Alsadik et.al määrittävät pienintä mahdollista kameroiden määrää kiinteässä kameroiden verkossa. Verkosta voidaan karsia sellaisia kameroita, jotka ovat tarpeettomia muodostettavan mallin tarkkuuden ja kattavuuden kannalta (Alsadik et.al. 2014, s. 5788). Tarpeettomia kameroita voidaan poistaa esimerkiksi pistepilven tarkkuuteen vähiten vaikuttavista sekä tarkastelemalla kamerasuorituksen hyödyllisyyttä epävarmuuden, kuvattujen pisteiden ja niiden jakauman perusteella. Artikkelissa kuvataan näiden keinojen soveltamista kiinteään kameroiden verkkoon, jollaista tässä projektissa ei käytetä. Sen sijaan kohdekappaleesta otetaan yhdellä kameralla kuvia useista kuvakulmista.

Pistepilven tarkkuutta tarkasteltaessa kuvien hyödyllisyyttä voidaan määrittää kahden kuvan välisen etäisyyden ja niiden leikkauksen geometrian perusteella. Kuvassa 2 esitetään heikko ja vahva leikkauskohta ja kanta/syvyys -suhde (base/depth ratio).



**Kuva 2.** Leikkausgeometria. (a) Heikko leikkaus ja pieni suhde; (b) Vahva leikkaus ja suuri suhde. (Alsadik et.al 2014, s. 5788)

Kameroita verkosta poistamalla voidaan vaikuttaa verkkoon kuluviin kustannuksiin sekä verkon kuvista saatavan mallin optimointiin.

## 2.3 3D-skannaus

CAD-mallinnuksen ja IBM:n lisäksi monimutkaisia kolmiulotteisia malleja voidaan muodostaa myös suoraan itse kappaleesta saatavasta 3D-datasta. Tähän tarkoitukseen on kehitetty lukuisia skannausjärjestelmiä, kuten laserskannereita, structured-light 3D skannereita sekä RGB-D-kameroita. Näiden järjestelmien tarkoitus on muodostaa matemaattinen malli skannattavasta kohteesta esimerkiksi pistepilven muodossa. Skannereilla saadusta pistepilvestä voidaan niiden käsittelyyn tarkoitettulla tietokoneohjelmalla muodostaa kolmiulotteinen malli.

### 2.3.1 Laserskannaus

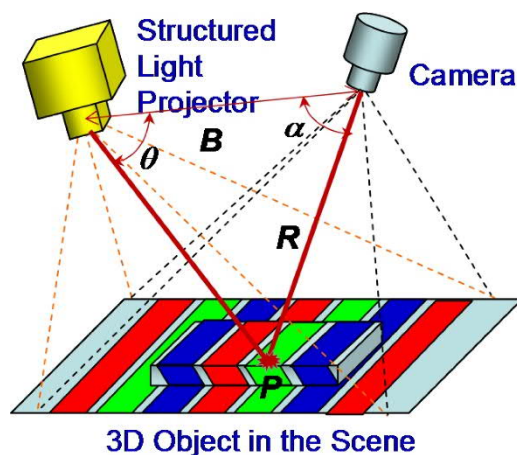
Kolmiulotteisen muodon hankkimiseen voidaan käyttää laseriin perustuvia järjestelmiä. Light Detection And Ranging, eli LiDAR perustuu kohteen valaisuun laserilla, joka heijastuu kohteesta takaisin skannerin sensoriin. Tavallisessa LiDAR-järjestelmässä käytetään laserpulsseja, jota voidaan vilkuttaa jopa 400 000 kertaa sekunnissa. Käytetyn laserin aallonpituus on tavallisesti infrapunasäteilyn alueella, lähellä näkyvän valon aallonpituuksia. (Encyclopædia Britannica 2011). Etäisyyden mittaamiseen on kaksi erilaista laserjärjestelmää: time-of-flight, eli lentoaikaan sekä phase based, eli vaiheeseen perustuvat laserit.

ToF-laserjärjestelmissä etäisyys lasketaan laserpulssin lähetys- ja saapumisaikojen perusteella. Vaiheeseen perustuvissa järjestelmissä etäisyys määritetään lähetetyn ja vas-

taanotetun laserpulssin vaihe-erosta (Eitel et.al. 2016, s. 373). LiDAR-skannauksella voidaan etäisyyden lisäksi määrittää kohteen ja skannerin välinen kulma. Näiden tietojen perusteella voidaan kullekin kohdekappaleen pisteelle muodostaa paikka  $x,y,z$ -koordinaatistossa. Saaduista 3D-pisteistä muodostetaan pistepilvi, joka kuvaa kohdekappaleen pinnanmuotoja.

