

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

2019

Ville Kuusela

3D-SKANNAUS JA SEN HYÖDYNTÄMINEN 3D- SUUNNITTELUSSA

Ville Kuusela

3D-SKANNAUS JA SEN HYÖDYNTÄMINEN 3D-SUUNNITTELUSSA

[Click here to enter text.](#)

Opinnäytteen toimeksiantajana toimi Leanmec Oy, jonka mielenkiinto oli herännyt 3D-skannaamiseen. 3D-skannausta hyödynnettäisiin erilaisten kappaleiden takaisinmallinnuksessa ja ympäristön tilaskannaamisessa. Tämän pohjalta lähdettiin tutkimaan 3D-skannauksen menetelmiä nykyhetkellä. Menetelmät jaettiin koskettaviin ja ei koskettaviin mittaustavan mukaan. Tämä opinnäytetyö antaa kiinnostuneille hyvän tietopohjan 3D-skannauksen menetelmistä ja sen käyttökohteista. Näistä eri menetelmistä keskityttiin niihin, joita konetekniikan ja teollisuuden aloilla käytetään.

Työssä selvitettiin, miten skannausdatasta muodostuu 3D-malli. Turun ammattikorkeakoulun Artec Eva -3D-skannerilla suoritettiin erilaisia koeskannauksia, jonka jälkeen skannausdata käsiteltiin ja rekonstruoiitiin pistepilveksi, 3D-malliksi. Tulosten perusteella pohdittiin, millaiset asiat vaikuttavat heikentävästi skannauksen laatuun ja miten ehkäistä niitä.

Laitevertailun lähtökohtina olivat tiedot erilaisista menetelmistä, niiden käyttökohteista ja Artec Evan koeskannaukset. Koeskannausten perusteella nähtiin, millaiseen lopputulokseen päästään laitteen käyttämällä menetelmällä ja teknisillä ominaisuuksilla. Vertailuun valikoitiin kaksi käyttökohteeseen sopivaa menetelmää, strukturoitu valo ja kolmiomittaus. Vertailua varten luotiin matemaattinen malli, jolla voitiin verrata eri menetelmillä toimivia laitteita keskenään. Työssä käsiteltiin laitehankinnan lisäksi 3D-skannaamisen hyödynnettävyyttä ja muita mahdollisia aiheutuvia lisäkustannuksia ja investointeja yrityksen näkökulmasta.

ASIASANAT:

3D-skannaus, 3D-malli, takaisinmallinnus, strukturoitu valo, kolmiomittaus, tietokonetomografia, pistepilvi

BACHELOR'S | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical Engineering

2019 | 47 pages

Ville Kuusela

3D SCANNING AND ITS UTILIZATION IN 3D MODELING

[Click here to enter text.](#)

This thesis was commissioned by Leanmec Oy, which showed an interest towards 3D scanning. 3D scanning would be utilized in reverse engineering with different kind of parts and scanning of the environment. Based on this, the research was started by studying the current methods of 3D scanning. The methods were divided into contact and non-contact according to the measuring method. This thesis provides good basic knowledge of the methods and its applications for those who are interested. The methods that are used in the field of mechanical engineering and industry have been studied more profoundly.

In this thesis the creation of a 3D model from scanning data was studied. Turku University of Applied Sciences' Artec Eva 3D scanner was used for making different examples, which was followed by editing and reconstructing them into a point cloud 3D model. Using these results the factors that affect entreating of the quality of the scans and how to decrease them were considered.

The starting points for the device comparison were information about the different methods, their applications and the test scanning of Artec Eva. Based on the test scanning, it was possible to see what kind of result would be achieved with the method used by the device and its technical properties. Two methods suitable for the application, a structured light and triangulation, were selected for the comparison. For the comparison, a mathematical model was created to compare devices operating with different methods. In addition to the device acquisition, the usefulness of the 3D scanning and other possibly caused extra costs and investments were examined from the point of view of the company.

KEYWORDS:

3D scanning, 3D model, reverse engineering, structured light, triangulation, computed tomography, point cloud

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Tavoitteet	8
1.2 Toimeksiantaja	8
2 3D-SKANNAUKSEN MENETELMÄT	10
2.1 Koskettavat	10
2.2 Ei-koskettavat	12
2.2.1 Aktiivinen	13
2.2.2 Passiivinen	19
3 3D-MALLIN REKONSTRUKTIO	21
3.1 Pistepilvi	22
3.2 3D-mallin luonti	23
4 3D-SKANNAAMINEN	25
4.1 Artec Eva	25
4.2 Skannauskohteet	26
4.3 Skannauksen suoritus	27
4.4 Tulokset	31
5 SKANNEREIDEN VERTAILU	33
5.1 Tekniset ominaisuudet	33
5.2 Laitteiden tarkkuus ja hinnat	34
5.3 Ominaisuuksien vertailu ja laitteen valinta	37
5.3.1 Tapaus 1	39
5.3.2 Tapaus 2	40
5.4 Muuttuvat lisäkustannukset	41
6 TULOKSET	43
LÄHTEET	45

KAAVAT

Kaava 1. ISO 10360. T-SCAN 20.	34
Kaava 2. EinScan-Pro 2X Plus.	34

KUVAT

Kuva 1. Siltatyypinen koordinaattimittauskone (Hexagon 2019).	11
Kuva 2. Mittavarsilaitteisto (Ritmindustry 2019).	12
Kuva 3. Time-of-flight-menetelmä (Automationworld 2019).	13
Kuva 4. Vaihe-erolaser (Mymechatronics 2019).	14
Kuva 5. Kolmiomittauksen periaatetta havainnollistava kuva (NeoMetrix Technologies, Inc. 2019).	15
Kuva 6. Konoskooppisen holografian periaatetta havainnollistava kuva (Optimet 2019).	16
Kuva 7. Strukturoitua valoa, jonka muoto muuttuu kappaleen muodon mukaan (Scanner reviews 2019).	17
Kuva 8. Moduloitu valoa (Isinstruments 2019).	18
Kuva 9. Tietokonetomografia (Xviewct 2019).	19
Kuva 10. 3D-skannaamisen prosessikaavio (Laserdesign 2019).	21
Kuva 11. Kappaleesta muodostettu pistepilvi (Europac3d 2019).	22
Kuva 12. Kolmioverkon mallinen mesh-verkko. (Europac3d 2019).	23
Kuva 13. Parametrinen malli (Europac3d 2019).	24
Kuva 14. Artec Eva (Artec 3D 2019).	25
Kuva 15. Kaukosäädin pöydällä skannattavana.	26
Kuva 16. 3D-tulostettu kappale.	26
Kuva 17. Teräksinen rakenne.	27
Kuva 18. Skannatun kappaleen 3D-malli tarkastelussa SolidWorks-käyttöliittymässä.	28
Kuva 19. 3D-skannattu kaukosäädin.	29
Kuva 20. Toimistosermin pääty.	30
Kuva 21. Kohinasta aiheutuvaa pinnan epävääristymistä.	30
Kuva 22. Paikoituksen katoamisesta aiheutuva muotojen monistaminen.	31
Kuva 23. Resoluution ja tarkkuuden vaikutus yhdessä skannatun kappaleen lopputulokseen (Formlabs 2019).	33
Kuva 24. Vertailu tarkkuuden ja resoluution perusteella.	39
Kuva 25. Vertailu tarkkuuden, resoluution ja hinnan mukaan.	40
Kuva 26. 3D-skannauksen jälkikäsittelyn vaikutus hintaan (NeoMek 2019).	42

KUVIOT

Kuvio 1. Strukturoidulla valolla toimivia laitteita.	36
Kuvio 2. Kolmiomittauksella toimivia laitteita.	36
Kuvio 3. Muilla menetelmillä toimivia laitteita.	37

TAULUKOT

Taulukko 1. Laitteiden keskiarviollisia tarkkuuksia ja hintoja eri menetelmien perusteella.

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

Lyhenne	Lyhenteen selitys
STL	Stereolitografia. Yleisin 3D-skannaamisessa käytetty tiedoston tallennusmuoto.
CAD	Computer-aided design. Tietokoneavusteista suunnittelua ohjelmistolla.
IT-taidot	Informaatioteknologia-aidot. Yleinen tietojenkäsittelytaito.

1 JOHDANTO

1.1 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä 3D-skannaukseen ja sen hyödyntämiseen 3D-suunnittelussa. Työssä hyödynnetään Turun ammattikorkeakoulun Artec Eva-käsiskanneria. Skannatut kappaleet, joita esitellään tässä työssä ovat jälkikäsiteltyjä Artec Eva Studio 13 Professional -ohjelmistolla.

Opinnäytteen tilaajana toimiva yritys tarvittaessa uudelleen dokumentoi ja mallintaa asiakkailleen jo valmiiksi tehtyjä tai uudelleen tuotantoon tulevia tuotteita varsinaisten suunnittelupalveluiden lisäksi. Tämän pohjalta yritykseltä on herännyt kiinnostus hankkia oma 3D-skanneri asiakkaiden tarpeisiin Reverse Engineering -palveluiden tueksi.

