

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka / Tuotantotekniikka

2019

Johan Pusula

HITSATUN KAPPALEEN 3D-SKANNAAMINEN

Johan Pusula

HITSATUN KAPPALEEN 3D-SKANNAAMINEN

Tämä opinnäytetyö on tehty Turun ammattikorkeakoululle osana DigRob-hanketta. Vuonna 2018 alkaneen DigRob-hankkeen tavoitteena on luoda teknologiset mahdollisuudet ja menetelmät, jotta automatisoitua robottihitsausta voitaisiin hyödyntää kannattavasti myös yksilökappaleiden tuotannossa.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, voidaanko Artec Eva -3D-skannerilla kuvatus kappaleen mallista mitata ilman hitsauskiinnikkeitä hitsattujen korvakkeiden kulmaa samalla kun kappale on kiinnitettyinä kappaletta käsittelevään robottiin skannauksen aikana. Tarkastelun kohteena on, muuttuuko korvakkeiden kulma hitsauksen vuoksi ja mikäli muuttuu, kuinka paljon, kun muuttuva kulma on saatu selville. Tämä muutos pyritään ottamaan huomioon silloitushitsauksessa, jotta hitsauksen jälkeen korvakkeiden ja kappaleen pohjan välinen kulma olisi haluttu 90 astetta. Skannerin avulla saatua skannausdataa tarkastellaan GOM Inspect -ohjelmalla.

Artec Eva:n skannausten tutkiminen onnistui GOM Inspectillä helposti, vaikka skannatun kappaleen pinta oli paikoin epätasainen. Kaikki skannauksissa havaitut kulmien muutokset olivat samansuuntaisia eli skannausten mittaustulokset olivat yhdenmukaisia.

ASIASANAT:

3D-skannaus, konenäkö, mallinnus, mittaus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical Engineering / Production Engineering

2019 | 38 pages

Johan Pusula

3D SCANNING OF A WELDED PART

This thesis is made for Turku University of Applied Sciences as part of the DigRob project. The aim of the DigRob project, which began in 2018, is to create technological possibility and methods for profitable use of automated robot welding in the production of individual items.

The aim of this thesis is to determine whether the model of a part scanned with a 3D scanner can be used to measure the angle of welded lugs with the part attached to the gripper during the scanning. The subject of the review is whether the angle of the lugs is changing during the welding and, if so, how much. When a variable angle is found, the aim is to take this change into tack welding in order to obtain a 90-degree angle between the lugs and the bottom of the body after welding. Scanner-derived scan data is inspected using the GOM Inspect software.

The inspection of Artec Eva's scans was easy with GOM Inspect, even though the surface of the scanned solid was partly uneven. All the angular changes detected in the scans were parallel, this means that the results of the measurements were consistent.

KEYWORDS:

3D scanning, computer vision, modelling, measuring

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 KONENÄÖSTÄ SEKÄ 3D-SKANNAUKSESTA	8
2.1 Konenäkö	8
2.1.1 Kamera	9
2.1.2 Valaistus	10
2.1.3 Valaisumenetelmiä	10
2.1.4 Kuvankäsittely	11
2.2 3D-skannaus	12
2.2.1 Time-of-flight	13
2.2.2 Kolmiomittaus	13
2.2.3 Stereokuvaus	14
2.2.4 Fotogrammetria	14
2.2.5 Strukturoitu valo	16
2.2.6 Koordinaattimittauskone	16
3 OPINNÄYTETYÖ OSANA HANKETTA	18
3.1 Opinnäytetyön tausta	18
3.2 Artec Eva 3D-skanneri	18
4 ROBOTILLA HITSATUN KAPPALEEN SKANNAUS 3D-SKANNERILLA	20
4.1 Kappaleen sekä poimintatelineiden suunnittelu	20
4.2 Robotti	23
4.3 Kappaleen skannaus	25
4.4 Kappaleen mallin tarkastelu GOM Inspectillä	31
4.5 Tulokset	33
5 YHTEENVETO	36
LÄHTEET	37

KUVAT

Kuva 1. Konenäköjärjestelmän laitteet (Leino, 2018).	8
Kuva 2. Skannausmenetelmiä. Mukailtu (Ebrahim 2015).	12
Kuva 3. Kuvassa ToF-mittaus-tilanne (Boehler & Marbs 2002, 2).	13
Kuva 4. Kolmiomittauksen rakenne (Boehler & Marbs 2002, 2).	14
Kuva 5. Kuvassa muodostettuna pisteitä koordinaatistoon. (Luhmann, Robson, Kyle & Harley 2006, 2).	15
Kuva 6. Kuvassa esitetty heijastetun kuvion muutos kappaleessa ja sen välittyminen kennolle. (Karpinsky, Zhang 2010, 2).	16
Kuva 7. Kuvassa koordinaatistomittauskone (Rensi).	17
Kuva 8. Suunniteltu kappale	20
Kuva 9. Kappaleet leikattuina	21
Kuva 10. Kuvassa 3D-malli kappaleen pohjan poimintatelineestä	22
Kuva 11. Kuvassa korvakkeiden poimintateline	23
Kuva 12. Artec Eva -skanneriin totuttelua	25
Kuva 13. Kuvassa harjoitusten t-palan malli, joka on siistitty	26
Kuva 14. Ensimmäinen skannausasento	27
Kuva 15. Kuvassa skannausradan hakua käsin	28
Kuva 16. Toinen skannausasento robotilla	29
Kuva 17. Skannaamalla aikaiseksi saatu malli	30
Kuva 18. Kuvassa näkyy hitsauksen jälkeinen mittaus numero kuusi	32
Kuva 19. Kuvassa mitattu digitaalisella kulmamitalla mittaus kappaleesta kuusi	33
Kuva 20. Mallin reunan mittausta	34

TAULUKOT

Taulukko 1. Artec Evan teknisiä tietoja (Artec 2018).	19
Taulukko 2. Robottisolun teknisiä tietoja	23
Taulukko 3 Korvakkeiden mittaustuloksia	33
Taulukko 4. Reunan taipumisen mittauksia	35

KÄYTETYT LYHENTEET

CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
3D	Three Dimensional
3CCD	Three separate Charge-Coupled Devices
CNC	Computerized Numerical Control

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Turun ammattikorkeakoululle (myöhemmin Turun AMK) osana DigRob-hanketta. Vuonna 2018 alkaneen DigRob-hankkeen tavoitteena on luoda teknologiset mahdollisuudet ja menetelmät, jotta automatisoitua robottihitsausta voitaisiin hyödyntää kannattavasti myös yksilökappaleiden tuotannossa. Turun ammattikorkeakoulu keskittyy DigRob-hankkeessa tutkimaan, mitä mittausmenetelmiä on ja kuinka näitä voidaan robottihitsauksessa hyödyntää. Tarkoituksena on luoda menetelmiä ja järjestelmiä, joissa robottisolu kykenee tunnistamaan kappaleen osia 3D-suunnitelmien ja mittadatan perusteella. Järjestelmien tulisi kyetä ennakoimaan hitsauksen aikana tapahtuvia muutoksia kappaleessa. Tässä opinnäytetyössä keskitytään hitsauksesta johtuvan muodonmuutoksen ennakointiin.

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää, voidaanko 3D-skannerilla kuvatun kappaleen skannauksesta mittaamaan ilman hitsauskiinnittimiä hitsattujen korvakkeiden kulmaa kappaleen ollessa kiinnitettynä kappaletta käsittelevään robottiin skannauksen aikana. Tarkastelussa keskeistä on, muuttuuko korvakkeiden kulma hitsauksen vuoksi ja kuinka paljon. Kulman muutoksen selvittämisen jälkeen pyritään ottamaan tulosten pohjalta kulman muutoksen verran ennakkoa silloitushitsauksessa, jotta hitsauksen jälkeen korvakkeiden ja kappaleen pohjan välinen kulma olisi 90 astetta. Skannerina mittauksissa on Artec Eva-skanneri. Skannerin avulla saatua skannausdataa tutkitaan GOM Inspect -ohjelmalla.

Opinnäytetyö koostuu teoriaosasta, projektia esittelevästä osasta sekä yhteenvedosta. Teoriaosuudessa esitellään mahdollisia skannaustekniikoita ja niiden toimintaperiaatteita. Kolmannessa luvussa esitellään Turun AMK:n DigRob-hankkeen taustoja sekä työskentelytapoja ja Artec Eva -3D-skannerin ominaisuuksia. Tulokset ja työn keskeiset kohdat kootaan lopuksi yhteenvetoon.

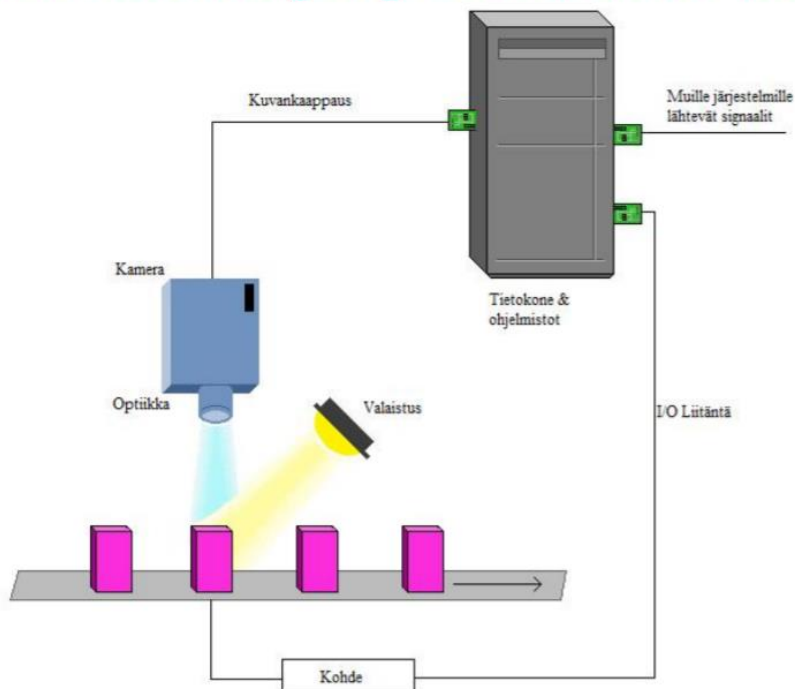
Työn toiminnallinen osuus on tehty yhteistyössä Ville Salosen kanssa. Hän keskittyy opinnäytetyössään kappaleen hitsaukseen. Ville Salosen opinnäytetyön nimi on Lujan rakenneteräksen robottihitsaaminen ilman hitsauskiinnittimiä (2019).