### 2.3.2 Structured-light-skanneri

Toinen kohdekappaleen valaisuun perustuva 3D-skannauskeino on ns. structured light scanning. Tässä skannausmenetelmässä kohdekappaletta valaistaan tarkoitukseen suunnitellulla kuviolla vaihtelevalla voimakkuudella, missä jokaiselle valaisukuvion pikselille on määritetty paikka  $x,y$ -tasossa. Valaistavaa kohdetta kuvataan kameralla, ja siitä saatavan kuvan kuviota verrataan valaisimen kuvioon (Geng 2010, s. 130). Kohdekappaleen 3D-pinnan vaihtelu aiheuttaa valaisimen kuvioon vääristymiä, jotka havaitaan kameras kuvaa tarkastellessa. Valonlähteen, kameras ja kohteen välinen geometrinen suhde voidaan määrittää kolmiomittauksella. Täten yksittäiselle pisteelle kohdekappaleen pinnalta voidaan määrittää paikka  $x,y,z$ -avaruudessa. Structured light järjestelmän rakenne esitetään kuvassa 3.



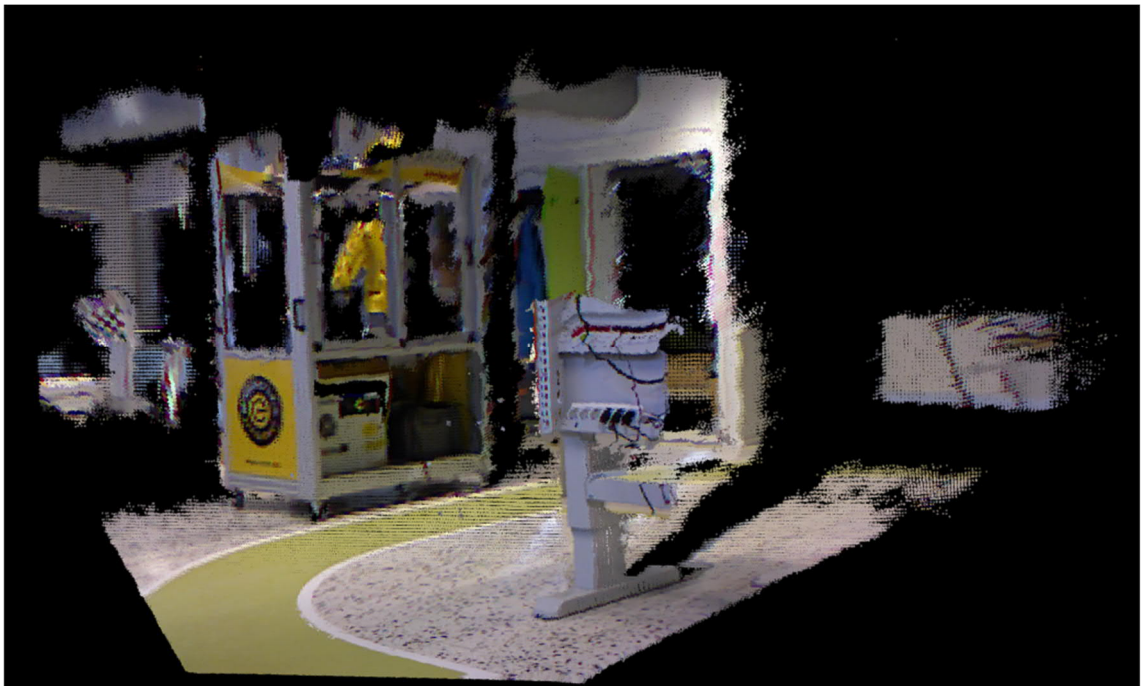
**Kuva 3.** Kuvaus structured light järjestelmästä (Geng 2010, s. 131)

Kerätyistä pisteistä muodostetaan verkkorakenne (mesh) kohdekappaleen ulkopinnasta. Skannauksesta muodostettuun verkkoon voi kuitenkin jäädä virheitä, kuten reikiä tai kohinaa, joita voidaan manuaalisesti korjata. Manuaalisesti korjattua tasaista verkkoa voidaan segmentoida jonkin osan tarkempaa tarkastelua varten (Chiu et.al. 2018, s. 113).

### 2.3.3 RGB-D-kamera

RGB-D kameralla voidaan tavallisen digitaalisen kameras tarjoaman red, green, blue - datan lisäksi tallentaa kohteesta syvyystietoa (depth). Syvyyskameroiden toiminnalle on

kaksi erilaista menetelmää (Tong et al. 2012, s. 644). Nämä menetelmät ovat samoja kuin edellisissä luvuissa mainitut Time-of-Flight ja Structured-Light. Syvyyskameroilla muodostetaan kohdekappaletta kuvaamalla pistepilvi, joka voidaan muuntaa kolmiulotteiseksi malliksi. Kuvassa 4 esitetään Tampereen yliopiston järjestämän Mechatronics and robot programming kurssin yhteydessä tallennettu pistepilvi Hervannan RoboLabin ympäristöstä. Pistepilven muodostamiseen käytettiin Microsoft Kinect RGB-D -syvyyskameraa, joka toimii structured-light periaatteella.