Työssä on käsitelty 3D-skannauksen teoriaa, mihin skannaus perustuu ja miten eri skannausmenetelmät eroavat toisistaan. Näiden tietojen perusteella pyritään selvittämään tämän hetkinen 3D-skannerien tarjonta markkinoilla, miten niiden ominaisuudet vaikuttavat hintaan ja spesifioida paras laite tietyn käyttökohteen mukaan. Laitevertailun lähtökohdina tutustutaan markkinoilla oleviin skannereihin ja kerätään kattava selvitys teknisistä tiedoista sekä hinnoista. Vertailun avuksi tehdään matemaattinen malli. Käyttökohteen soveltuvista laitteista valitaan sopiva laite mallia hyödyntäen.

Artec Eva -laitteella skannataan erilaisia kohteita ja tarkastellaan, miten tekniset ominaisuudet vaikuttavat skannaustulokseen. Työssä selvitetään syitä, jotka mahdollisesti vaikuttavat heikentävästi skannausprosessissa 3D-mallin lopputulokseen, ja keinoja ehkäistä heikentäviä vaikutuksia, kuten ylimääräisen valon heijastuminen ja paikoituksen häviäminen.

1.2 Toimeksiantaja

Työn tilaaja on kaarinalainen Leanmec Oy. Leanmec Oy on vuonna 2016 perustettu tuotekehitys- ja mekaniikkasuunnittelua tekevä yritys. Yrityksellä on asiakkaita hyvin erilaisilta teollisuuden aloilta alkaen pienten muovisten kuluttajatuotteiden suunnittelusta raskaaseen teräsrakennesuunnitteluun. Asiakasyrityksen koko vaihtelee yhden henkilön yrityksistä kansainvälisiin suuryrityksiin.

Palveluita tarjotaan asiakkaiden tarpeiden mukaan, ja niitä ovat esimerkiksi konseptisuunnittelu, varsinainen mekaniikkasuunnittelu, työpiirustukset ja erilaisten protojen valmistus.

Vaikka Leanmec Oy on vielä yrityksenä nuori, kokenut henkilökunta ja hyvät asiakassuhteet ovat tuoneet yritykselle positiiviset tulevaisuuden näkymät. Näitä näkymiä halutaan vahvistaa palveluita kehittämällä, johon myös tämäkin opinnäytetyökin pyrkii. (Sähköpostiviesti Nikula, 12.5.2019.)

2 3D-SKANNAUKSEN MENETELMÄT

Alkuperäiset 3D-skannerit ovat 1980-luvulta, ja niiden käyttö perustui kappaleen eri pisteiden määrittämiseen fyysisen kosketuksen avulla. Menetelmän hitauden takia nykyaikaiset laitteet syrjäyttivät vanhojen skannereiden toimintaperiaatteen 1900-luvun lopulla. 3D-skannauksen ideana on luoda CAD-ohjelmistolla kolmiulotteinen malli. Malli muodostuu pistepilvien muodostamasta datasta, mesh-verkosta. (Chougule, Gosavi, Dharwadkar & Gaid 2018, 41.)

3D-skannausta hyödynnetään nykypäivänä monella eri alalla, kuten opetuksessa, lääketieteessä ja 3D-suunnittelussa. 3D-suunnittelussa sen avulla voidaan helposti skannata monimutkaisia pinnan muotoja. Skannauksesta on tullut hyödyllinen osa käänteisestä suunnittelusta tehdessä sen tuottaman ajan säästön ansiosta. (Javaid, Haleem & Kumar 2018, 1.)

3D-skannausta yhtenä tärkeimmistä eduista pidetään menetelmän hyödyntämistä Reverse engineering eli takaisinmallinnuksessa. Sen tarkoituksena on luoda kolmiulotteinen malli jo olemassa olevasta kappaleesta. Takaisinmallinnuksen ensimmäinen vaihe on luoda kappaleesta kolmiulotteinen CAD-malli, jonka keskeisiä asioita ovat sen alkuperäisen muodon ja mittojen säilyttäminen. (Gupta, R & Chaudhary H 2017, 1.)

Skannerit ovat nopeita ja helppokäyttöisiä käyttää. Yleisin 3D-skanneri koostuu kahdesta osasta, valon lähteestä sekä kamerasta. Valo heijastetaan skannattavan kappaleen pinnalle ja kameran tehtävänä on rekistroidä data talteen muodostaen kolmiulotteisen mallin. (Javaid, Haleem & Kumar 2018,1.)

Skannaustekniikat luokitellaan kahteen eri luokkaan; koskettaviin ja ei-koskettaviin (Chougule ym. 2018, 41). Ei-koskettavat luokitellaan edelleen niiden käyttämän mittausmekaniikan mukaan kahteen eri luokkaan; aktiiviseen ja passiiviseen. Aktiivisessa menetelmässä skannattava kappale valaistetaan erillisen valonlähteen avulla. Passiivisessa menetelmässä hyödynnetään kappaleen ympäristön valoa. (Pezzati & Fontana.)

2.1 Koskettavat

Koordinaattimittauskoneita (Coordinate measuring machine, CMM) käytetään monimutkaisia pinnanmuotoja omaavia kappaleita mitattaessa. Käyttö perustuu anturiin,

jolla fyysisesti kosketetaan kappaleen eri pisteitä. Menetelmän hyötyjä ovat tarkkatoleranssisten ja pienten kappaleiden mitoitus. (Vermeulen, Rosielle & Schellekens 1998, 447.)

Anturi toimii CMM -laitteiston mittatyökaluna. Yleinen käytettävä CMM -laitteisto on siltatyypinen (Kuva 1), jonka keskellä anturi liikkuu mekaanisesti x-, y- ja z-suuntaisesti. Anturia voidaan liikuttaa edellä mainittujen akselien suuntaisesti kuuteen eri kulmaan. Kun anturi koskettaa kappaleen pintaa, se tallentaa mitat koordinaattiakselistoon.



Kuva 1. Siltatyypinen koordinaattimittauskone (Hexagon 2019).

Laitteisto vaatii toimiakseen oikeanlaisen käyttöympäristön. Oikea ilmankosteus ja lämpötila on oltava säädeltävissä, ulkopuolisen värinän vaikutus laitteistoon ja mahdolliset kappaleeseen kohdistuvat voimat, jotka voivat siirtää kappaletta ja siten vaikuttaa tarkkuuteen, on poistettava.

Mittausvarsi-laitteisto (Kuva 2) perustuu samanlaiseen koordinaattiakseliston mitoitukseen kuin CMM -laitteisto. Mittausvarren anturin tilalla voidaan käyttää vaihtoehtoisesti laserskannaus -tekniikkaa. Laitteisto kiinnitetään mittauspöytään ja sitä liikutellaan manuaalisesti käden avulla.



Kuva 2. Mittavarsilaitteisto (Ritmindustry 2019).

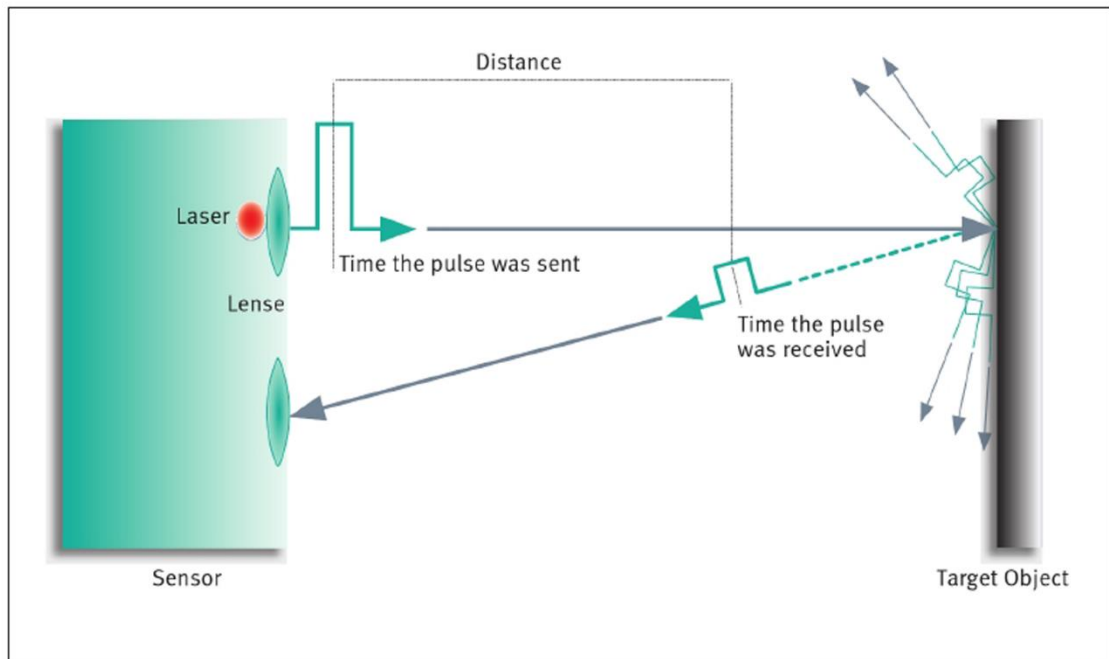
Hyötyjä verrattuna CMM -laitteistoon on sen liikutettavuus käyttöympäristöstä toiseen. Toisin kuin CMM -laitteisto, jolla voidaan skannata kappaleita pienistä suuriin, mittausvarrella skannaaminen onnistuu pienestä keskikokoiseen. Molemmat laitteistot soveltuvat kovien, kirkkaiden, läpinäkyvien ja tummien pintojen skannaamiseen. (Ems-Usa 2019.)