2 KONENÄÖSTÄ SEKÄ 3D-SKANNAUKSESTA

2.1 Konenäkö

Konenäön avulla järjestelmät ja laitteet pystyvät keräämään tietoa käynnissä olevasta prosessista näkyvän valon alueelta ja tekemään päätöksiä havaintojensa perusteella. Konenäkö muodostaa kameras avulla kuvan kohteesta, jonka jälkeen kuva siirtyy tietokoneelle, jossa kuva analysoidaan halutuista piirteistä tai sijainnista. Piirteiden tai sijainnin informaatio siirretään eteenpäin ohjaukselle, esimerkiksi robotille tai automaatiojärjestelmälle, joka tekee kohteelle halutun toimenpiteen. Konenäköä käytetään muun muassa laaduntarkkailussa, tarkistamassa kappaleen ominaisuuksia, kertomassa robotille kappaleen sijaintia tai lukemassa viivakoodia. Konenäöllä korvataan ihmisen silmä sovelluksissa, joissa on paljon samanlaisia toistoja. (Leino, 2018.)

Konenäköjärjestelmän laitteet



Kuva 1. Konenäköjärjestelmän laitteet (Leino, 2018).

Kuten kuvassa (kuva 1) esitetään konenäköjärjestelmä koostuu seuraavista komponenteista ja toiminnoista:

- kamerasta

- kuvankäsittelystä
- valaistuksesta
- analysointiohjelmistosta
- ohjausjärjestelmästä
- käyttöliittymästä

Ratkaisuja, jotka koostuvat suurimmalta osin konenäköjärjestelmän laitteista, kutsutaan älykameroiksi. Älykameroiden etuna on pieni koko, mutta huono kuvanprosessointiteho sekä erillisen kameraa ohjelmoivan laitteen tarve. (Leino 2018.)

2.1.1 Kamera

Kamera koostuu optiikasta sekä kennosta. Sen tehtävä on kuvan muodostus. Kuvan muodostus tapahtuu valon heijastuessa kohteesta optiikkaan, joka muodostaa kuvan kamerassa olevalle kennolle. Kenno koostuu valoherkistä fotodiodeista, jotka muodostavat matriisin tai viivan riippuen kennon tyypistä. Kenno muuttaa valon sähköiseksi varaukseksi. Kennon tallentaessa valoa on valaistuksella olennainen vaikutus kuvauksessa. Tästä saadaan kaksiulotteinen kuva (Leino 2018.) Tavoitteena on saada aikaa kuva, josta ilmenee kuvatun kohteen geometria, värit ja resoluutioltaan riittävän tarkka kuva.

Kameran kennoja on kahta tyyppiä: CCD- ja CMOS-kennoja. CCD-kennot ovat yleisempiä pienemmän koon ja mukautettavuuden ansiosta. CMOS-kennot ovat uudempaa ja nopeampaa teknologiaa, mutta ne eivät ole kuvanlaadullisesti CCD-kennojen tasoisia. Fotodiodien määrä kennossa vaikuttaa kuvaresoluutioon eli erotuskykyyn. Liian suuri resoluutio hidastaa kuvanmuodostumista ja käsittelyä. Fotodiodit voivat olla matriisimuodostelmassa tai vierekkäin. Fotodiodien ollessa vierekkäin kutsutaan kameraa viivakameraksi. Viivakameroita käytetään yleensä liikkuvien kappaleiden kuvaamiseen. (Halinen 2007, 3–4.)

Kennolta saatujen fotodiodien sähkövaraus muutetaan analogisista digitaalisiksi biteiksi. Jokaisella bitillä on sitä vastaava harmaansävy. Tarvittaessa kuvaan luodaan värit Bayer-suodattimella, interpoloinnilla tai 3CCD-menetelmällä (Mattson 2015.)

2.1.2 Valaistus

Valaistuksella on järjestelmässä keskeinen merkitys haluttujen piirteiden esiintuomissa ja kontrastin parantamisessa. Valaistuksen pitäisi pysyä vuorokaudenajasta riippumatta muuttumattomana, myös ilman auringonvaloa, sillä muutokset valaistuksessa aikaansaavat virheitä kuten heijastumia tai varjoja mittaustuloksiin. Valaisutekniikoita on erilaisia ja niistä valitaan sovellustyypille sopivin.

2.1.3 Valaisumenetelmiä

Valaisumenetelmiä ovat esimerkiksi kohtisuoravalaisu, sivuvalo, taustavalo, kupolivalaisu ja stroboskooppivalo.

Kohtisuoravalaisu (bright field) valo törmää kappaleeseen kohtisuoraan. Menetelmä luo terävät varjot kappaleen osiin, jotka eivät ole kameraan nähden kohtisuorassa. (Mattson, 2015)

Sivuvalovalaisumenetelmässä (dark field) valo tulee kappaletta kohti pienessä kulmassa. Sivulta tuleva valo korostaa kuvattavan kappaleen korkeuseroja ja naarmuja. Kameraan heijastuu valo vain kappaleen korkeuseroista, samalla kun muu kappale näkyy kameralle mustana, johtuen valon pienestä tulokulmasta (Mattson 2015.)

Taustavalomenetelmää käytettäessä kuvattava kappale asetetaan valonlähteen ja kameran väliin. Menetelmän avulla tuodaan hyvin esiin kappaleen ääriviivat. Menetelmä ei sovellu kappaleen pinnan muotojen tarkasteluun (Mattson 2015.)

Kupolivalaisumenetelmän avulla valo tuodaan heijastamaan kupoliin, joka heijastaa valon kohteeseen. Menetelmällä saadaan valaistua kohde tasaisesti. Tällöin kappaleeseen ei muodostu varjoja. Tästä syystä menetelmä soveltuu hyvin heijastavien kappaleiden kuvaamiseen (Mattson 2015.)

Stroboskooppivaloa eli salamavaloa tuotetaan valaisimesta riittävästi pienen hetken, jotta kennolle saadaan valoenergiaa sekä poistettua häiritsevä valo. Stroboskooppivalomenetelmä soveltuu hyvin liikkuvan kohteen kuvaamiseen (Leino 2018.)

2.1.4 Kuvankäsittely

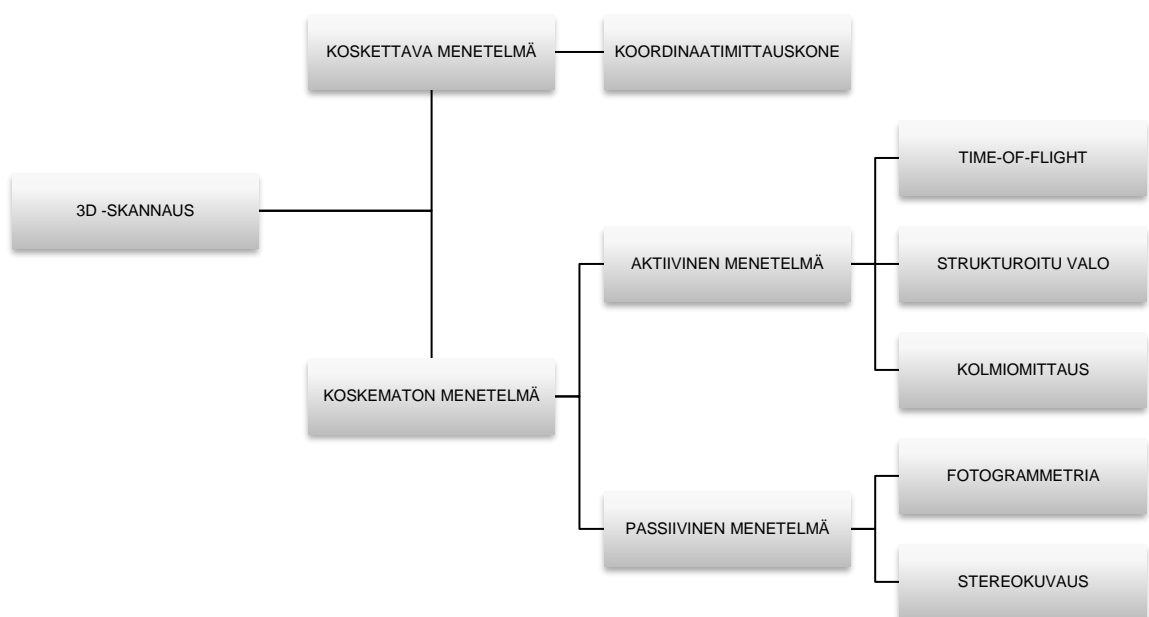
Kameralla otettu kuva siirtyy muistiin, jossa sitä esikäsitellään. Kuvasta pyritään poistamaan mittausten kannalta kaikki turha tieto esimerkiksi rajaamalla kuvaa. Kuvasta voidaan siis esimerkiksi poimia pienempi osa ja tarkastella sitä. Tällainen rajaaminen nopeuttaa kuvankäsittelyprosessia. Kuvasta voidaan poistaa myös mahdolliset häiriötaajuudet. (Halinen 2007, 9-10.) Esikäsitelyn jälkeen kuva segmentoidaan eli kuvasta etsitään yhtenäiset kappaleet, jotta niiden tarkastelu on helpompaa ja nopeampaa kuin ilman segmentointia (Eskelinen, Tirronen & Rossi 2017, 95–97).

Seuraavaksi kuva siirtyy tunnistusohjelmalle, jossa verrataan otettua kuvaa määritettyihin mittoihin tai referenssikuvaan. Tunnistusohjelma tarkastaa, että kuvattun kappaleen mitat ovat haluttujen arvojen sisällä (Halinen 2007, 11.)

Ohjausjärjestelmä käyttää mittauksista saatuja tuloksia, joiden pohjalta se tekee päätöksiä kuvattavalle kappaleelle tai siihen liittyvälle tuotantoprosessille. Ehtona tälle on, että kuvasta saadun tiedon laatu on riittävä, jotta prosessia voidaan kontrolloida sen pohjalta. (Halinen, 2007) Tietokoneella tai käyttäjöpääteellä voidaan tarvittaessa tehdä muutoksia laitteiston toimintaan käyttöliittymässä. Käyttöliittymästä päästään tämän lisäksi käsiin tuotantoraportteihin ja tietoon laitteiston kunnosta (Leino 2018).

2.2 3D-skannaus

3D-skannauksessa skannattuun kappaleeseen voidaan muodostaa piste, viiva tai kuvio, jotta kappaleesta saadaan tietoa syvyysuunnassa, jotta kappaleesta voidaan luoda kolmiulotteinen malli. Menetelmiä, joissa mallista haetaan mittaustietoa laserin tai kuvion muutoksesta, kutsutaan aktiivisiksi menetelmiksi. Aktiivisia menetelmiä ovat time-of-flight, kolmiomittaus ja strukturoitu valo. Passiivisia menetelmiä ovat fotogrammetria ja stereokuvaus. Koskettavalla 3D-skannauksella tarkoitetaan yleisesti koordinaattimittauskoneita. (Ebrahim 2015.)