**Kuva 4.** Hervannan RoboLabissa Microsoft Kinect-kameralla kuvattu RGB-D pistepilvi.

Kuten kuvasta nähdään, yhdestä suunnasta kerätty RGB-D -data ei riitä tarkan mallin luomiseen kohdekappaleesta. Vaikka RGB-D kamerat ovatkin yleistyneet, on niillä datan keräys silti aikaa vievää ja vaivalloista verrattuna esimerkiksi digitaalikameralla valokuvaamiseen. Erilaisia keinoja helpottaa RGB-D -kuvaamista on kehitetty, kuten kontekstiin tai mallinteisiin (template) perustuvat muodon paikkaukset (Li et.al. 2017, s. 1810). Kontekstiin perustuvat järjestelmät paikkaavat kappaleessa olevia reikiä niiden ympäristön yksityiskohtien perusteella. Mallinteisiin perustuvat järjestelmät voivat paikata suurempia reikiä ja virheitä kuin kontekstiperusteiset, mutta niiden käyttäessä jotakin muuta kappaleita syötteenä, ei mallin tarkkuudesta verrattuna alkuperäiseen voida olla varmoja.

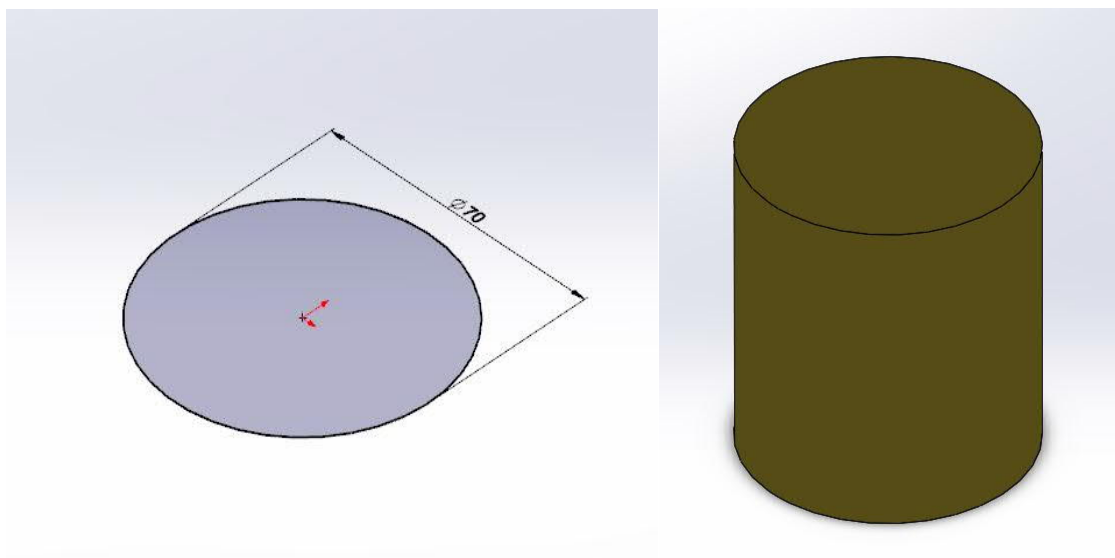
### 3. 3D-MALLIN TOTEUTUS

Työn mallinnusosuuden kohteena on Tampereen Yliopiston Hervannan Kampuksen Sähkötalon tiloissa sijaitseva tislauskolonni. Kolonnilaboratorio on kahdessa kerroksessa, jotka molemmat ovat kulunvalvottuja tiloja. Tilojen ollessa paikoitellen ahtaat, ei laserskannaaminen ollut vaivan arvoista. Toteutustekniikoiksi valikoituivat CAD ja IBM, ja käytettäväksi työkaluiksi Dassault Systemes SOLIDWORKS ja AutoDesk ReCap Photo.

#### 3.1 Mallinnus SOLIDWORKS:lla

Tislauskolonnista ei ollut saatavilla yksiselitteisiä työkuvia komponenteista, joten CAD-mallinnuksen piti perustua valokuvista saatuun viitetietoon. Tislauskolonnin komponenttien fyysisten mittojen taltioiminen paransi vain valokuvien perusteella muodostuvaa mallia. Tässä kappaleessa esitellään projektin SOLIDWORKS-mallinnuksen työnkulku.