2.2 Ei-koskettavat

Ei-koskettavissa menetelmissä kappale skannataan erillisen valonlähteen, useimmiten valkoisen valon tai laserin avulla ilman erillistä kosketusta kappaleen pintaan. Toimenpiteenä se on nopea ja kustannustehokas eikä skannausta edeltäviä valmisteluita tarvita. (Crump 2007.) Ei-koskettavat menetelmät lajitellaan aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin.

2.2.1 Aktiivinen

Lentoaikaan perustuvien (Time-of-flight, TOF) skannereiden toiminta (Kuva 3) pohjautuu valon nopeuteen, joka tiedetään. Kappaleeseen kohdistetaan laservaloa, joka heijastuu kappaleesta takaisin, sensoriin. Valon kulkeman ajan perusteella lasketaan pisteen tarkka etäisyys. Laservaloa voidaan lähettää pulsseittain tai vaihe-erona.



Kuva 3. Time-of-flight-menetelmä (Automationworld 2019).

Mittauksen aikana laitetta liikutetaan tai käytetään erillisiä peilejä, joiden avulla kohde saadaan skannattua kolmiulotteisesti. (Ems-Usa 2019.) Pulssilaser-menetelmällä pystytään mittaamaan pisteitä sadoista tuhansiin ja vaihe-erolla jopa satoihin tuhansiin yhtä (1) sekuntia kohden (Higgins 2004). Käyttökohteita ovat isot skannattavat kohteet, kuten ajoneuvot, lentoalukset ja rakennukset.

Pulssilaser (Pulse-based) lähettää laser- tai infrapunavaloa pulsseittain kohteeseen, jonka pinnasta pulssit heijastuvat takaisin (Höglund & Large). Etäisyysalue mitattavasta kohteesta on metristä kilometriin (Ems-Usa 2019). Suurin ero pulssilaserin ja vaihe-erolaserin välillä ovat niiden tallennusalueen laajuus ja nopeus (Higgins 2004).

Pulssilaser menetelmän toiminta vaikuttaa sen nopeuteen. Jokaisen lähetetyn pulssin pitää palata takaisin laitteen detektoriin ennen kuin uusi pulssi voidaan lähettää matkaan,

jolloin kohteen etäisyyden kasvu vaikuttaa laskevasti saatujen signaalien määrään yhtä mitattavaa aikayksikköä kohden. (Higgins 2004.)

Vaihe-ero (Phase Shift) -laser lähettää jatkuvaa valoa, jonka aallonvoimakkuutta vaihdellaan, skannattavaan kohteeseen (Kuva 4). Valo heijastuu takaisin joko erillisestä prismasta tai kohteen pinnasta, johon säde on suunnattu. Etäisyys lasketaan lähetetyn ja vastaanotetun valon vaihe-erona. (Höglund & Large.) Mittaustulos on tarkempi kuin pulsilaserin, mutta sen käyttöetäisyys rajoittuu korkeintaan 300 metriin (Ems-Usa 2019). Etäisyyden noustessa laserin lähettämän signaalin aallonpituus kasvaa vaikuttaen heikentävästi mittaustuloksen tarkkuuteen (Higgins 2004).

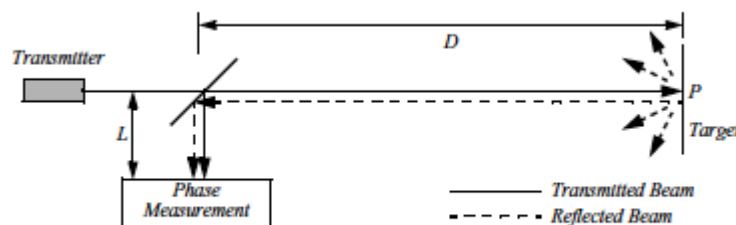


Figure 4.9
Schematic of laser rangefinding by phase-shift measurement.

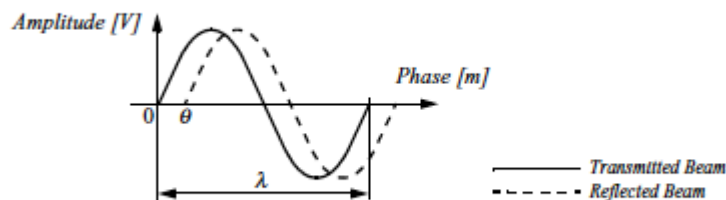
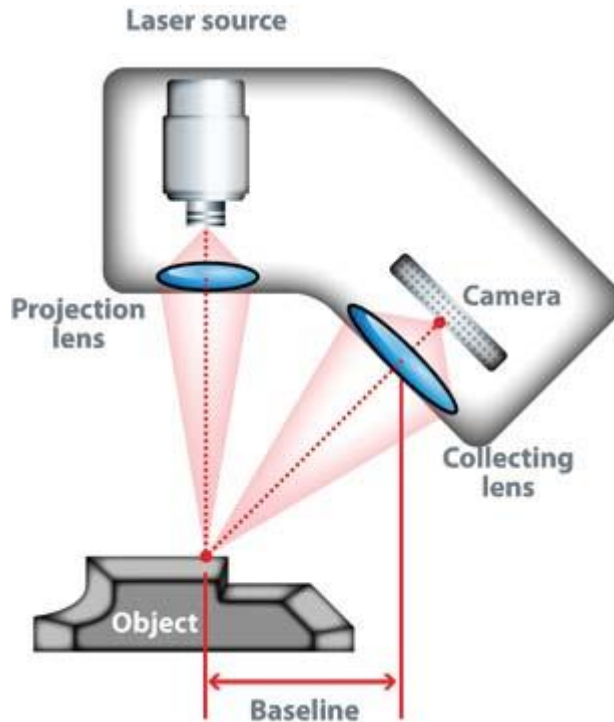


Figure 4.10
Range estimation by measuring the phase shift between transmitted and received signals.

Kuva 4. Vaihe-erolaser (Mymechatronics 2019).

Kolmiomittauksessa (Triangulation) (Kuva 5) lähetetään projektorin kautta lasersäde, joka heijastuu takaisin kameran sensoriin mitattavan kohteen pinnasta. Mitattavan pisteen kolmiulotteinen etäisyys lasketaan trigonometrian avulla, kun tunnetaan laservalolähteen ja kameran välinen etäisyys toisistaan (baseline) sekä lasersäteen ja baselinen välinen kulma. (Peivari & Taabbodi 2010.)



Kuva 5. Kolmiomittauksen periaatetta havainnollistava kuva (NeoMetrix Technologies, Inc. 2019).

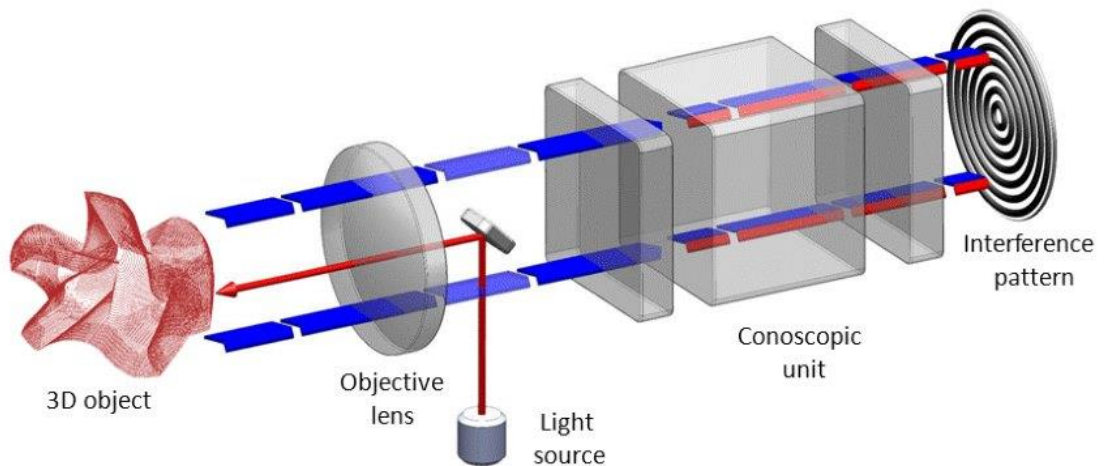
Kamerassa sijaitsevan linssin koolla pystytään vaikuttamaan skannattavan alueen laajuuteen, mittauspisteiden tiheyteen ja tarkkuuteen (Mendricky 2016). Skannauslaite on nopea ja edullinen sekä tarkkuudeltaan hyvä keskikokoisia kappaleita skannattaessa. Skannattavan kohteen etäisyys rajoittuu muutamaan metriin.