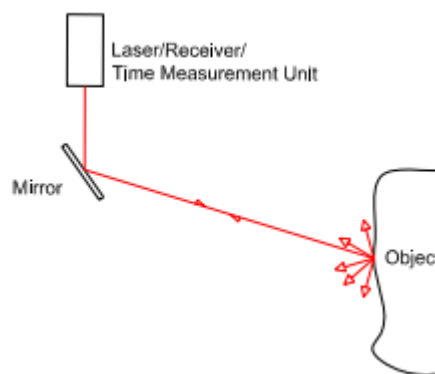


Kuva 2 Skannausmenetelmiä. Mukailtu (Ebrahim 2015).

Skannatuista malleista voidaan tarkastella mittoja, tilavuuksia ja kappaleiden sijaintia syvyysuunnassa. Malli muodostetaan kappaleesta saaduista pistetiedoista, jotka yhdistetään kolmioiksi ja muodostavat mesh-mallin (Titako 2006.) Mesh-mallia voidaan kutsua myös kolmioverkkomalliksi. 3D-skannaus mahdollistaa myös CAD-mallin muodostamisen kappaleesta ja sen vertaamisen referenssimalliin. 3D-skannausjärjestelmä vaatii huomattavasti enemmän kuvanprosessointitehoa sen kolmannen ulottuvuuden takia (UKIVA.)

2.2.1 Time-of-flight

Menetelmä mittaa kappaleeseen heijastettavan valon heijastumista kameran kennolle. Malli luodaan valon vaiheen muutoksen sekä valon heijastumiseen kuluvan ajan perusteella. Kameran sensorin jokainen pikseli saa syvyysarvon, minkä takia etäisyyksien muutosta voidaan helposti esittää visuaalisesti. Kameran kenno kuvaa kerralla koko sensorin kattaman alueen (Ganapathi, V; Plagemann, C; Koller, D & Thrun, S. 1–2.) Menetelmän hyvä puoli on sen reaaliaikaisuus. Skannausta voivat häiritä läheltä tulevat heijastumat kirkkaista valoista (Thruisted reviews 2019.)

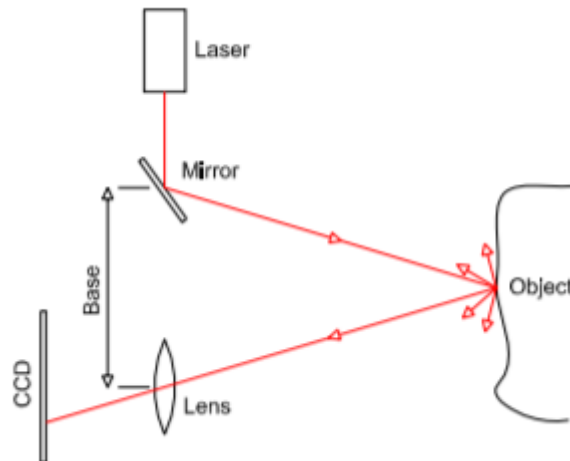


Kuva 3. Kuvassa ToF-mittaus-tilanne (Boehler & Marbs 2002, 2).

Kuva 2:ssa laservalo heijastuu kappaleesta takasin vastaanottimelle, ja vastaanotin saa tiedon valon muuttuneesta vaihe-erosta. Eräs tunnetuimpia time-of-flight sovelluksia on Microsoftin Kinect-sensori Xbox 360 pelikonsolille. Time-of-flight kuluttaa vähän virtaa ja tästä syystä sen uusimmat sovellukset ovat jo matkapuhelimissa (Thruisted reviews 2019).

2.2.2 Kolmiomittaus

Kolmiomittauksessa skannerin sensori vastaanottaa kuvattavasta kappaleesta heijastuneen laseripisteen tai -viivan. Sensorin, kuvaus kohteen ja laserin välille muodostuu kolmio, josta voidaan trigonometrian avulla laskea pistepaikkatieto laserin heijastuskohdalle kuvattavasta kohteesta (3D Systems). Jotta skannaus onnistuu kunnolla, on tiedettävä sensorin ja laserin etäisyys sekä niiden kulma. Kolmiomittauksella pystytään mittaamaan etäisyyttä ja paikkaa (Wu, JH Chang, RS & Jiang, JA 2007.)



Kuva 4. Kolmiomittauksen rakenne (Boehler & Marbs 2002, 2).

Kolmiomittaus eroaa Time-of-flightista siten, että kolmiomittauksessa vastaanotin on erillään valonlähteestä, toisin kuin Time-of-flightissa, jossa lähetin sekä vastaanotin ovat samassa kohtaa.

2.2.3 Stereokuvaus

Stereokuvauksessa otetaan kaksi kuvaa samasta kohteesta kuvauskohteiden ollessa hieman erillään toisistaan. Mitä lähempänä kuvattava kohde on, sitä enemmän kuvat poikkeavat toisistaan. Kuvattavan kohteen ollessa kauempana kuvien poikkeamat ovat pienemmät. Mittauksessa kuvien eri kohtia vertaillaan toisiinsa. Kuva, jossa tietty kohde näyttää isompana, on lähempänä kyseistä kameraa, jolla kuva on otettu. Stereokuvauksessa kuvaussuuntien on oltava yhdensuuntaiset myös kohtisuorassa kuvattavaa kohdetta nähden. Stereokuvauksessa mittatietoja saadaan selville mittaamalla eri kuvista saman kappaleen samojen pisteiden sijaintia kamerasuunnissa. (Vinni 2003.)

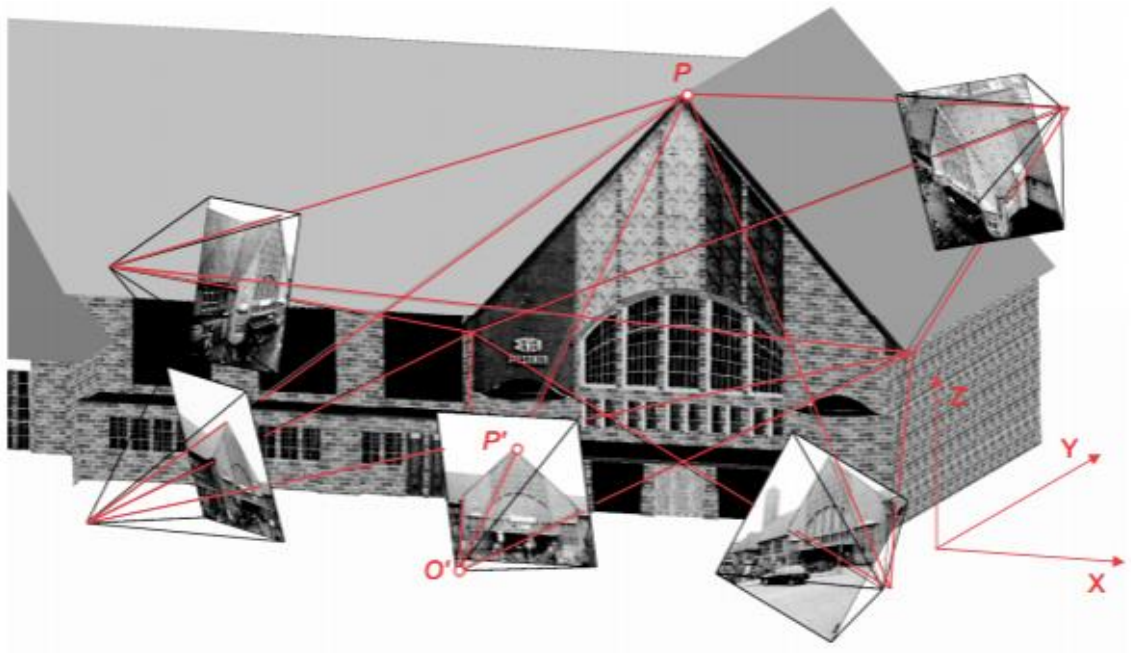
2.2.4 Fotogrammetria

Fotogrammetriassa käytetään kuvanmittausta ja -tulkintaa ja kuvan geometriaa kolmiulotteisen mallin muodostamiseksi. Mittausprosessin eri vaiheita ovat kohteen koordinaatiston osoittaminen, kohteen kuvaaminen, kuvien orientointi ja valmiiden 3D-mallien tulkinta. Tärkeätä on muodostaa kuvaan koordinaatisto, joka pystytään havaitsemaan

kaikista otetuista kuvista. Yleensä käytetään vain tietyn kamerakuvan kuvan kamera-koordinaatistoa eli useampaa kamerakoordinaatistoa ei hyödynnetä samanaikaisesti. (Haggrén 2005.)

Voidakseen luottaa kameran teknisiin ominaisuuksiin, ne on tunnettava hyvin tarkasti. Ominaisuuksien on myös pysyttävä samoina eri kuvausten aikana. (Vinni 2003). Kohteesta otetaan useampi kuva (vähintään kaksi), joista on pystyttävä havaitsemaan valitut kiintopisteet. Kuvien tulee tuoda mahdollisimman hyvin esiin kuvatun kohteen muodot, jotta muodostettava malli vastaisi mahdollisimman hyvin todellisuutta. Tietokoneelle annetaan tiedot kuvien kuvaamispaikoista ja kameran ominaisuuksista, jotta tietokone pystyy laskemaan tietojen avulla luotettavan mallin kuvauskohteesta.

Fotogrammetrialla pystytään myös mittaamaan umpinaisia kappaleita. Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi röntgenkuvien tulkitsemisessä. Fotogrammetriaa on perinteisesti käytetty optisessa muodontarkastuksessa sekä karttatyön apuna. (Luhmann, Robson, Kyle & Harley 2006, 2.)

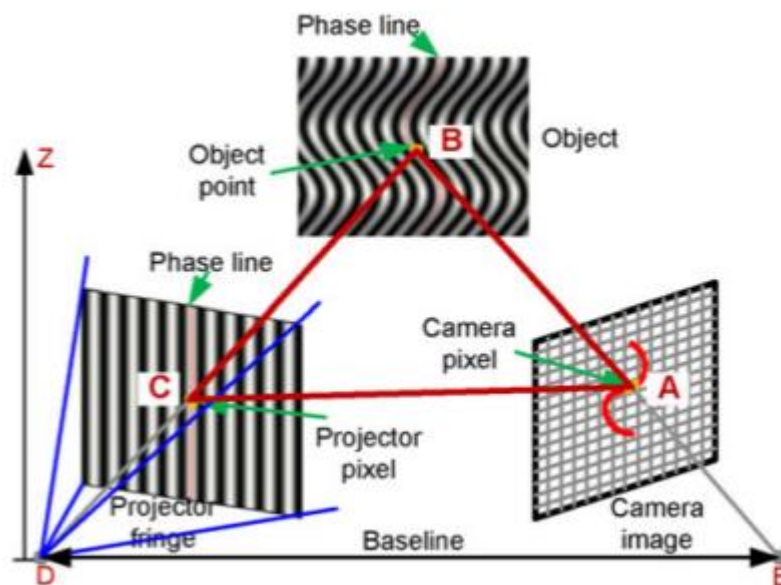


Kuva 5. Kuvassa muodostettuna pisteitä koordinaatistoon. (Luhmann, Robson, Kyle & Harley 2006, 2).