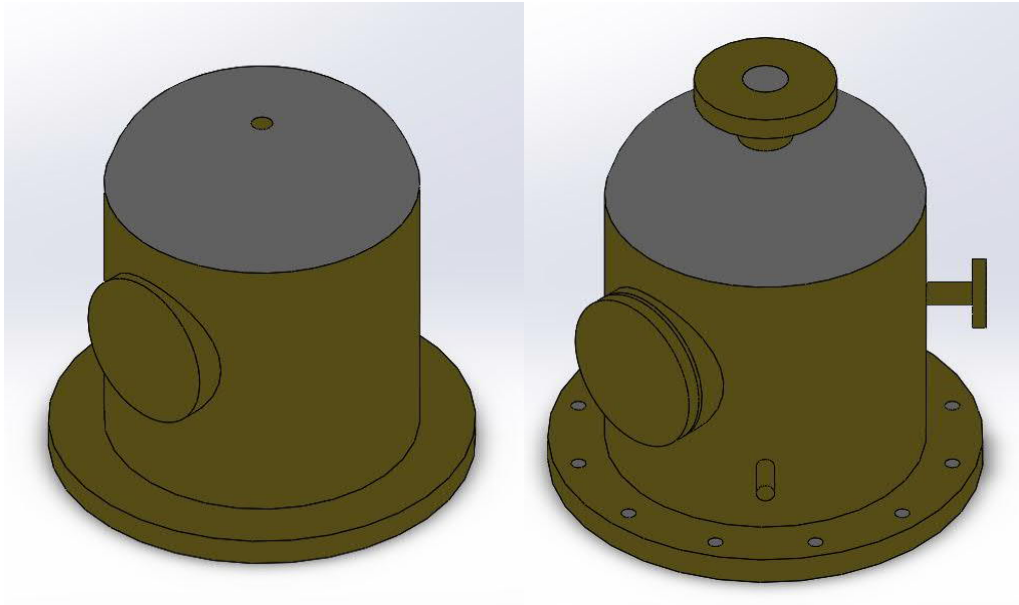
Jotta varsinainen mallinnus oli mahdollista, oli ensimmäinen vaihe valokuvamateriaalin kerääminen. Kolonnilaboratorion tilat, asettelu ja komponentit kuvattiin niin yleisellä, kuin yksityiskohtaisellakin tasolla. Tarkoituksena oli saada mahdollisimman kattava kuva mallinnettavasta järjestelmästä. Otettujen kuvien perusteella oli CAD-mallinnus mahdollista aloittaa. SOLIDWORKS:n ja muiden vastaavien CAD-mallinnusohjelmien tavallisin mallinnustyyli on luoda aloitusluonnos jostain komponentin piirteestä. Tästä luonnoksesta saadaan kiinteä kolmiulotteinen muoto käyttämällä pursotustyökalua. Kuvassa 5 esitetään kappaleen luonnos ja siitä pursotettu 3D-muoto.





**Kuva 5.** Kappaleen pohjan luonnos ja muodostettu 3D-muoto.

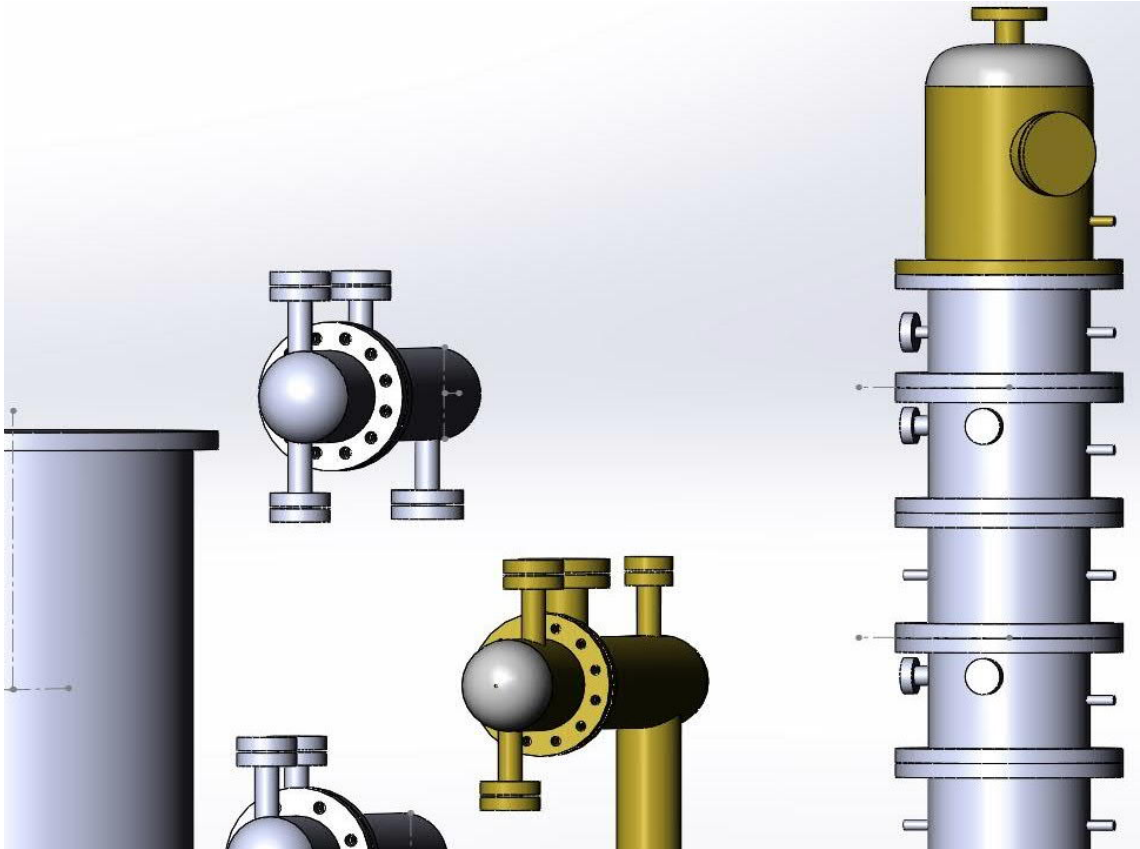
Saatua geometriaa muokataan työkaluilla siihen lisäten tai siitä poistaen piirteitä (features). Kun saatu komponentti on tarpeeksi tarkasti saatu valokuvien ja otettujen mittojen mukaan mallinnettua, voidaan siitä tehdä kokoonpanon perusta. Kuvassa 6 on esitetty kuvan 5 kappale työn eri vaiheissa.