Kiiltävät pinnat, joista heijastuu paljon valoa, vaikuttavat heikentävästi skannaustuloksen laatuun. Tämä voidaan välttää maalaamalla kappale mattapintaiseksi. (3Dnatives 2017.)

Konoskooppisessa holografiassa (Conoscopic Holography) (Kuva 6) etäisyys mitataan sensorin ja mitattavan kohteen välillä laservaloa hyödyntäen. Toisin kuin muissa menetelmissä konoskooppinen holografia mahdollistaa laservalon takaisintulemisen samaa reittiä pitkin, josta se on lähtenyt. (Optimet 2019.)

Inkoherentti laservalo kohdistetaan mitattavan kohteen pintaan, josta se heijastuu takaisin polarisaattorin lävitse yksiaksaaliseen kristalliin (Alvarez, Enguita, Frade, Marina & Ojea 2009). Kristallista läpi kulkeutunut valo etenee vielä kerran polarisaattorin lävitse ja diffraktoituu kuvioksi tunnistimeen. Kuvion reunojen taajuus riippuu mitatun kohteen ja sensorin välisestä etäisyydestä. (Optimet 2019.)

Käyttökohteita ovat erilaiset aukot ja reiät tai tarkkuutta vaativat kohteet (Alvarez ym. 2009).

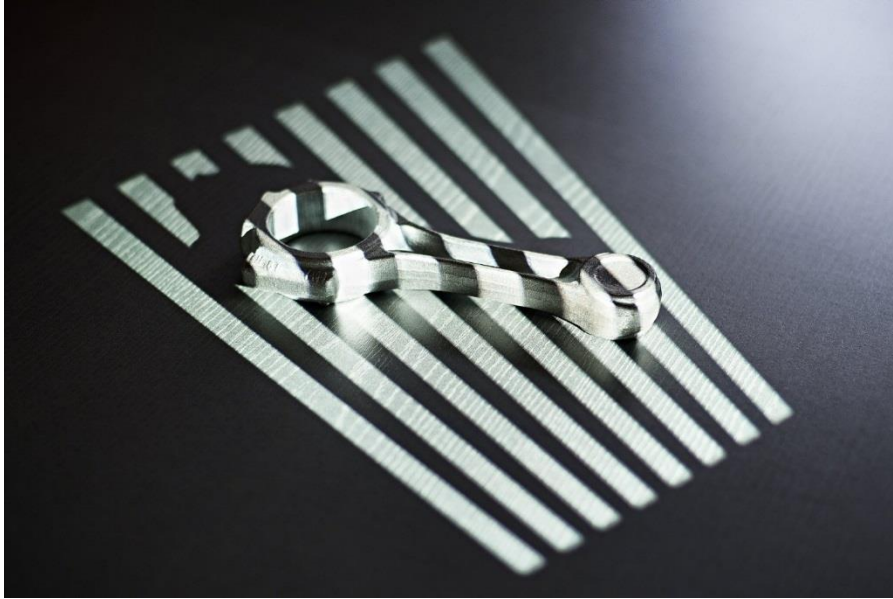


Kuva 6. Konoskooppisen holografian periaatetta havainnollistava kuva (Optimet 2019).

Strukturoituun valoon (Structured Light) perustuva skanneri projisoi valokuvion kohteen pinnalle ja havaitsee syntyneen kuvion muodonmuutoksen. Valokuvio voi olla yksi- tai kaksiulotteinen. Yksiulotteisesta kuviosta esimerkkinä on viiva, joka heijastetaan kohteeseen erillisellä projektorilla tai laserilla.

Kamera, joka on määritetty sivuun projektorista, tallentaa viivan tiedot tietyssä kulmassa ja laskee viivan jokaisen pisteen etäisyyden samalla periaatteella kuin kolmiomittauksessa. Yksiulotteista valokuviota käytettäessä viiva pyyhkäisee skannattavan alueen yksi viiva kerrallaan, kunnes koko kohde on skannattu.

Kaksiulotteinen valokuvio heijastetaan ruudukkona tai peräkkäisinä viivoina (Kuva 7). Kamera tallentaa kuvion epämuodostuman ja monimutkainen algoritmi laskee jokaisen pisteen etäisyyden.

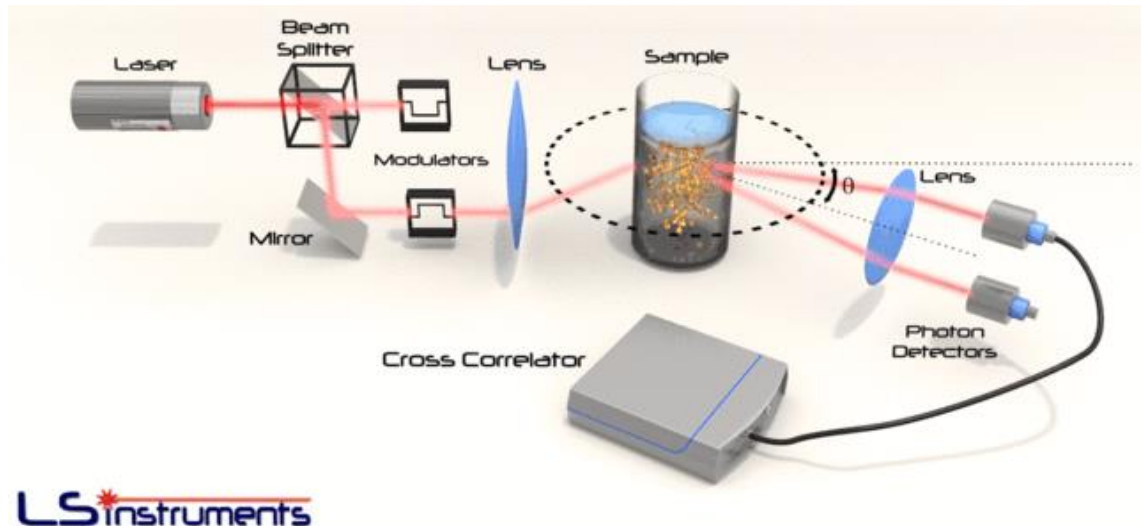


Kuva 7. Strukturoitua valoa, jonka muoto muuttuu kappaleen muodon mukaan (Scanner reviews 2019).

Strukturoituun valoon perustuvien skannereiden yksi vahvuuksista on skannausprosessin nopeus. Sen sijaan, että skannattaisiin yksi piste kerrallaan, toimintatapa mahdollistaa usean pisteen tai kokonaisen näkökentän skannaamisen reaaliajassa yhdellä kerralla. Skannausetäisyys on muutamasta senttimetristä metreihin riippuen laitteessa käytetyistä komponenteista ja laitteen kalibroinnin tarkkuudesta.

Skannauksen laadun vaikuttavin tekijä on skannattavasta kappaleesta heijastuva valo, jota määrittää kappaleen pinnan materiaali. Valoa paljon heijastavat pinnat aiheuttavat ongelmia tulosten tarkkuudessa. Materiaalit, jotka heijastavat vain vähän, valoa, antavat parhaimman mittaustuloksen. Liika heijastuminen voidaan välttää käyttämällä polarisoivia suodattamia projektorissa sekä kameroiden linseissä. (Georgopoulos, Ioannidis & Valanis 2010.)

Moduloidulla valolla (Modulated Light) (Kuva 8) toimivalla skannerilla valaistaan kohde jatkuvasti muuttuvalla valolla, jossa valon lähde toistaa tietyllä amplitudilla sinimuotoista aallonpituutta. Tällä mahdollistetaan ulkopuolisten valonlähteiden heijastumisesta aiheutuvat haitat. Kamerassa oleva tunnistin tunnistaa kohteesta heijastuneen valon ja määrittää etäisyyden valon kulkeman matkan perusteella. (Instrumentic 2019.)



Kuva 8. Moduloitu valoa (Lsinstruments 2019).

Tilavuuteen perustuvat (Volumetric Techniques) mittaustekniikat jaetaan kahteen eri luokkaan, lääketieteessä ja teollisuudessa käytettävien laitteiden mukaan.

Tietokonetomografia (Computed tomography) on lääketieteessä röntgensäteilyyn perustuva kuvantamismenetelmä, viipalekuvaus. Laite koostuu ”kanturista”, jonne kuvauskohde eli potilas sijoitetaan kuvauksen ajaksi. Kanturissa on TT-laitteen röntgensäteilyä tuottava putki ja säteilyä vastaanottavat säteilydetektorit.