Kuvassa 4 Fotogrammetriaa on hyödynnetty rakennuksen taltioinnissa. Kuvasta voidaan havaita valitut kiintopisteet, jotka nähdään jokaisesta otetusta kuvasta. Kuvia on oltava vähintään kaksi, jotta kuvia voidaan hyödyntää mallinnuksessa.

2.2.5 Strukturoitu valo

Strukturoitua valoa käytetään heijastamalla projektorilla kuvattavaan kappaleeseen ennalta määrätty kuvio, yleensä kuviot ovat viivoja. Kuvio heijastuu kuvattavasta kappaleesta takaisin kameralle. Kamera kuvaa kappaleen projisoidun kuvion kanssa, jonka jälkeen projisoitua kuviota verrataan kameran taltioimaan kuvioon. Kuvion muutoksesta havainnoidaan mittoja ja muotoja, joiden perusteella tietokone muodostaa kuvauskohdeesta mallin. (UKIVA.) Tietokone käyttää kolmiomittausta verratessaan kuvan kuvioita heijastettuun kuvioon. Menetelmä vaatii kappaleen pysymistä paikoillaan. Taltioidun kuvan tarkkuuteen vaikuttavat projisoidun kuvan sisältämät yksityiskohdat. Monimutkaisempia kappaleita kuvattaessa tarvitaan usein useampi heijastettu kuvio kappaleen päälle. (Karpinsky, Zhang 2010, 1–2.)



Kuva 6. Kuvassa esitetty heijastetun kuvion muutos kappaleessa ja sen välittyminen kennolle. (Karpinsky, Zhang 2010, 2).

2.2.6 Koordinaattimittauskone

Koordinaattimittauskoneella mitataan kappaleesta mittapisteitä mittapään avulla. Mitatut pisteet sijoittuvat mittauskoneen koordinaatistolle. Mittakone ei automaattisesti muodosta 3D-mallia, vaan pelkkiä pistepaikka tietoa, jotka voidaan muuttaa lopulta erillisellä

ohjelmalla 3D-malliksi. Koordinaatistomittakoneita on käsi- sekä CNC-ohjattuja. Koordinaatimittauskoneella saadaan aikaan tarkkoja mittauksia ja niillä usein tarkastetaan tehtyjen kappaleiden mittatarkkuus. [Suokas 1999] (Kesseli 2006 9–10.)



Kuva 7. Kuvassa koordinaatistomittauskone (Rensi).

3 OPINNÄYTETYÖ OSANA HANKETTA

3.1 Opinnäytetyön tausta

DigRob-hankkeeseen liittyvän opinnäytetyön tavoitteena oli mitata kappaleen korvakkeiden kulmien muutosta hitsauskiinnikkeettömässä hitsausprosessissa ja pyrkiä mittauksista saatavan tiedon avulla ennakoimaan hitsauksesta aiheutuvan korvakkeen kulmanmuutoksen, jotta tämä muutos pystyttäisiin ennakoimaan ennen hitsausta. Hitsin kutistuessa on tavallista, että kappaleiden kulmat eivät enää ole 90 asteen kulmassa. Tästä ilmiöstä aiheutuvaa haittaa pyritään korjaamaan ottamalla kutistuva astemäärä ennakkoon huomioon. Hitsauskiinnikkeettömässä hitsauksessa poimitaan hitsattavat kappaleet telineistä tarttujilla ja kappaleet tuodaan haluttuun hitsausasentoon. Kappaleiden ollessa halutussa asennossa ne silloitushitsataan kiinni ja tämän jälkeen kappaleen tuonut robotti päästää irti tuodusta korvakkeesta. Ennen lopullista hitsausta kappale tuodaan skannerin skannausetäisyydelle skannausta varten. Silloitushitsausskannauksen jälkeen kappale hitsataan, jonka jälkeen tehdään hitsauksen jälkeinen skannaus.

Opinnäytetyössä esiintyvien skannattavien kappaleiden otanta on seitsemän kappaletta, jotka skannattiin Artec Eva 3D-skannerilla.

Tarkoituksena on selvittää, että pystytäänkö 3D-skannerilla kuvatun kappaleen skannauksesta mittaamaan ilman hitsauskiinnittimiä hitsattujen korvakkeiden kulmaa kappaleen ollessa kiinnitettynä kappaletta käsittelevään robottiin skannauksen aikana. Tarkastelun kohteena on, että muuttuuko korvakkeiden kulma hitsauksen vuoksi ja kuinka paljon.

3.2 Artec Eva 3D-skanneri

Artec Eva on 3D-skanneri, jonka toiminta perustuu strukturoituun valoon (ks. 2.2.5 Strukturoitu valo). Skanneri on tarkoitettu keskiuurten kappaleiden skannaamiseen. Skanneri on suunniteltu käytettäväksi paikallaan olevan kappaleen skannaamiseen käsin. Artec Evan jälleenmyyntihinta on 13 700€ (Artec). Skanneri muodostaa kuvatusta kohteesta

pistepilven Artec Studio -ohjelmaan, jossa nähdään skannerin synnyttämä malli. Ohjelmassa pystytään tarkastelemaan skannauksen onnistumista ja siistimään skannattua mallia, jotta turhaa dataa saadaan karsittua pois ja samalla pitämään kuitenkin skannatun tiedoston koko maltillisena.

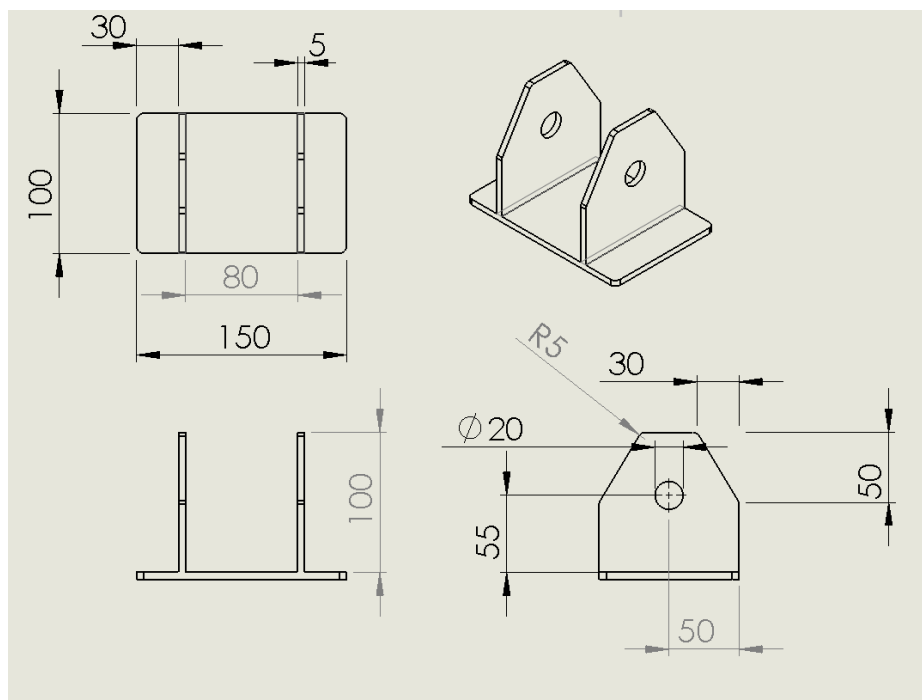
Taulukko 1. Artec Evan teknisiä tietoja (Artec 2018).

Ability to capture texture	Yes
3D resolution, up to	0.5 mm
3D point accuracy, up to	0.1 mm
3D accuracy over distance, up to	0.03% over 100 cm
Texture resolution	1.3 mp
Colors	24 bpp
Light source	flash bulb
Working distance	0.4 – 1 m
Linear field of view, HxW @ closest range	214x148 mm
Linear field of view, HxW @ furthest range	536x371 mm
Angular field of view, HxW	30 x 21°
Video frame rate, up to	16 fps
Exposure time	0.0002 s
Data acquisition speed, up to	2 million points/s
Multi core processing	Yes
Dimensions, HxDxW	261.5x158.2x63.7 mm
Weight	0.85 kg
3D mesh formats	OBJ, PLY, WRL, STL, AOP, ASCII, PTX, E57, XYZRGB
Processing capacity	40 million triangles / 1GB RAM

4 ROBOTILLA HITSATUN KAPPALEEN SKANNAUS 3D-SKANNERILLA

4.1 Kappaleen sekä poimintatelineiden suunnittelu

Kappaleen suunnittelussa yhtenä oli kappaleen osien helppo käsittely jo olemassa olevilla tarttujilla, joita oli käytetty Turun AMK:n aiemmassa projektissa. Tällä tavoin saatiin nopeutettua työhön liittyviä esivalmisteluja, sillä tarttujien hankitaan tai valmistukseen ei kulunut aikaa. Toinen rajoittava tekijä oli kappaleen muoto: kappaleen tulisi olla leikattavissa Turun Koneteknologiakeskuksen omistamalla levytyökeskuksen laserilla. Kappaleessa pyrittiin välttämään teräviä kulmia, jotta kappaleen leikkuujälki olisi mahdollisimman siisti. Korvakkeiden hitsausviisteitä ei ole lisätty piirustukseen (kuva 7) hitsausviisteiden mittojen vaihtuessa eri kappaleiden välillä. Materiaalina käytettiin 5 mm paksua SSAB:n STRENX 700MC sekä STRENX 700MC Plus rakenneterästä.