**Kuva 6.** Tislauskolonnin huipun malli työn eri vaiheissa.

Työ aloitettiin mallintaen ylhäältä alaspäin, jolloin olemassaolevia pintoja ja mittoja voitiin käyttää viitteenä seuraaville osille. Tämä kuitenkin osoittautui hankalaksi, jos kokoonpanoa jouduttiin siirtämään työavaruudessa. Kokoonpanon liikuttaminen ja muokkaaminen aiheutti paikoitellen yksittäisten osien välisten piirteiden epämuodostumisen. Projekti jatkui vaihtamalla pääasialliseksi työskentelytavaksi alhaalta ylöspäin, jolloin osien väliin ei muodostettu viitteitä. Kolonnin tornin mallinnuksessa edeltävästä kappaleesta saadut ulkoiset mitat olivat helposti hyödynnettävissä, joten niiden käyttöä jatkettiin. Kohteen komponenteista muodostettiin kustakin malli omaan tiedostoonsa, joista lopulta muodostettiin kokoonpanomalli. Kuvassa 7 esitetään osa kohteen yläkerran kokoonpanomallista.



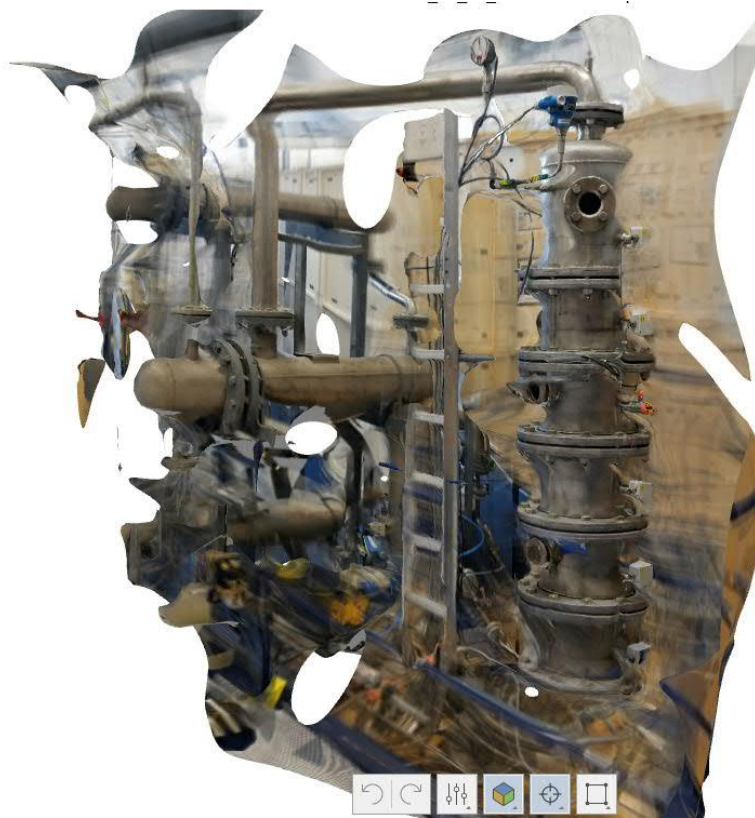


*Kuva 7. SOLIDWORKS:lla mallinnettu keskeneräinen kokoonpano.*

### 3.2 Mallinnus AutoDesk ReCap:lla

Samoja kuvia, joita CAD-mallinnuksessa käytettiin viitteenä, voitiin myös käyttää IBM:ssä mallinnusohjelman syötteinä. Projektin IBM-mallin muodostamisen työnkulku esitellään tässä kappaleessa.