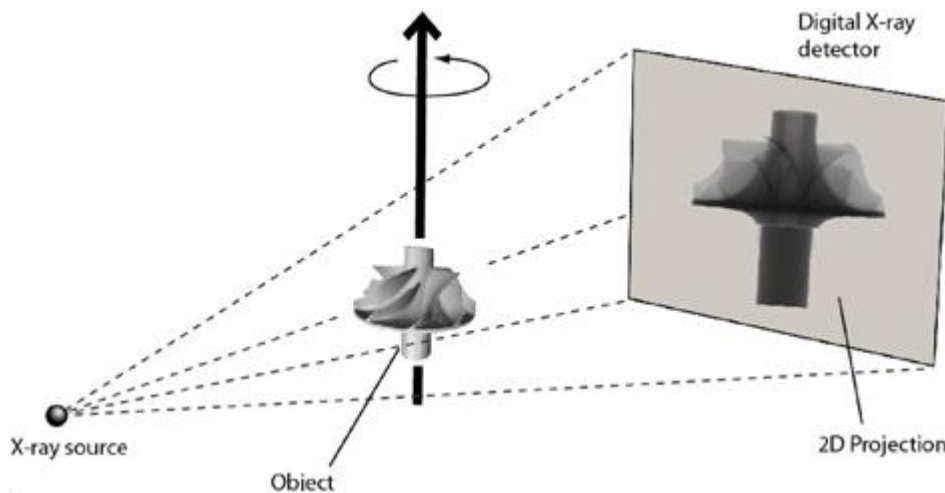
Kuvausmenetelmä tomografian tarkoituksena on kuvantaa tarkasti kerros tietyltä syvyydeltä, tyypillisesti 1–10 millimetrin suuruusluokan paksuudesta. Kuvauksen aikana röntgensäteilyn vaimeneminen mitataan ohuessa, potilaan pituussuuntaan nähden poikittaisessa tasossa. Röntgenputkesta lähtevä säteily läpäisee kuvauskohteen, potilaan vaimentuen. Potilaan toisella puolella oleva kuvareseptori havaitsee läpi tulleen säteilyn intensiteetin muutoksen muuntaen sen näkyväksi kuvaksi monitorille.

Leikkeen kuva, joka on poikittaissuuntainen viipale, lasketaan saaduista mittaustuloksista tietokoneavusteisesti. Eri suunnilta otetuista kuvasarjoista kohteesta voidaan rekonstruoida eri tasojen leikekuvia tai kolmiulotteinen kuva.

Etuna tavalliseen röntgenkuvaukseen verrattuna on kyky erottaa pienet ja erilaisten kudosten aiheuttamat säteilyn vaimennuserot. Tavallisessa röntgenkuvassa potilaan eri syvyyksillä olevat rakenteet kuvautuvat päällekkäin mahdollisesti vaikeuttaen kuvan tulkitsemista. Tomografian avulla voidaan kuvantaa tarkasti potilaasta tietyltä syvyydeltä otettu kerros. Kuvantamisen aikana röntgenputkea ja kuvareseptoria liikutetaan vastakkaisiin

suuntiin toisiansa nähden tietyn pisteen ympäri. Tomografian tarkkuuden ansiosta muilla syvyyksillä olevat yksityiskohdat kuvautuvat epäterävinä tai poistuvat näkymättömiin. (Tapiovaara, Pukkila & Miettinen 2004.)

Tietokonetomografiaa hyödynnetään teollisuudessa. Kolmiulotteinen kuva muodostetaan kohteesta viipalekuva kerrallaan liikuttaen mitattavaa kohdetta laitteen röntgensäteessä (Kuva 9). Pistepilvi, jonka avulla muodostetaan kolmiulotteinen CAD-malli, saadaan viipalekuvista tietokoneavusteisena matemaattisia algoritmeja hyödyntäen. (Hoffmann, Flisch & Obrist 2003.)



Kuva 9. Tietokonetomografia (Xviewct 2019).

Käyttökohteita teollisuudessa ovat mm. laaduntarkistus, erilaisten vikojen analysointi, geometrinen muotojen määrittäminen, mitoitus ja kolmiulotteisen mallin luonti (Flisch, Wirth, Zanini, Breitenstein, Rudin, Wendt, Mnich & Golz 1999).

2.2.2 Passiivinen

Stereoskooppisessa menetelmässä (Stereoscopic Systems) käytetään kahta kameraa, jotka asetellaan toisistaan eri kulmiin. Kuvatun kohteen kuvien analysoinnin avulla saadaan määritettyä kohteen pisteiden etäisyydet eri kohdissa kuvaa.

Fotometrisessä menetelmässä (Photometric Systems) kohde kuvataan tietystä kulmasta usealla eri valaistuksella kamerasen avulla. Kohteen pinnan pisteiden etäisyydet saadaan määritettyä valon heijastumisen perusteella. (Globalspec 2019.)

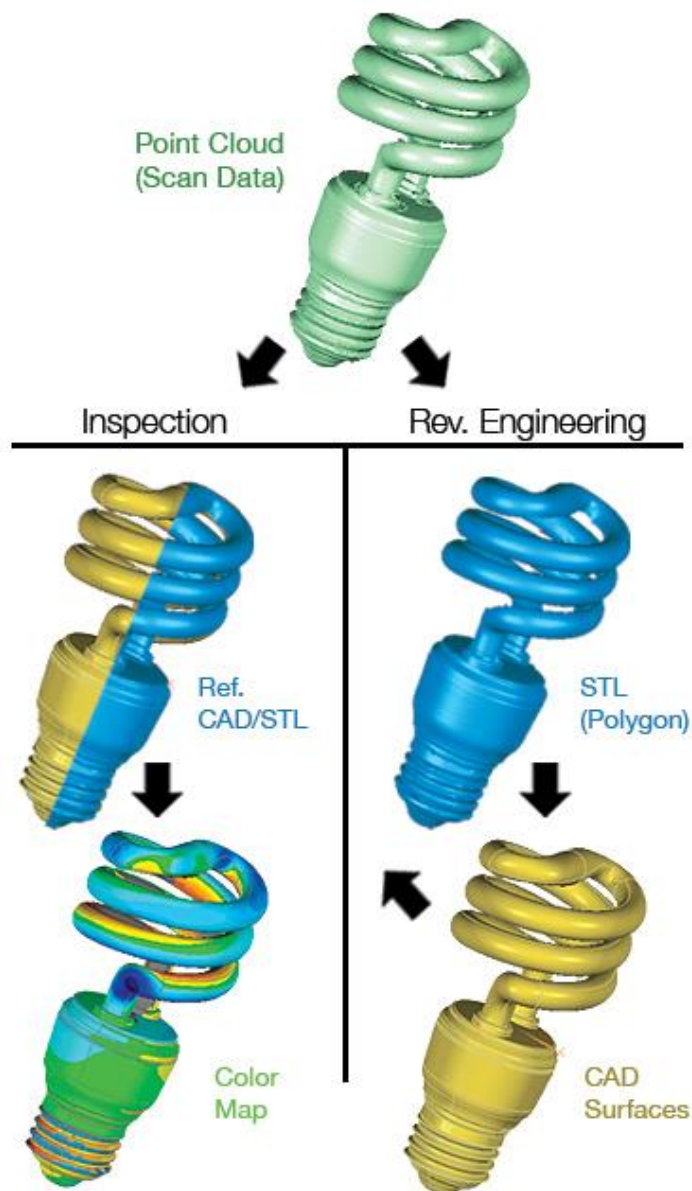
Siluettitekniikassa (Silhouette Technique) kohde kuvataan hyvin erottuvaa taustaa vasten, jolloin kappaleen ääriviivat ovat hyvin eroteltavissa. Siluetista, yksittäisestä kuvasta, muodostetaan kolmiulotteinen malli yhdistämällä useita siluetteja yhteen. Ote-
tuista kuvista eli silueteista muodostetaan kolmiulotteinen malli. Menetelmällä ei pystytä havaitsemaan esimerkiksi esineen koveruutta. (Georgopoulos ym. 2010.)

Kuvaan perustuvassa menetelmässä (Image-Based modeling) otetaan kuvia kohteesta useasta eri kuvakulmasta. Erillisen ohjelmiston avulla kuvat yhdistetään yhteen kolmiulotteiseksi malliksi. Kvantamismenetelmä hyödynnetään esimerkiksi peliteollisuudessa virtuaalista kolmiulotteista maailmaa luodessa. (Tito 2004.)

Fotogrammetriaa hyödynnetään mobiililaitteella skannaamisessa. Fotogrammetriassa pinnan muodot muodostetaan kohteesta otettujen kuvien perusteella. Kohde kuvataan eri suunnista ja trigonometrian avulla voidaan matemaattisesti määrittää kolmiulotteisia pisteitä. (Upadhyay 2014.)

3 3D-MALLIN REKONSTRUKTIO

3D-skannaaminen noudattaa yleisesti seuraavanlaista prosessikaaviota (Kuva 10). Skannausdatasta saatava pistepilvi muodostetaan mesh-verkoksi, jonka jälkeen se tuodaan CAD-ohjelmistoon. CAD-ohjelmistolla malliin luodaan pintoja erilaisilla työkaluilla. Lopullista CAD-mallia vertailemalla mesh-verkosta tehtyyn varmistetaan oikean geometrian säilyvyys.