Kuva 8. Suunniteltu kappale



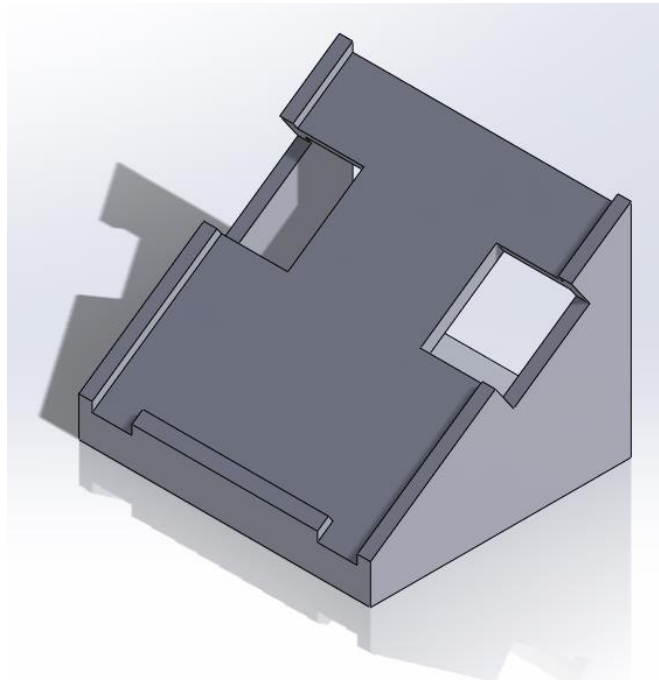
Kuva 9. Kappaleet leikattuina

Telineet, joista kappaleet poimitaan (myöhemmin poimintatelineet) suunniteltiin siten, että niihin olisi helppoa lisätä uusien mittauskertojen kappaleet, jotta kappaleen hakeminen robotilla olisi mahdollista aina samasta kohdasta. Poimintatelineet sekä itse kappale suunniteltiin käyttäen Solidworks 3D -mallinnusohjelmaa. Poimintatelineisiin suunniteltiin tarttuvia varten aukot (kuvat 9 ja 10). Suunnitellut kappaleet tulostettiin 3D-tulostimella, jolloin saatiin helposti toteutettua suunnitellut muodot.

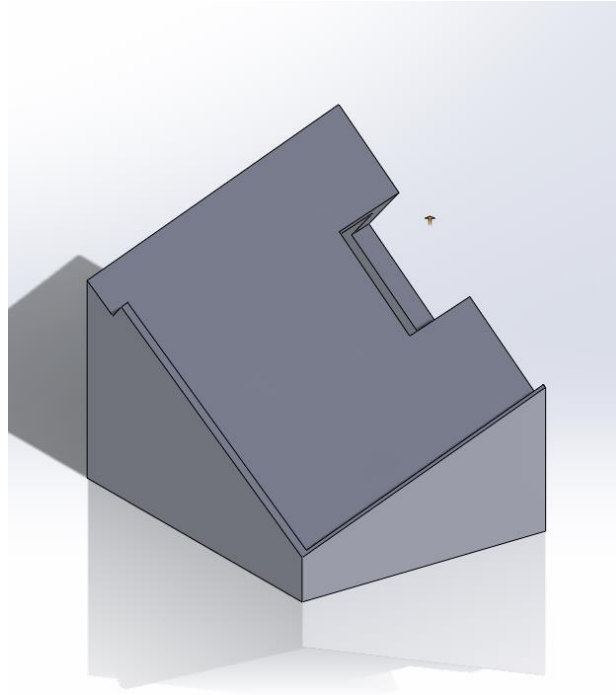
Poimintatelineiden 3D-tulostus

Tulostimena toimi Turun AMK:n Makerbotin Replicator+ -tulostin. Tulostukseen käytettiin Makerbotin Makerbot Print -ohjelmistoa, jonka avulla pystytään helposti näkemään kappaleen todellinen printtaukseen kuluva aika. Makerbot Print -ohjelman saa ladattua ilmaiseksi Makerbotin kotisivuilta.

Printtausaikaan vaikutti lähtökohtaisesti kappaleen asento, täyttöaste sekä printattavien kerrosten paksuus. 3D-tulostus ei kuitenkaan sujunut ongelmitta: esimerkiksi yksi korvakkeen poimintateline ei tarttunut kunnolla 3D-printterin pohjalevyyn. Tästä seurasi poimintatelineen juuttuminen 3D-printterin suuttimeen. Syynä juuttumiseen olivat tulostimen alustassa olleet naarmut, jotka estivät kappaleen kiinnittymisen alustaan kunnolla.



Kuva 10. Kuvassa 3D-malli kappaleen pohjan poimintatelineestä



Kuva 11. Kuvassa korvakkeiden poimintateline

4.2 Robotti

Robottisoluna käytettiin Turun AMK:n triplarobottihitsausasemaa. Robottisolun käyttöönottoa helpotti se, että robottisolua on esitelty kone- ja tuotantotekniikan opinnoissa. Tällöin robotin käytön tutustumiseen ei mennyt huomattavasti aikaa.

Taulukko 2. Robottisolun teknisiä tietoja

Maks. kuorma	3 kg
Langansyöttölaite	Motoman WTC-Ultramanic
Hitsausvirtalähde	Kempo 3200
robotti	3kpl YR - SV3
Ohjaus	Motoman XRC

Robotinohjelmointi

Robotinohjelmoinnin perustana on yksi pääohjelma, josta haetaan eri aliohjelmiä. Tällä rakenteella pystytään helposti muuttamaan tarvittaessa robotin liikeratoja nopeammin sekä seuraamaan ohjelmaa.

Pääohjelman kulku selostettuna aliohjelmittain:

- Pohjakappaleen ja korvakkeen numero yksi haku (ensimmäiseksi silloitushitsattu korvake)
- Korvakkeen numero yksi silloitushitsaus pohjakappaleeseen
- Korvakkeen numero kaksi (toisena silloitushitsattu korvake) silloitushitsaus pohjakappaleeseen
- Kappaleen skannaus silloitushitsauksen jälkeen
- Korvakkeiden hitsaus
- Kappaleen uudelleenskannaus
- Kappaleen tuonti
- Robottien ajo kotiasemiinsa

Silloitushitsaus sekä hitsaus tapahtuivat kappaleen ollessa 45 asteen kulmassa. Tällöin oli mahdollista hitsata optimaalisesti jalkoasennossa. Korvakkeet ovat silloitushitsauksen aikana 90 asteen kulmassa.

Haastetta robotin ratoihin toi tarttuja, jolla poimittiin korvakkeita. Korvakkeet eivät pysyneet tarttujassa jämäkästi paikoillaan, vaan korvakkeet liikkuivat hieman tarttujassa. Ongelma ratkaistiin tuomalla korvake hitaasti kappaleen pohjaan, jotta korvake oikenee suoraksi. Oikaisun jälkeen kappaletta nostetaan pohjasta ylöspäin halutun ilmaraon verran. Tällöin pystytään lisäämään toistotarkkuutta ohjelmaan.

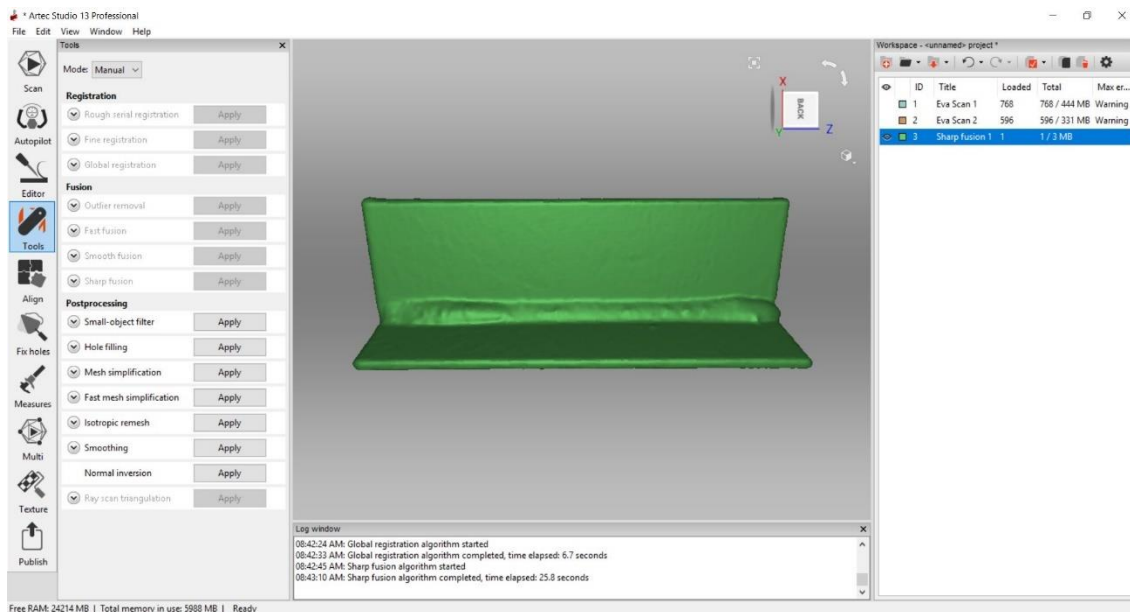
4.3 Kappaleen skannaus

Ennen robotilla liikutettavan varsinaisen kappaleen skannaamista skannausta kokeiltiin hitsatulla t-palalla harjoitusmielessä. Aluksi haasteina olivat skannerin vaatimaan skannausetäisyyteen totuttautuminen ja skannerin liikuttaminen käsin. Koeskannausten aikana huomattiin myös, että yhtenäistä kappaletta on liki mahdotonta saada aikaiseksi, jos kappale kiiltää tai kappaleessa on leikkuujälkiä.



Kuva 12. Artec Eva -skanneriin totuttelua

Skannerilla aikaansaatu pistepilveä muokattiin ja suodatettiin Artecin kehittämällä Artec Studio Professional 13 -ohjelmalla. Aluksi kokeiltiin ohjelman automaattitoimintoa, joka suoritti pistepilvelle sarjan puhdistustoimintoja, joiden avulla malli siistitään käyttäjää varten. Automaattitoiminto ei kuitenkaan toiminut yhtä hyvin kuin ohjelman manuaalitoiminto, mikäli skannattiin useampi kuin yksi sivu kappaleesta kerrallaan. Toisin sanoen koko kappaleen skannauksissa automaattinen siistiminen sai lähinnä mallin huonompaan kuntoon. Tästä syystä päädyttiin käyttämään myöhemmin manuaalisia siistimistä, jotta mallille saataisiin tehtyä tarvittava onnistunut siistimistö.



Kuva 13. Kuvassa harjoitusten t-palan malli, joka on siistitty

Tarkasteltavan kappaleen skannauksessa skanneri on paikallaan kolmijalan päällä. Kappaletta liikutetaan skannerin edessä niin, että kappaleen muodot saadaan skannattua hyvin. Tarkoituksena oli, että robotti olisi pyörittänyt skannattavaa kappaletta skannerin edessä kappaleen ollessa kiinni tarttujassa koko skannauksen ajan. Tämä tapa osoittautui lopulta epäsovivaksi, sillä skannerin keräämä data ilmeni niin epäselvänä, ettei mallia edes tunnistanut kuvatuksi kappaleeksi.