Kuviin perustuvaan mallinnukseen soveltui parhaiten ReCap Photo –ohjelma, jolla voidaan muodostaa 3D-malleja antamalla sille valokuvia syötteenä. Ohjelman syötekuvien lukumäärä on rajattu 20 – 100 kuvaa, jolloin oikeanlaisten kuvien tallentaminen ja valinta muodostavat suuren osan työstä. Kuvat otettiin OnePlus 5T –puhelimella kameralla. Kuvauksen tapahtui kolonnilaboratoriossa siten, että kulloistakin kohdekappaleen osaa kuvattiin monesta kuvakulmasta soveltaen luvussa 2.2.3 esitettyä valokuvien optimointia. Kohteesta otettiin valokuvia sekä kokonaisuudesta että yksittäisistä toimilaitteista ja instrumenteista. Valokuvaaminen suoritettiin iteratiivisesti hankkimalla kuvia ensin vähän kaikista osista ja koko laboratoriosta. Näistä kuvista muodostettiin 3D-malli, jota tarkasteltiin tarkkuuden ja eheyden näkökulmista. Kuvassa 8 esitetään ensimmäinen muodostettu malli kolonnin yläkerran kokonaisrakenteesta.



**Kuva 8.** ReCap-ohjelmalla muodostettu ensimmäinen malli kohteen yläkerran kokonaisrakenteesta.

Muodostetun mallin tarkkuuden ja eheyden perusteella kohdetta kuvattiin lisää kuvakulmia vaihtamalla ja valokuvien lukumäärää lisäämällä. Näistä kahdesta piirteestä tärkeämmäksi osoittautui kuvien kuvakulmien kattavuus, sillä rakenteellisesti tarkempia malleja saatiin vähemmällä määrällä kuvia kattavammilla kuvakulmilla. Kuvien lukumäärä vaikutti eniten muodostetun visuaalisen kuoren tekstuuriin tarkkuuteen, mutta mallin kolmiulotteinen tarkkuus vaihteli. Mahdollisimman tarkan visuaalisen mallin luomiseen siis tarvittiin riittävän monta kuvaa mahdollisimman monesta kuvakulmasta visuaalisen ja rakenteellisen tarkkuuden optimoimiseksi. Joissakin kuvista muodostetuissa malleissa myös kohdekappaleen tausta tallentui kuvaan mukaan, jolloin voitiin havaita yhdestä kuvakulmasta otettujen kuvien liiallinen määrä. Kuvassa 9 esitetään kolonnin tornin huipun malleja eri määrällä syötevalokuvia.



**Kuva 9.** Tornin huipun malli 23 syötekuvaa (vasen) ja 45 syötekuvaa (oikea).

Ohjelmalla muodostetut mallit ovat kohdekappaleen visuaalisia kuoria, jolloin ei niille voitu toteuttaa analyysia tiheyden tai tilavuuden puolesta. Ohjelmalla voitiin kuitenkin asettaa mallinnetulle kappaleelle skaala antamalla sille kahden pisteen välinen etäisyys, jolloin mallin muut osat sovitettiin samaan mittakaavaan. Kolonnin tornin kyljestä saadun Pt100-anturikotelon ulkoreuna mittaamalla, voitiin toteutetusta mallista mitata muita mittoja. Ohjelma kykeni vain kahden pisteen välisen matkan mittaamiseen, mutta tätä tietoa voitiin käyttää myös SOLIDWORKS:lla muodostetuille malleille, näiden tarkkuuden parantamiseksi.

IBM-mallien vieminen ReCap-ympäristöstä muuhun tiedostomuotoon osoittautui hankalaksi, joten muodostettuja malleja ei voitu käyttää esimerkiksi pohjana SOLIDWORKS-malleille. Parhaimmillaankin muodostetut mallit ovat ulkorakenteeltaan verkkomaisia sekä epätasaisia.

## 4. TULOKSET

Tässä kappaleessa esitellään luvussa 3 läpi käytyjen menetelmien tuottamia tuloksia. Ensin esitellään IBM-malleja ja sitten projektin lopullinen CAD-malli. Muodostettu malli esitetään tarkemmin liitteissä.

### 4.1 IBM-malli

Muodostettavaa mallia varten kohdeympäristöstä otettiin yhteensä 596 kuvaa. Suurin osa valokuvista otettiin kohteen yläkerrasta, jonka mallintamiseen IBM:ää käytettiin. Menetelmän tuottamien mallien ollessa vaikeasti jatkomallinnettavissa, luovuttiin menetelmän laajamittaisesta soveltamisesta lopulliseen projektiin. Kuvassa 10 esitetään projektin loppuvaiheilla muodostettu malli kohteen yläkerrasta.