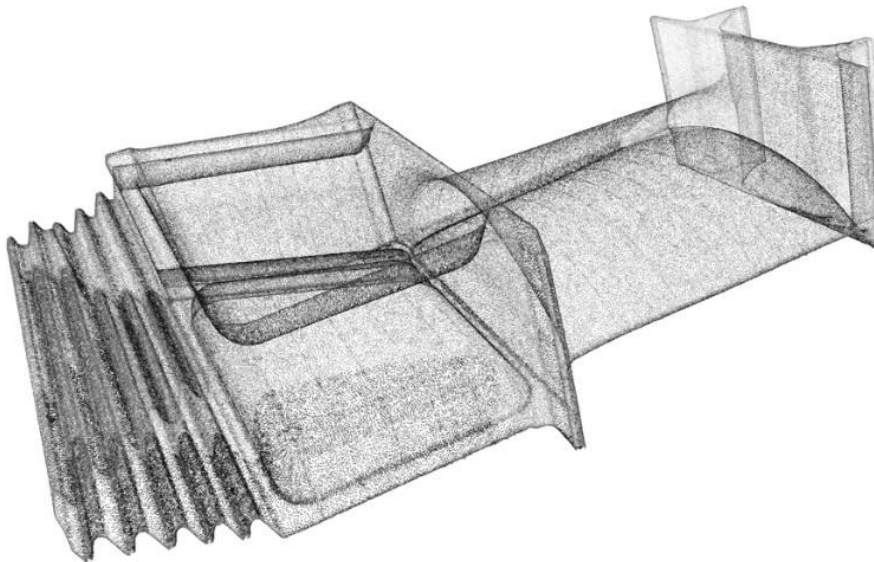


Kuva 10. 3D-skannaamisen prosessikaavio (Laserdesign 2019).

3.1 Pistepilvi

Pistepilven avulla muodostetaan skannatusta kohteesta kolmiulotteinen malli. Pistepilvi (Kuva 11) muodostuu miljoonista yksittäisistä pisteistä, jotka sijaitsevat kolmiulotteisesti x-, y-, ja z-suunnassa.

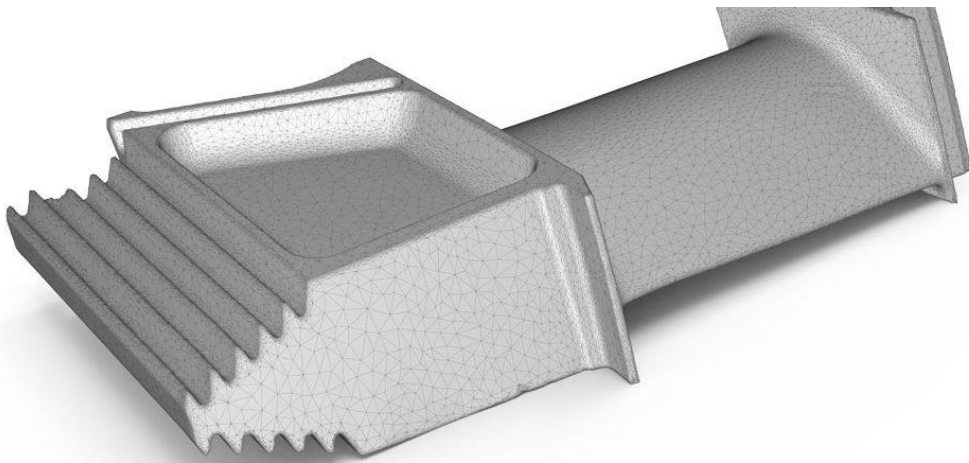
Mittauksesta aiheutuva kohina, joka näkyy pistepilven yksittäisten pisteiden erottumisena keskijakaumasta, aiheuttaa mallin pinnan vääristymistä. Kohinaa vastaan on kehitetty erilaisia algoritmeja, jotka vähentävät sen määrää. Käytetystä algoritmista riippuen yleisimmät heikentävät pistepilven tarkkuutta terävien reunojen ja kulmien kohdalla, josta mitattava datamäärä on korkea. Tämä aiheuttaa lopullisessa mallissa terävien yksityiskohtien puuttumista. (Sitnik & Karaszewski 2008.)



Kuva 11. Kappaleesta muodostettu pistepilvi (Europac3d 2019).

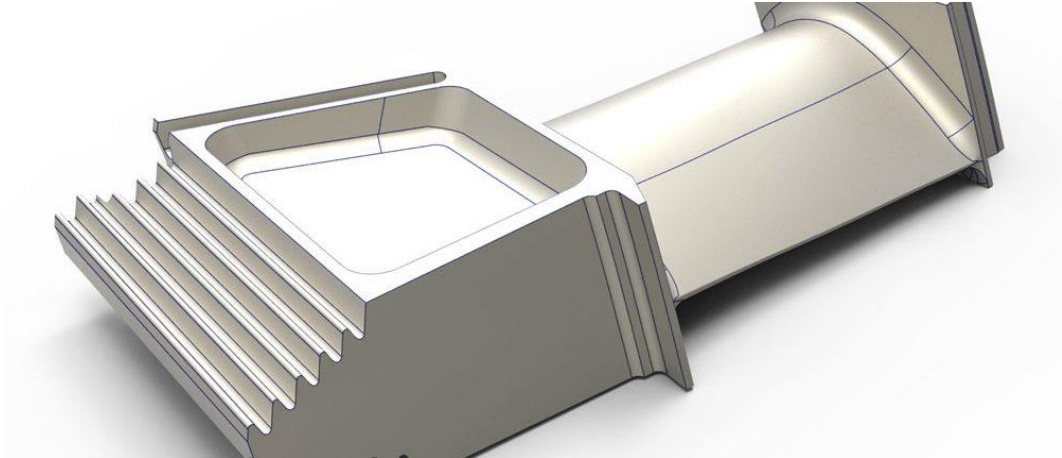
3.2 3D-mallin luonti

Pistepilven avulla muodostetaan mesh-verkko eli pintamalli kappaleelle, josta geometrisen mittatarkkuus ilmenee. Mesh-pinta muodostetaan apuohjelman avulla, joka hyödyntää algoritmeja. Se on yleisimmin kolmioverkon muotoinen (Kuva 12), sillä se on kaikkein yksinkertaisin ja joustavin tapa muokata. (Guo, Ding, Jia & Yan 2018.) Tietokoneelle tallennettuna se tunnetaan STL-tiedostopäätte-nimellä (Europac3d 2019).



Kuva 12. Kolmioverkon mallinen mesh-verkko. (Europac3d 2019).

Parametrinen (Kuva 13), lopullinen malli muodostetaan CAD-ohjelmistolla mesh-verkon avulla (Europac3d 2019). CAD-malli mahdollistaa skannatun kappaleen tarkan jäljentämisen tai muokkaamisen (Laserdesign 2019). Suunnittelutyön lopputuloksena saadaan täydellinen malli, joka sisältää kappaleesta esimerkiksi 2D-piirustukset, valmistustiedot ja kokoonpanopiirustukset (Europac3d 2019).



Kuva 13. Parametrinen malli (Europac3d 2019).

4 3D-SKANNAAMINEN

4.1 Artec Eva

Tässä työssä käytettiin Turun ammattikorkeakoulun strukturoidulla valolla toimivaa Artec Eva -3D-skanneria, jonka tekniset ominaisuudet on esitetty kuvassa 14. Skannausdatan editoinnissa käytettiin skannerin mukana tullutta Artec Eva Studio 13 -Professional-ohjelmaa.



General specifications

Eva

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
Colors	24 bpp
Texture resolution	1.3 mp
Scanning technology	structured light
Structured light source	flash bulb (no laser)
Working distance	0.4 – 1 m
Linear field of view, H × W @ closest range	214 × 148 mm
Linear field of view, H × W @ furthest range	536 × 371 mm
Angular field of view, H × W	30 × 21°
Video frame rate, up to	16 fps
Exposure time	0.0002 sec.
Data acquisition speed, up to	2 mln points / sec.
Multi core processing	Yes

Kuva 14. Artec Eva (Artec 3D 2019).

4.2 Skannauskohteet

Skannauksissa kohteina olivat muovista ja silikonista valmistettu kaukosäädin (Kuva 15) ja 3D-tulostamalla valmistettu muovinen kappale (Kuva 16). Muita skannattavia kohteita olivat pahvimuki, toimistosermi sekä teräksestä valmistettu hitsattu kappale (Kuva 17). Lopuksi yritettiin suorittaa laajempaa tilaskannausta.



Kuva 15. Kaukosäädin pöydällä skannattavana.



Kuva 16. 3D-tulostettu kappale.



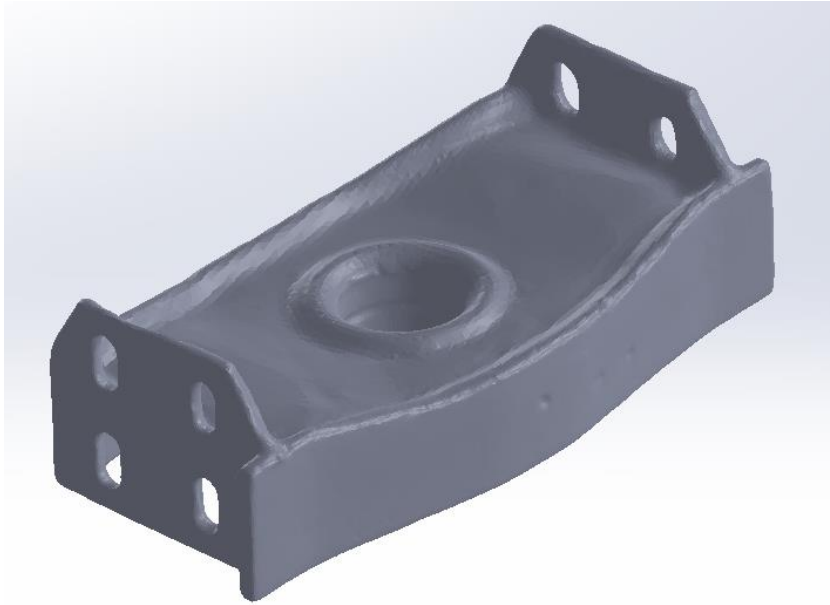
Kuva 17. Teräksinen rakenne.