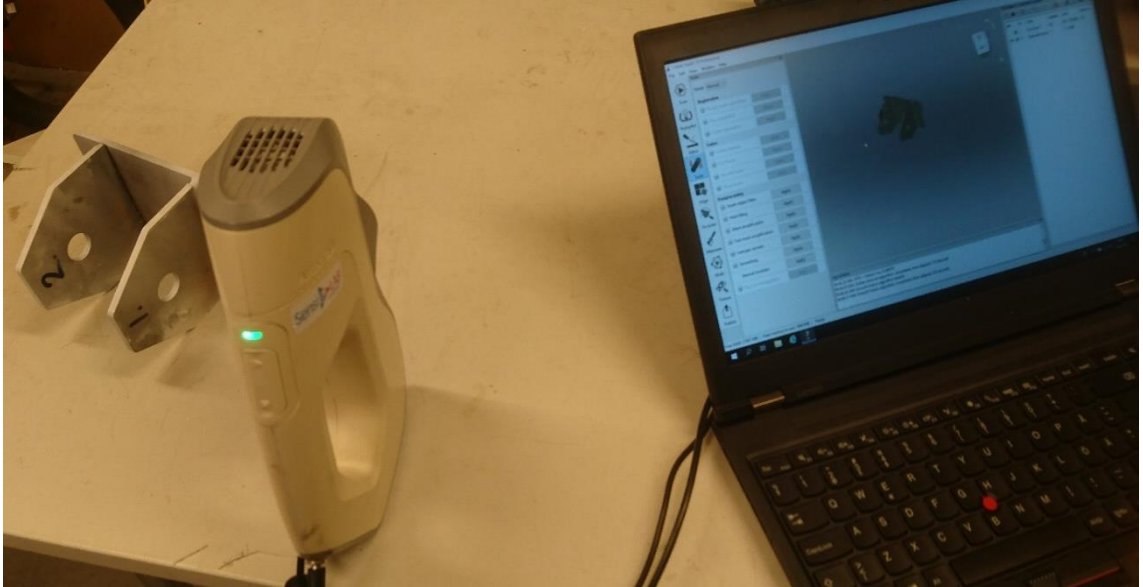
Tämän jälkeen selvisi, ettei skanneria ole tarkoitettu skannaamaan robotilla liikutettavaa kappaletta ja haluttu systemaattinen pyörivä liike on skannerille liian vaikea skannattava. Tämä tieto saatiin sähköpostitse Artecin jälleenmyyjältä. Skanneri on heidän mukaansa suunniteltu skannaamaan pelkästään paikoillaan olevia kappaleita. Skanneri on tämän lisäksi suunniteltu käytettäväksi käsin.

Tämän tiedon jälkeen kappale skannattiin käsin. Käsin skannaamalla pyrittiin havainnoimaan paremmin millaisilla liikeradoilla kappale olisi mahdollista skannata. Kokeilut tuottivat halutun tuloksen, jolloin käsin skannaamalla imitoitiin liikerata vastaamaan robotin liikerataa. Toimiva liikerata saatiin kappaleen korvakkeiden osoittaessa skanneriin ja robotin liikuttaessa kappaletta siten, että molemmat korvakkeet näkyivät kokonaisuudessaan skannauksen aikana.



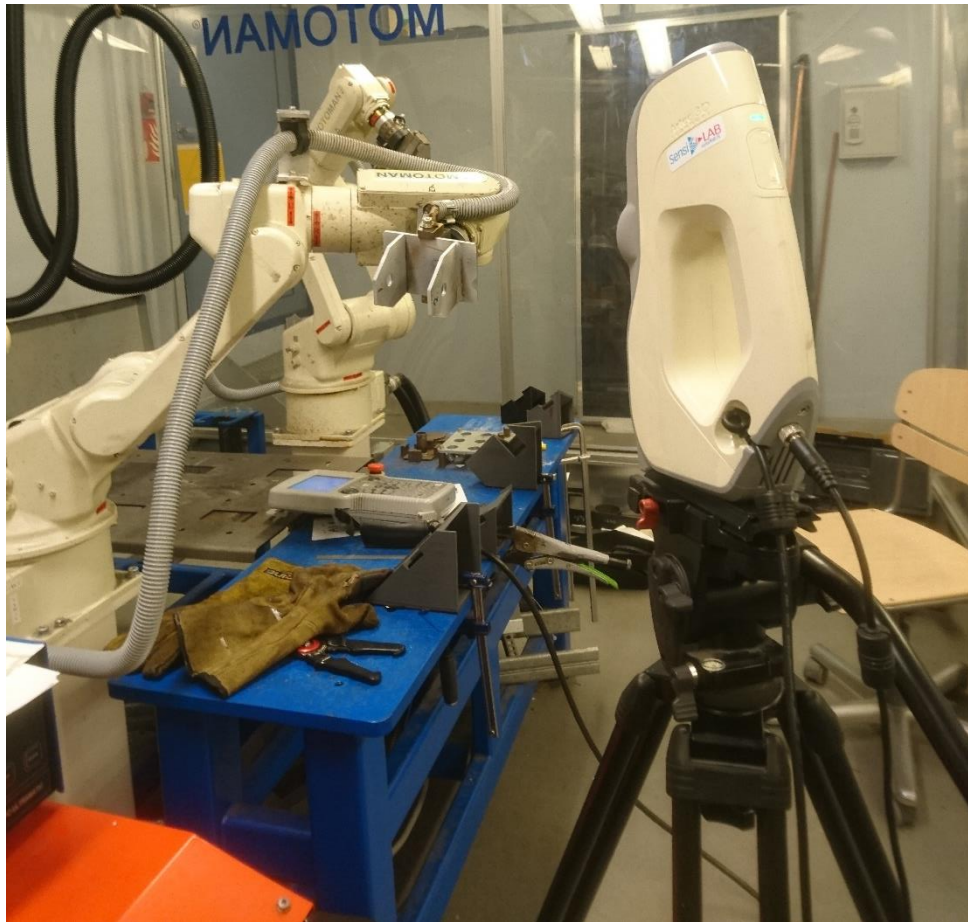
Kuva 14. Ensimmäinen skannausasento

Ensimmäisessä skannausasennossa kappaletta pyöritettiin itsensä ympäri. Skannauksesta syntyvä malli oli heikkolaatuinen. Syynä heikkolaatuisuuteen on luultavimmin skannerin muodostaman koordinaatiston kiintopisteen häviäminen pyörivän liikkeen vuoksi, sillä skanneria ei ole tarkoitettu käytettäväksi liikkeessä tai liikkuviin kohteisiin.



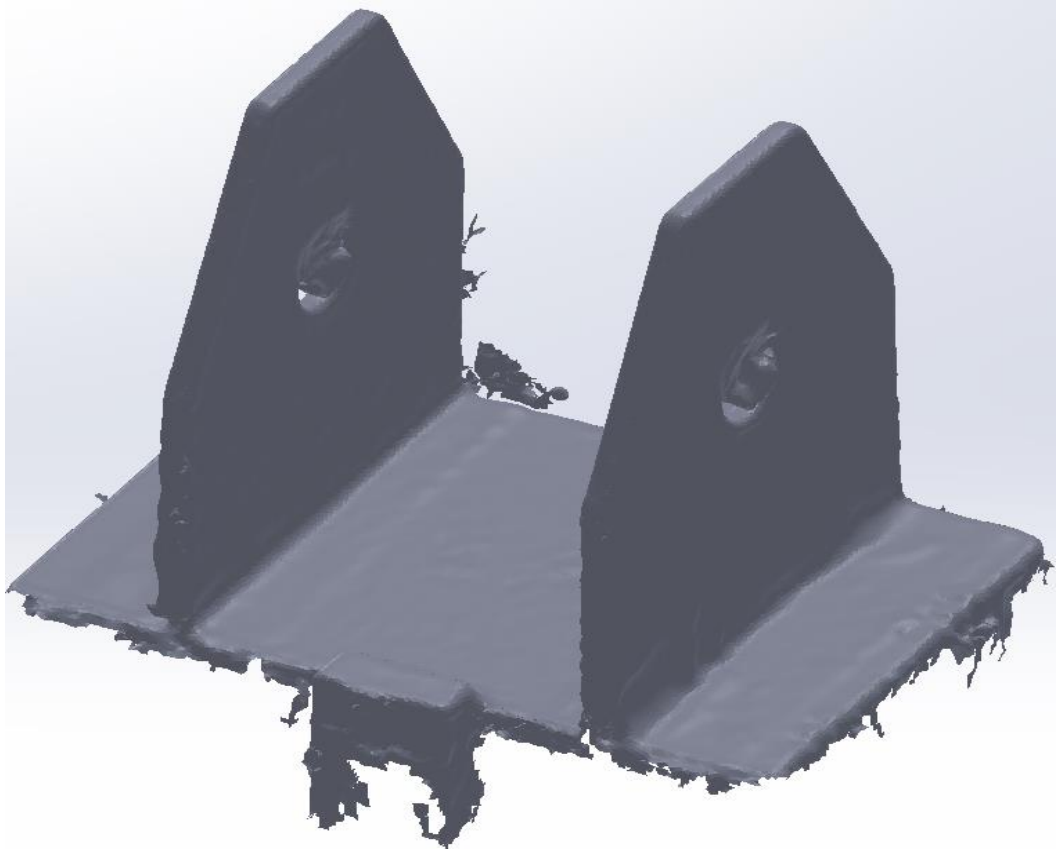
Kuva 15. Kuvassa skannausradan hakua käsin

Yllä olevassa kuvassa (kuva 14) on Artec Eva -skanneri sekä Artec Studio Professional 13 -ohjelma. Skannerin vasemmalla puolella on skannattava kappale, johon sen korvakkeet on merkitty numeroin.



Kuva 16. Toinen skannausasento robotilla

Yllä olevassa kuvassa (kuva 15) skanneri on kolmijalan päällä. Kolmijalka tai skanneri ei ole skannauksen aikana liikkeessä. Kuvasta voidaan huomata, että korvakkeet ovat kameraan päin. Toisessa skannausasennossa kappale ei pyöritetä, vaan sitä käännetään sivuttais- ja pystysuunnassa. Toinen skannausasento oli onnistunut, sillä skannerilla tuotettu malli oli ensimmäisestä skannausasennosta saatuun malliin verrattuna siistimpi ja selvempi.



Kuva 17. Skannaamalla aikaiseksi saatu malli

Kappaleesta ei saatu tehtyä kokonaista mallia. Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, että mallista puuttuu muun muassa pohja. Tästä syystä tyydyttiin malliin, josta saadaan opinnäytetyöhön tarvittavat tiedot. Tarvittavat tiedot saatiin korvakkeiden sekä pohjalevyn pinnasta. Kokonaisen mallin muodostamiseen olisi tarvittu erillinen aliohjelma robotin pääohjelmaan, jossa kappale olisi voitu kääntää eri asentoon skannausta varten. Kappaleen liikuttamisen haasteena olisi ollut tarttujan tukeva tarttuminen uudesta asennosta korvakkeiden ollessa paikoillaan.