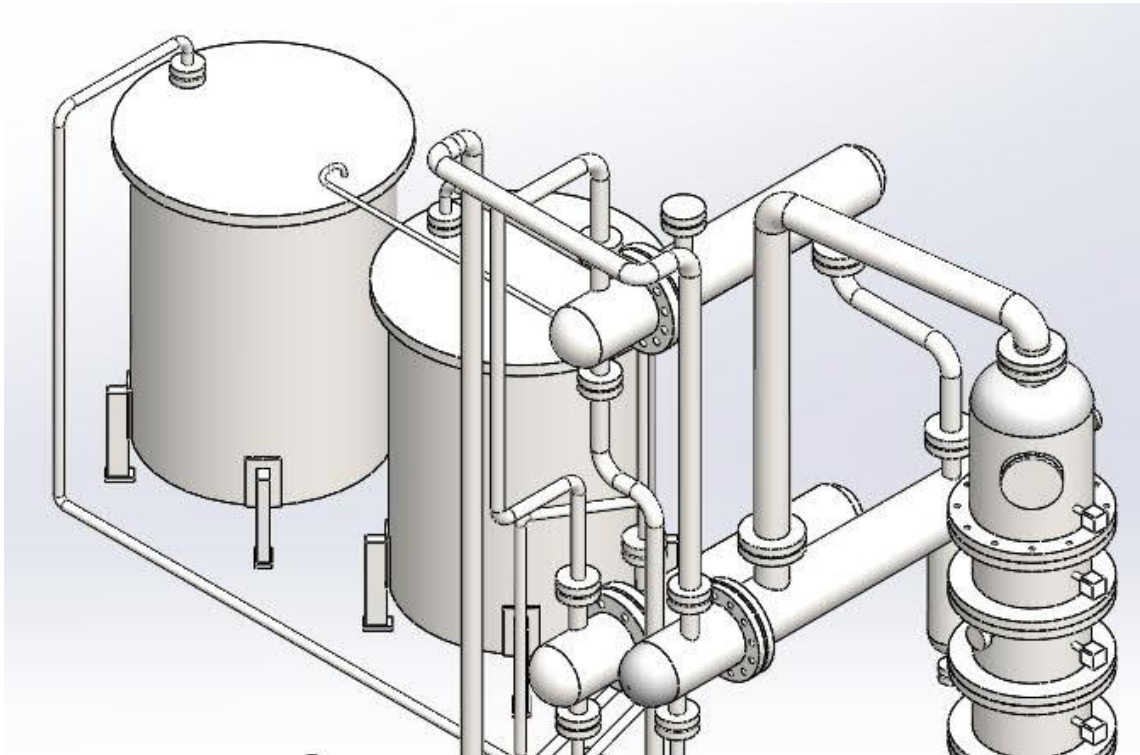
*Kuva 10. Kohteen yläkerran IBM-malli.*

Kuvia 10 ja 8 vertaamalla voidaan havaita muutokset mallin tarkkuudessa ja kolmiulotteisuudessa. Kuvan 8 malli on yksityiskohdiltaan tarkempi, mutta kuvan 10 malli esittää

kohdekappaletta tarkemmin kolmiulotteisessa ympäristössä. Molemmissa tapauksissa kohdetta kuvattiin joka puolelta, mutta aiemmassa mallissa suurin osa syötekuvista oli yhdeltä puolelta kohdetta.

## 4.2 CAD-malli

Projektin lopullinen malli voidaan jakaa karkeasti neljään osaan: torniin, yläkerran muihin komponentteihin, alakerran komponentteihin ja näitä kaikkia yhdistävään putkistoon. Mallin muodostus aloitettiin tornin ylemmistä kerroksista sekä yläkerran säiliöistä ja lämmönvaihtimista, joihin ei vielä siinä vaiheessa mallinnettu putkia. Vasta kun tornin alemmat kerrokset sekä alakerran muut komponentit oli mallinnettu, koko kohteen putkiston mallinnus aloitettiin. Muodostetussa mallissa ei aivan kaikkia putkia ja liittimiä yksityiskohtaisesti mallinnettu, sillä vain tärkeimpien elementtien mallinnus oli tarpeen. Kuvassa 11 esitetään osa kohteen yläkerran kokonaisrakenteesta muodostetusta CAD-mallista.



**Kuva 11.** Kohteesta muodostettu CAD-malli

Mallin komponentit esitellään tarkemmin työn liitteissä. Liitteinä esitetään mallin yläkerran komponentit, kolonnin tornin rakenne ja mallin alakerran komponentit. Muodostetusta mallista puuttuu myös yläkerran ja alakerran välinen lattia sekä eri komponentteja kannattelevat tukirakenteet.



## 5. YHTEENVETO

Fyysisten kappaleiden 3D-mallinnukseen on tarjolla monia menetelmiä, joista osa soveltuu myös tämän työn kohteen mallintamiseen. Datan kerääminen 3D-skannaamalla osoittautui hankalaksi kohteen ympäristössä, joten CAD ja IBM valikoituivat sopivimmiksi menetelmiksi.

CAD-mallinnus osoittautui projektia varten parhaaksi työkaluksi monipuolisuutensa ja yksinkertaisuutensa vuoksi. Muodostettavan mallin tarkkuus oli verrattavissa siihen käytettyihin työtunteihin. Työkuvien puuttuessa saatujen mallien tarkkuus ei kuitenkaan ole täysin yhtenevä fyysisten vastineidensa kanssa. Täysin tarkkaan malliin ei tässä työssä tarvinnut päästä, kunhan muodostettu malli edusti karkeasti kohdetta, mikä mahdollistaa sen käytön opetustarkoituksessa. CAD:lla voitiin mallintaa niin pieniä komponentteja kuin suuria kokonaisuuksiakin kohtalaisella työtahdilla.