4.3 Skannauksen suoritus

Skannausta edeltäviä vaiheita olivat laitteen yhdistäminen tietokoneeseen, Artec Studio -ohjelmiston käynnistys ja skannausetäisyyden määrittäminen. Skannausetäisyyden optimoimiseksi skanneri pitää asettaa sopivalle etäisyydelle tietokoneeseen näyttämän reaaliaikaisen esikatselupalkin avulla. Käytön aloitus tapahtuu pitämällä laitetta kädessä ja painamalla skannaamisen aloittavaa painiketta. Tämän jälkeen kohde skannataan ”maalaavin” liikkein. Kohteesta riippuen mallin muodostamiseen voidaan tarvita useampi erillinen skannaus. Skannausdata piirtyy reaaliajassa tietokoneen näytölle, josta on helppo seurata, saadaanko tarvittavat pinnat ja yksityiskohdat skannattua. Skannausdatan valmistuttua, yksi tai useampi skannaus yhdistetään toisiinsa kappaletta yhdistävistä piirteistä otettujen pisteiden avulla. Ohjelmiston eri työkaluilla voidaan muokata dataa esimerkiksi terävöittämällä, pehmentämällä, poistamalla ylimääräisiä alueita tai täyttämällä reikiä, jotka aiheutuivat skannausdatan puuttumisesta kyseiseltä alueelta.

Koeskannauksena käytettiin teräksestä valmistettua köysipyörää, jonka pintaa ei ollut käsitelty koneistuksen jälkeen. Skannattaessa kappaletta, kappaleen pinta heijasti laitteesta lähtevää valoa voimakkaasti eikä talteen saatu data riittänyt muodostamaan muotoja kappaleen keskeltä. Sama toistui skannattaessa rakenneteräksestä hitsatun t-liitos kappaleen päätyä, joka oli leikkaamisen vuoksi jäänyt kiiltäväksi. Sen sijaan rakenteen sivuprofiileista otetut skannaukset onnistuivat.

Teräksisen hitsatun kappaleen skannaaminen suoritettiin lattiaa vasten. Pinta ei heijastanut valoa eikä vastaavaa ongelmaa syntynyt kuin kirkkaita koneistettuja kappaleita skannatessa. Malli (Kuva 18) syntyi neljästä eri skannauksesta ja tallennettiin STL-muotoon SolidWorks-ohjelmistolla avattavaksi.



Kuva 18. Skannatun kappaleen 3D-malli tarkastelussa SolidWorks-käyttöliittymässä.

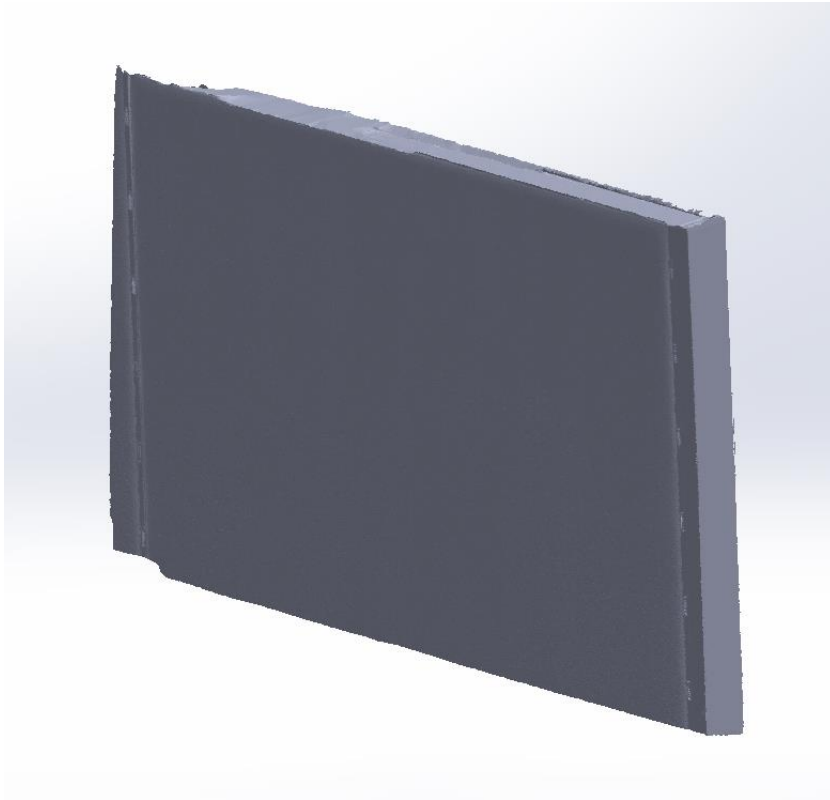
Seuraavaksi suoritettiin skannaus valkoisesta pahvimukista. Itse skannaaminen oli nopeaa ja riitti, kun kappaleen skannasi kahdesti, kerran ulkopuolelta ja kerran sisäpuolelta. Malli oli hyvä ja siitä havainnointui pahvimukin reunalla oleva pyöreän taiteltu reunus.

Kaukosäädin skannattiin kahdessa eri osassa; päältä ja alta. Lopputuloksessa (Kuva 19) näppäimet ja terävät reunat pyöristyivät ja erottuivat huonommin fyysiseen malliin verrattuna.

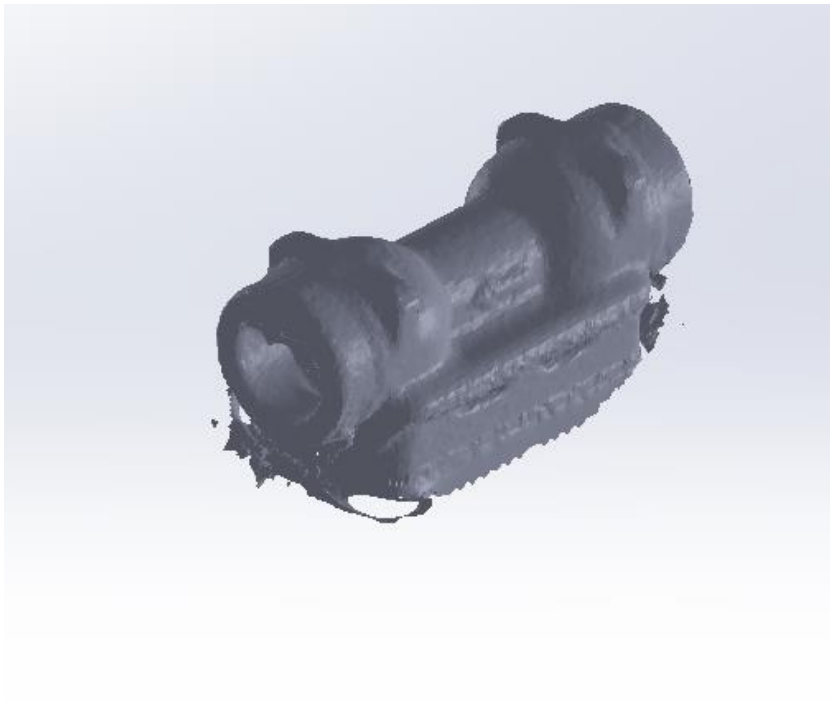


Kuva 19. 3D-skannattu kaukosäädin.

Skanneria testattiin tilaskannaamisessa ja kohteeksi valikoitui toimistosermien pääty. Sermien pinnat olivat kangasta ja päädyt maalattua alumiinia. Skannausoperaatio sujui helposti ja skanneri keräsi herkästi dataa verrattuna teräksestä valmistettuihin kiiltäväpintaisiin kappaleisiin. Malli (Kuva 20) muodostui kahdesta erillisestä skannauksesta. Mallin reunoilla erottuu kohinaa, joka näkyy myös 3D-tulostetun kappaleen skannauksessa (Kuva 21).