Skannauksissa ilmeni hieman häiriöitä robotista sekä kappaleen tarttujasta. Suurimmat häiriöt voitiin kuitenkin poistaa Artec Studiolla. Tarttujan ja maadoituskaapelin näkyminen mallissa auttoi selvittämään korvakkeiden asennon, kun mallia tarkasteltiin Artec studiolla sekä GOM Inspectillä.

Skannausten analysoinnissa haasteena ovat hitsauksen aiheuttamat kappaleessa tapahtuvat muodonmuutokset. Näiden muutosten takia kappale keikkui pöydällä, mikä hankaloitti kappaleen mittaamista käsin. Käsin mitaten voitaisiin varmistua kulmien ja

skannatun kappaleen tulosten yhdenmukaisuudesta. Hitsin kutistumisesta aiheutuvan kulmanmuutoksen seurantaan vaikeuttavat muun muassa kappaleen pohjan ohuus ja kappaleen oleminen kiinni yhdellä tarttujalla. Nämä mahdollistavat muodonmuutoksen vapaan syntymisen kappaleeseen.

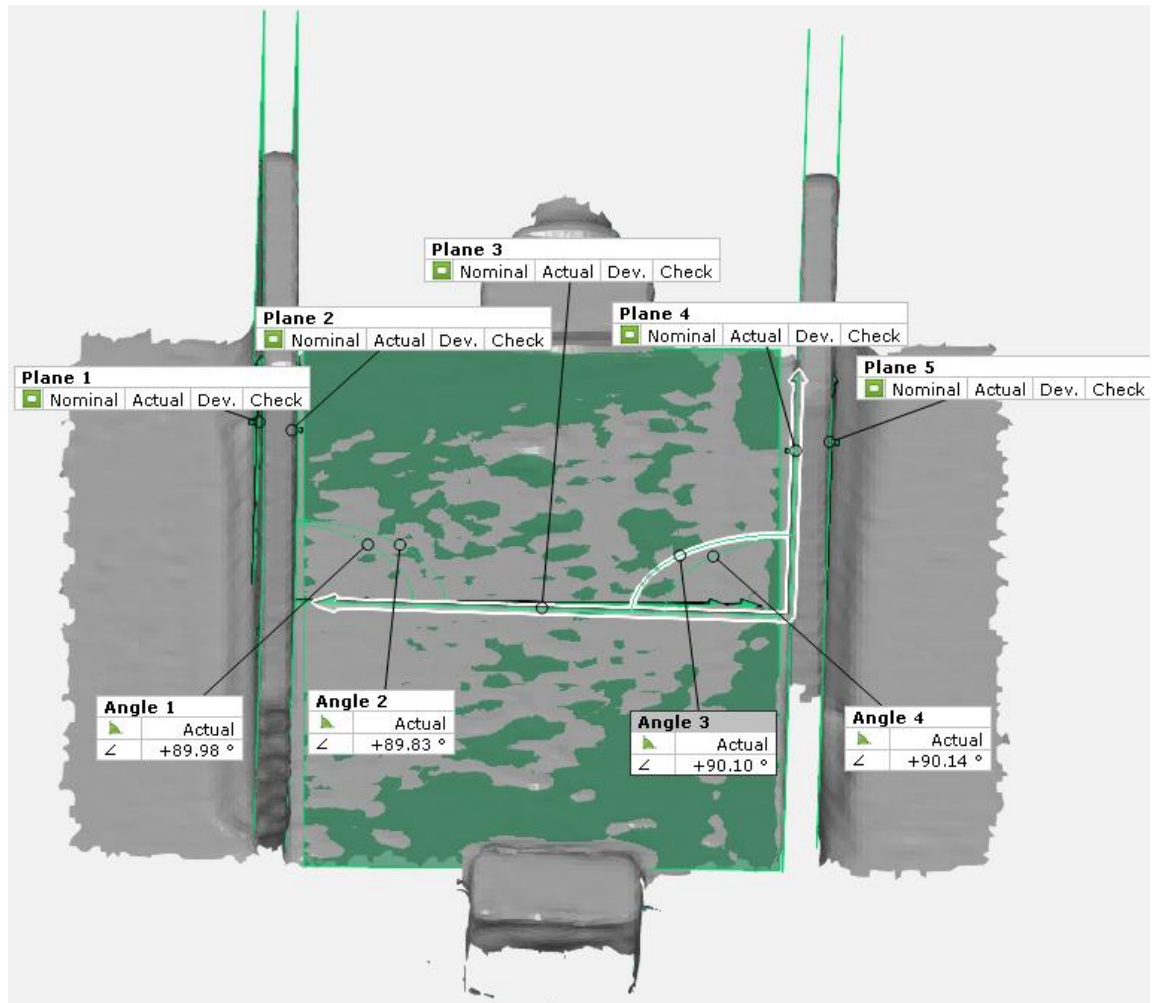
4.4 Kappaleen mallin tarkastelu GOM Inspectillä

GOM Inspect on GOM:in kehittämä ohjelma, jolla analysoidaan 3D-dataa. Tarkasteltava 3D-data voi olla peräisin esimerkiksi skannerista tai koordinaattimittauskoneesta. Ohjelmalla pystytään tämän lisäksi vertaamaan valmistetusta kappaleesta saatua mittadataa CAD-malliin, jonka pohjalta kappale on tehty. Ohjelmalla pystytään seuraamaan tietyn kappaleen mittojen kehittymistä tuotannossa sekä selvittämään tietyn prosessin aiheuttamat muutokset kappaleen mitoissa. Opinnäytetyössä käytettiin GOM Inspect:in maksutonta versiota. Saatavilla on myös maksullinen versio GOM Inspect Professional, jossa on ilmaisversiota enemmän ominaisuuksia.

Tarkoituksena oli mitata identtisillä arvoilla hitsattuja kappaleita. Näin olisi voitu varmistua mittaustuloksista. Tämä ei kuitenkaan toteutunut. Muutettavien hitsausarvojen ja poltinkulman muutos synnytti hajontaa saatuihin mittaustuloksiin. Suunnitelmana oli, että hitsausarvot olisi haettu suhteellisen nopeasti. Suunnitelma ei toteutunut, sillä hitsatun kappaleen hitsausarvojen haku vei luultua enemmän aikaa.

Hitsausarvojen muutos vaikuttaa oleellisesti kappaleeseen tuotavan lämmön määrään. Mitä enemmän kappaleeseen tuodaan lämpöä, sitä enemmän kappaleessa tapahtuu muodonmuutoksia. Tarkoituksena oli skannata identtisillä hitsausarvoilla hitsattuja kappaleita. Tämä ei kuitenkaan toteutunut hitsausarvojen etsinnän vaikeuden vuoksi. Opinnäytetyössä tarkasteltavat skannaukset ja niiden tulokset ovat peräisin harjoituskannauksista.

Mittauksia tutkittaessa tehtiin GOM Inspectillä kappaleen keskiosaan sekä korvakkeiden molemmin puolin taso. Tuloksia tarkastellessa on huomioitava kulman sijainti. Taso muodostettiin kappaleen keskelle, koska se on kappaleen vakain ja skannauksen kannalta tasaisin kohta, josta robottitarttujan on mahdollista pitää kiinni. Mittauksissa näkyvän maadoituskaapelin vasemmalla puolella on korvake yksi.



Kuva 18. Kuvassa näkyy hitsauksen jälkeinen mittaus numero kuusi

GOM:in avulla saaduista mittaustuloksista määritettiin tasojen keskiarvot. Mittaustuloksista ilmeni korvakkeiden kulmiin tapahtuvan muutoksen olevan pientä, joten kappale mitattiin vielä digitaalisella kulmamitalla, jotta skannausten todenmukaisuudesta varmistuttaisiin.

Kulmat tarkistettiin digitaalisella kulmamittaimella, jonka tarkkuus on $\pm 0,2$ astetta. Skannauksista saadut mittaustulokset asettuivat kulmamittaimen mittatoleranssin sisään.



Kuva 19. Kuvassa mitattu digitaalisella kulmamitalla mittaus kappaleesta kuusi

4.5 Tulokset

Korvakkeiden mittaustulokset taulukoitiin seuraavasti:

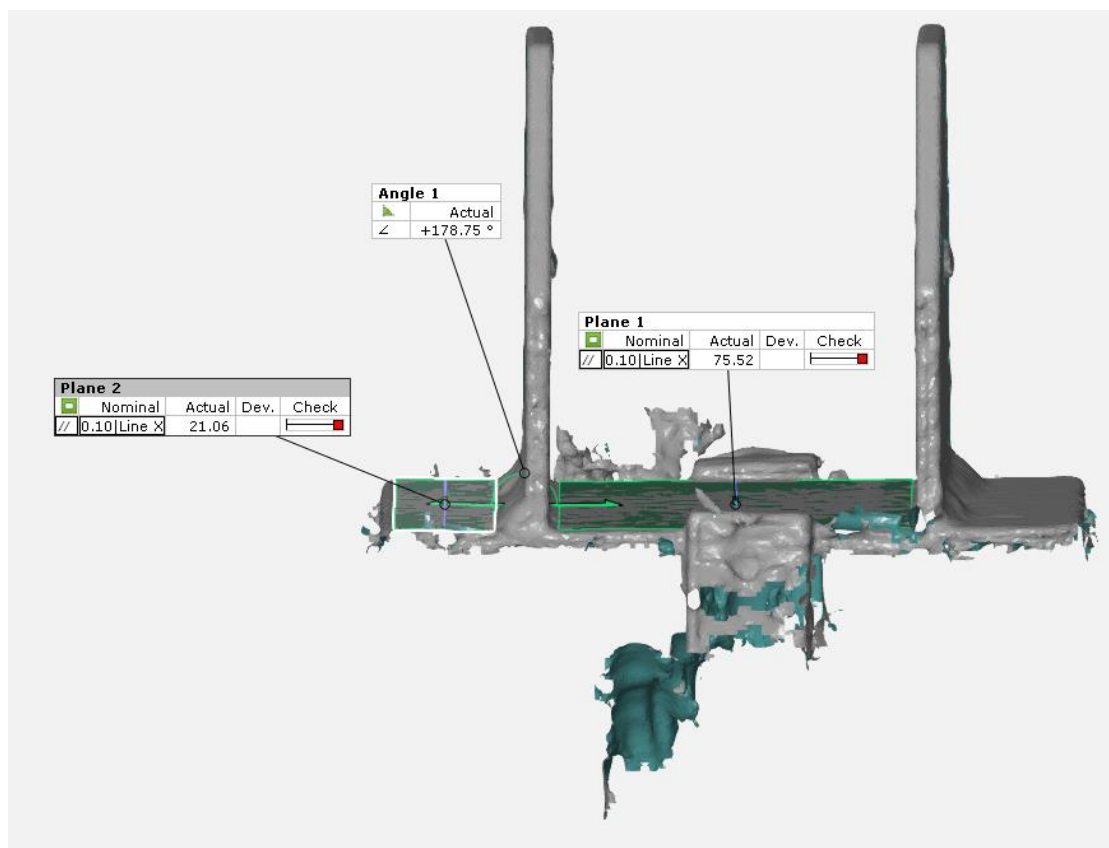
Mittaus	Kulma ennen hitsausta		Kulma hitsauksen jälkeen		Kulman kasvu	
1	K1: 89,94°	K2: 88,53°	K1: 90,3 °	K2: 88,80°	K1: 0,36°	K2: 0,27°
2	K1: 89,71 °	K2: 88,51°	K1: 90 °	K2: 88,86°	K1: 0,29 °	K2: 0,35°
3	K1: 89,79 °	K2: 88,28°	K1: 90,1°	K2: 88,7°	K1: 0,31°	K2: 0,42°
4	K1: 89,79 °	K2: 89,63°	K1: 89,21°	K2: 89,93°	K1: 0,4°	K2: 0,3°
5	K1: 88,85 °	K2: 89,69°	K1: 89,31°	K2: 90,21°	K1: 0,46°	K2: 0,51°
6	K1: 89,49°	K2: 89,80°	K1: 89,91°	K2: 90,12°	K1: 0,42°	K2: 0,33°
7	K1: 89,64°	K2: 89,61°	K1: 89,87 °	K2: 89,53°	K1: 0,24°	K2: 0,01°