IBM osoittautui hyödylliseksi työkaluksi yksittäisten komponenttien tarkkaan mallintamiseen sekä suurempien kokonaisuuksien epätarkkaan muodostamiseen. Komponenttien yhdistämiseen ei ReCap antanut mahdollisuutta, joten osien mallintamisen jälkeen ei voitu laatia kokoonpanomallia. Suuremman kokonaisuuden mallintaminen onnistui, mutta malliin sisältyi myös osa kolonnilaboratorion taustasta, mikä ei tätä työtä ajatellen ollut hyödyllinen ominaisuus. Käytetyn työkalun syötevalokuvien lukumäärä oli rajattu 20 – 100 kuvaan, ja yhden komponentin tarkkaan mallintamiseen vaadittiin yli 40 kuvaa. Vaikka mallintaminen itsessään ei ollut aktiivisesti aikaa vievää, kului mallin prosessointiin silti paljon aikaa. Joissakin tapauksissa yhtä kauan, kuin saman mallin luomiseen CAD:lla. Sen lisäksi valokuvaamisen ollessa iteratiivista, uusien syötekuvien hankkimiseen kului huomattavasti aikaa. Kolonnilaboratorion alakerran huonon valaistuksen takia myös sieltä saatujen kuvien laatu oli heikko. Käytetty kamera ei myöskään ollut tarkoitukseen paras mahdollinen vaihtoehto. Paremmalla kuvauskalustolla sekä valaistuksella hankituista kuvista muodostetuista malleista olisi saatu laadullisesti parempia tuloksia. Kuvauskalusto valittiin ensisijaisesti kompaktiutensa ja riittävän tarkkuutensa perusteella.

Vaikka varsinainen projekti suoritettiin loppuun CAD-mallintamisen, oli IBM:sta hyötyä myös projektin loppuvaiheissa. ReCapilla voitiin mitata etäisyyksiä sillä muodostetusta mallista ja niitä voitiin hyödyntää CAD-mallinnuksessa. Muuten CAD-mallin mittasuhteet olisi jouduttu hankkimaan fyysisestä kappaleesta. Kohdekappaleen mallintaminen selvitettyjä menetelmiä käyttäen onnistui hyvin.

# LÄHTEET

Alsadik, B., Gerke, M., Vosselman, G., Daham, A. & Jasim, L. (2014). Minimal Camera Networks for 3D Image Based Modeling of Cultural Heritage Objects, *Sensors*, Vol. 14(4), pp. 5785–5804. Saatavissa: <https://search.proquest.com/docview/1539404289?pq-origsite=summon#>

AutoDesk (2019), *AutoCAD User's Guide, About Modeling 3D Objects*, Saatavissa: <https://help.autodesk.com/view/ACD/2019/ENU/> > AutoCAD User's Guide > Modeling and Visualizing 3D Objects > Create 3D Objects

Chiu, C-Y., Pease, D.L., Fawkner, S. & Sanders, R.H. (2018). Automated body volume acquisitions from 3D structured-light scanning. in: *Computers in Biology and Medicine*, pp. 112–119. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2018.07.016>

Dassault Systemes (2015), *Introducing SOLIDWORKS*, 128 s

Eitel, J., Höfle, B., Vierling, L., Abellán, A., Asner, G., Deems, J., Glennie, C., Joerg, P., LeWinter, A., Magney, T., Mandlbürger, G., Morton, D., Müller, J. & Vierling, K. (2016). Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences in: *Remote Sensing of Environment*, pp. 372–392. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.018>

Fryer, J., Mitchell, H. & Chandler, J. (2007). *Applications of 3D Measurement from Images*, Whittles Publishing, Dunbeath

Geng, J. (2011). Structured-light 3D surface imaging: a tutorial, *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 3(2), pp. 128–160. Saatavissa: <http://aop.osa.org/abstract.cfm?URI=aop-3-2-128>.

Krouse, J.K. (1982). *What every engineer should know about computer-aided design and computer-aided manufacturing: the CAD/CAM revolution*, Dekker, New York, 147 p

Li, D., Shao, T., Wu, H. & Zhou, K. (2017). Shape Completion from a Single RGBD Image, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23(7), pp. 1809–1822. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7451283>

"Lidar." *Britannica Academic, Encyclopædia Britannica*, 2011. [academic.eb.com/levels/collegiate/article/lidar/544321#](http://academic.eb.com/levels/collegiate/article/lidar/544321#). Accessed 15 Mar. 2019.

Quan, L. & Kanade, T. (2014). *Image-Based Modeling*, 1st ed. Springer Verlag, DE

Tong, J., Zhou, J., Liu, L., Pan, Z. & Yan, H. (2012). Scanning 3D Full Human Bodies Using Kinects, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18(4), pp. 643–650. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6165146>.

## LIITE A: KOLONNIMALLIN KOMPONENTIT