Taulukko 3 Korvakkeiden mittaustuloksia

Mittauksia tehtiin yhteensä seitsemän. Taulukossa 3 K1 tarkoittaa korvaketta yksi ja K2 korvaketta kaksi.

Mittaustuloksista voidaan päätellä kappaleen korvakkeiden pysyvän miltei 90 asteen kulmassa kappaleen pohjaan nähden. Näin voidaan todeta hitsauksesta aiheutuvan muodonmuutosten syntyvän muualle kappaleeseen. Mittauksissa korvakkeiden keskimääräinen kulmanmuutos on 0,3 astetta molemmissa korvakkeissa.

Kappaletta silmin tarkasteltaessa huomattiin kappaleen pohjalevyn reunoilla muodonmuutosta, joten myös kappaleen reunoihin syntyvä kulmanmuutosta mitattiin. Alla olevassa taulukossa on esitettynä monta astetta kappaleen reuna on lähtenyt kääntymään ylöspäin missäkin kappaleessa. Reunat ovat nimetty niin että K1 on korvake yhden viereinen reuna.



Kuva 20. Mallin reunan mittausta

Reunan mittauksessa muodostin reunalle (kuvassa 19 Plane 2) sekä kappaleen (kuvassa 19 Plane1) keskiosalle tasot. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty kulman poikkeama 180 asteesta.

Taulukko 4. Reunan taipumisen mittauksia

Mittaus	K1	K2
1	1,13°	1,44°
2	1,41°	1,74°
3	1,45°	1,82°
4	1,25°	1,39°
5	1,31°	1,37°
6	0,88°	1,48°
7	0,91°	1,29°

Kaikki taulukossa 4 olevat poikkeamat olivat korvakkeiden suuntaan eli ylöspäin.

Kappaleen reunan mittaus todisti, että muodonmuutos syntyy enemmän kappaleen reunaan eikä sen korvakkeisiin. Suurin vaikutus on sillä, että kappale on ilman kiinnikkeitä. Tämä mahdollistaa muodonmuutosten kappaleeseen vapaasti.

Artec Eva:n skannauksien tutkiminen onnistui GOM Inspectillä helposti, vaikka skannatun kappaleen pinta oli paikoin epätasainen. Kaikki skannauksissa havaitut kulmien muutokset olivat samansuuntaisia eli skannauksien mittaustulokset olivat yhdenmukaisia.

Koska hitsausarvojen hakeminen vei odotettua enemmän aikaa, ei identtisillä hitsausarvoilla hitsattuja kappaleita kyetty skannaamaan. Näin ollen ei pystytty selvittämään onko hitsauksesta johtuva korvakkeen kulman muutos mahdollista ottaa huomioon ennakkoon.

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, että pystytäänkö 3D-skannerilla kuvatun kappaleen mallista mittaamaan hitsauskiinnikkeettömästi hitsattujen korvakkeiden kulmaa kappaleen ollessa kiinnitettynä kappaletta käsittelevään robottiin skannauksen aikana. Tarkastelun kohteena oli, että muuttuuko korvakkeiden kulma hitsauksen vuoksi ja mikäli muuttuu, niin kuinka paljon. Kun muuttuva kulma on saatu selville, pyritään ottamaan muutoksen muutos huomioon silloitushitsauksessa, jotta hitsauksen jälkeen korvakkeiden ja kappaleen pohjan välinen kulma olisi haluttu 90 astetta.

Harjoitusskannausten perusteella kappaleeseen syntyy muodonmuutoksia hitsauksesta. Suurimmat muodonmuutokset, noin 1—2 asteen verran, tapahtuvat kappaleen reunoilla. Korvakkeiden muodonmuutos on taas huomattavasti pienempi, vain noin 0,3 asteen verran. Mittaustarkkuuden parantamiseksi tulisi valita skanneri, joka tukee paremmin liikkuvan kappaleen skannausta. Tällä hetkellä tiedossa olevien mittaustulosten perusteella ei voida sanoa mikä on mittaustuloksissa esiintyvää vaihtelua ja mikä hitsausarvoista johtuvaa muutosta.

Hitsauksesta syntyvä kulmanmuutoksen seuranta olisi helpompaa, jos kappaleen pohja olisi jäykkä. Näin muodonmuutokset syntyisivät ensisijaisesti korvakkeisiin. Toisin sanoen olisi parempi, mikäli kappale olisi tuettu pohjasta niin, ettei siihen syntyisi muodonmuutoksia. Tämä tosin saattaa jättää kappaleeseen jäännösjännityksiä. Toinen korjaustoimi olisi, että kappaleen pohjalevy olisi ainevahvuudeltaan paksumpaa levyä. Opinnäytetyössä tarkastellun levyn paksuus on 5 mm. Paksummalla pohjalevyllä saataisiin pohja pysymään suorassa ja muodonmuutokset kohdistettua korvakkeisiin. Näin olisi myös helpompi kompensoida hitsauksessa muuttuva kulma.

LÄHTEET

- 3D Systems, Laser Triangulation 3D Scanners Viitattu 29.5.2019 <https://www.3dsystems.com/3d-scanner/scanner-guide>
- Artec. Artec Eva – Fast 3D scanner for professionals. Viitattu 29.5.2019 <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva>.
- Artec. Professional 3D scanning solutions 2018. Viitattu 29.5.2019 <https://www.artec3d.com/files/pdf/ArtecScanners-Booklet-EURO.pdf>
- Boehler,W; Marbs. 2002. A 3D SCANNING INSTRUMENTS Viitattu 29.5.2019 https://i3mainz.hs-mainz.de/sites/default/files/public/data/p05_Boehler.pdf
- Ebrahim, M. 2015. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. Volume 4, Issue 10. Viitattu 31.5.2019 <https://pdfs.semanticscholar.org/1565/dbd5fae9b785989a41d849248f3500c83628.pdf>
- Eskelinen, M; Tirmonen, V & Rossi, T. 2017. Konenäkö ja kuva-analyysi. Viitattu 29.5.2019 <http://users.jyu.fi/~amjaye/TIES411/ties411-luentomoniste.pdf>
- Ganapathi, V; Plagemann, C; Koller, D & Thrun,S. Real Time Motion Capture Using a Single Time-Of-Flight Camera. Viitattu 29.5.2019 <http://www.robotics.stanford.edu/~koller/Papers/Ganapathi+al:CVPR10.pdf>
- Hagren, H. 2005. Luento 7: Fotogrammetrinen mittausprosessi Viitattu 3.10.2019 <https://foto.aalto.fi/opetus/300/luennot/7/7.html>
- Halinen, M. 2007. Konenäkö robotin ohjauksessa. Aalto-yliopisto. Viitattu 29.5.2019 http://automation.tkk.fi/attach/AS-0-2230/lab3c_teorja.pdf
- Karpinsky. N & Zhang,S. 2010. High-resolution, real-time 3D imaging with fringe analysis Viitattu 8.3.2019 https://www.researchgate.net/publication/225388275_High-resolution_real-time_3D_imaging_with_fringe_analysis
- Kesseli, A. 2006 3D-Digitointi, Opinnäytetyö. Mediatekniikan koulutusohjelma. Lahden ammattikorkeakoulu. Viitattu 29.5.2019 <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/11532/2006-08-17-23.pdf>

Leino, M. Syksy 2018. Konenäkö- ja sensoritekniikka. Johdanto konenäköön -luentokalvot. Turun ammattikorkeakoulu.

Luhmann, T; Robson, S; Kyle, S & Harley, I. 2006 Close Range Photogrammetry Viitattu 8.3.2019 <http://www.tiespl.com/sites/default/files/pdfbook/Full%20page%20Html%20interface/pdf/Photogrammetry.pdf>

Mattson, T. 2015. Konenäkö- ja sensoritekniikka. Konenäön perustekniikat -luentokalvot. Turun ammattikorkeakoulu.

Rensi. Axiom too -koordinaattimittauskone. Viitattu 29.5.2019 <https://www.rensi.fi/tuotteet/mittauskoneet/aberlink/axiom-too-koordinaattimittauskone/>

Titako. 2006. 3D digitointi skannaamalla. Viitattu 29.5.2019 https://titako.fi/Titako_2006/Tuotteet/Scanning/Scanning.htm#3D_skannaus

Trusted reviews. 2019. What is a ToF camera? Understanding the P30 Pro's 3D camera trick <https://www.trustedreviews.com/news/what-is-a-tof-camera-3690164>

Ukiva. Vision Techniques. Viitattu 6.3.2019 <https://www.ppma.co.uk/ukiva/industrial-vision/vision-techniques.html>

Vinni, P. 2003. Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa – Mitä on fotogrammetria? Viitattu 29.5.2019 <http://www.kotikone.fi/faryan/Teksteja/JatkokurssiB.htm>

Wu, J-H; Chang, R-S & Jiang J-A. 2007. Novel Pulse Measurement System by Using Laser Triangulation and a CMOS Image Sensor Viitattu 29.5.2019 <https://www.mdpi.com/1424-8220/7/12/3366/htm>