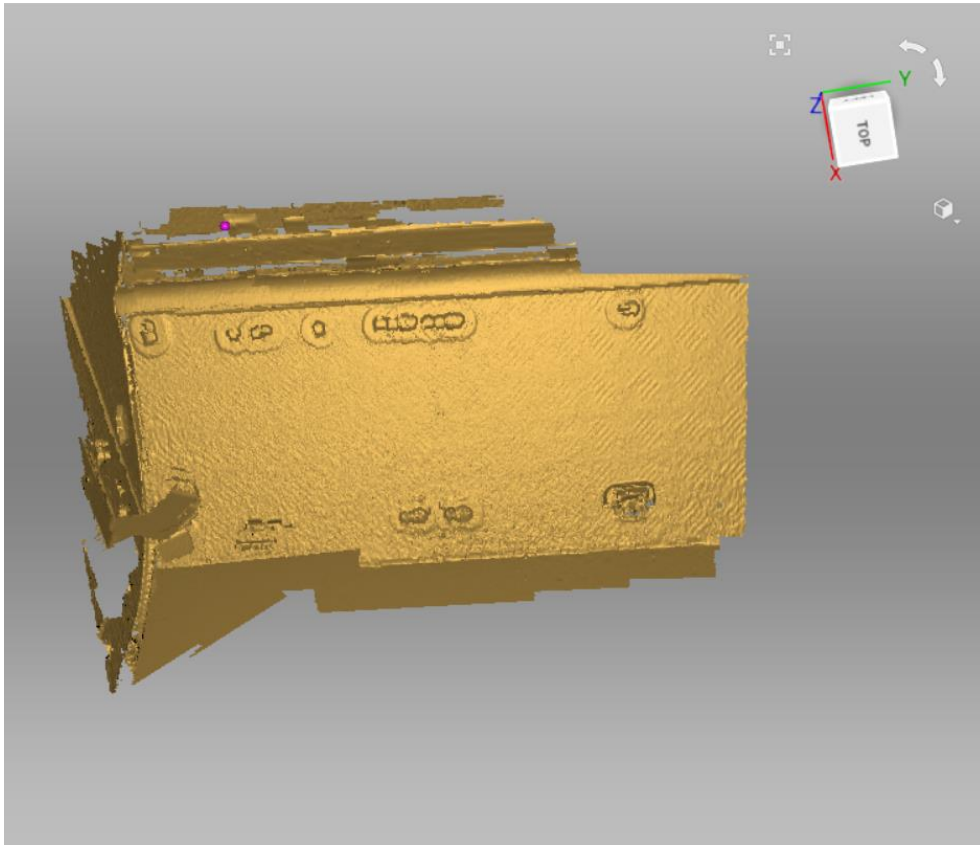


Kuva 20. Toimistosermin pääty.



Kuva 21. Kohinasta aiheutuvaa pinnan epävääristymistä.

Laitteella yritettiin skannata kokonainen tilaympäristö usealla eri skannauksella. Skannaus kuitenkin epäonnistui. Tila koostui suurimmaksi osaksi kiiltävistä sekä maalatuista monimutkaisesta muotoisista kappaleista ja sähköjohdoista. Syiksi muodostuivat paikoituksen katoaminen ja skannausdatassa esiintyvä pinnan muodon reikiintyminen. Skannatessa samanlaisena jatkuvaa pintaa, laite kadotti paikoituksensa ja alkoi monistaa jo aikaisemmin skannattuja muotoja (Kuva 22).



Kuva 22. Paikoituksen katoamisesta aiheutuva muotojen monistaminen.

4.4 Tulokset

Kiiltävät pinnat tuottivat ongelmia skannauksessa, joka näkyi laitteen häiriintymisenä. Kappaleen pinnan käsittely esim. vaalealla mattamaalilla tai talkilla olisi voinut ehkäistä tätä ongelmaa ja parantaa lopputulosta. Vaalea väritys ja mattapinta toimivat skannauksessa parempana vaihtoehtona, sillä pahvimukin skannauksessa välttyttiin näiltä ongelmilta. Skannausalustasta heijastuneen valon määrällä saattaa olla myös vaikutusta.

Paikoituksen häviämisen ilmetessä on syytä miettiä, kannattaisiko kappale tai alue skannata useassa eri osassa. Työssä tehtävän tilan skannaaminen näin olisi tuottanut suuren määrän skannauksia eikä se siksi olisi enää ollut välttämättä kannattavaa ajallisesti. Paikoituksen häviämiseen olisi myös voinut yrittää estää käyttämällä kohteen pintaan liimattavia paikoitustarroja.

Käyttäjällä on mahdollisuus vaikuttaa loppueditoinnilla kappaleen pintoihin etenkin kohinan poistamiseksi. Edellä mainituissa malleissa esiintyvä kohina johtuu käyttäjälähtöisestä editointivirheestä. Mahdollisimman siistiksi tehty mesh-pinta helpottaa kappaleen jatkokäsittelyä ja mittavirheiden minimoimista.

Varsinaista laitekohtaista mittausvirheiden tarkastelua ei voitu suorittaa, sillä se olisi vaatinut erillisen ohjelmiston, jolla olisi voitu tarkastella skannatun mallin mittapoikkeamia CAD-malliin tai työpiirustukseen verrattuna. Mallin mittatarkkuuteen vaikuttaa myöskin skannaustapa. Skannaukset kannattaisi suorittaa lähtemällä liikkeelle kappaleen keskipisteestä kohti sen äärirajoja. Koska kappaleen keskipisteestä on lyhyempi matka kohteen äärirajoille, on mittausvirhe pienempi kuin äärirajoilta toiselle edettäessä.

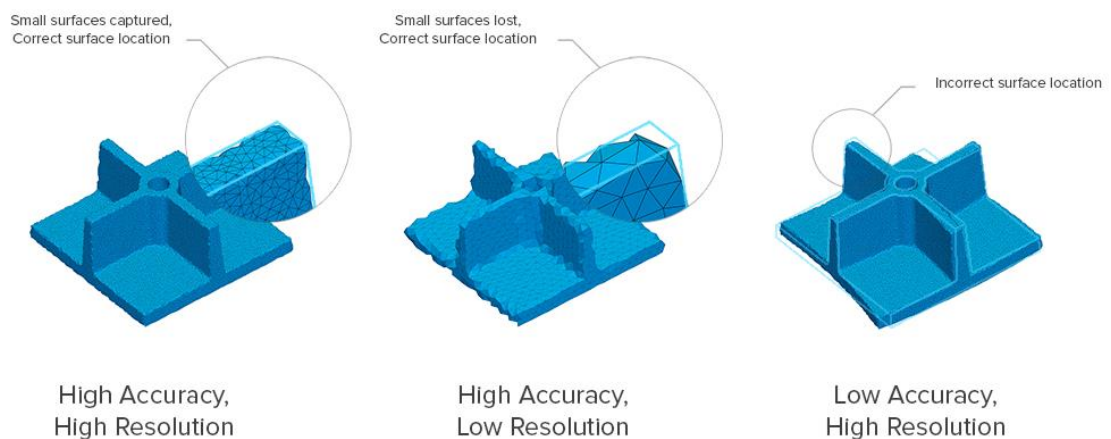
Mittojen todennukseen olleet työkalut olivat Artec Studion- ja SolidWorks-käyttöliittymien measurement-toiminnot. SolidWorks-ohjelmistossa saatu 3D-tulostetun kappaleen pituus oli 85,2 mm ja työntömitalla mittaamalla 85,05 mm. Työpiirustuksessa 85,0 mm. 3D-tulostettu kappale tuotiin Solidworks-ohjelmaan kokoonpanona CAD-mallin päälle, josta silmämääräisellä tarkastuksella huomattiin, että skannatun mallin tarkkuus ja pinnan muodot eivät olleet riittävällä tasolla näin pientä kappaletta skannatessa.

5 SKANNEREIDEN VERTAILU

5.1 Tekniset ominaisuudet

Tarkkuus eli skannattavassa kohteesta tapahtuva mittaepätarkkuus 3D-mallissa ilmoitetaan pääsääntöisesti millimetreissä tai mikroneissa. Yksi (1) μm =0,001mm.

Resoluutiolla tarkoitetaan 3D-mallista saadun kahden pisteen etäisyyttä toisistaan. Resoluutiolla on vaikutus pistepilven tiheyteen ja kappaleesta saataviin yksityiskohtien määrään (Kuva 23). (AN-cadsolutions 2019.) Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, kuinka tarkasti kappaleen yksityiskohtia voidaan skannata. Resoluution arvon ollessa mitä pienempi, sen parempi resoluutio ja sitä tarkempi lopputulos saadaan.



Kuva 23. Resoluution ja tarkkuuden vaikutus yhdessä skannatun kappaleen lopputulokseen (Formlabs 2019).

Mittausepätarkkuus tarkoittaa kappaleen mittausepätarkkuutta 3D-mallissa x-, y- ja z-suunnassa. Tämän luvun ilmoittaminen riippuu laitevalmistajasta. Osa laitevalmistajista ilmoittaa tämän luvun tiettyinä prosenttilukuna mitattua matkaa kohden. Esimerkiksi Artec 3D- ja Sikantech laitevalmistajat ilmoittavat mittavirheen olevan 0,03% 100 senttimetriä kohden.

Zeiss Industrial Metrology ilmoittaa laitteidensa mittausepävarmuuden ISO 10360-standardin perusteella. Kaavan avulla voidaan laskea mittausepätarkkuus halutulta mittapi-tuudelta. Kaavan numeeriset arvot vaihtelevat riippuen, mihin skannausmenetelmään

heidän laitteensa perustuu. Kaavalla (Kaava 1) lasketaan T-SCAN 20 laserskannerin mittausepäätarkkuus. (Iso 10360, Sähköpostiviesti Kosunen 15.4.2019.)

Kaava 1. ISO 10360. T-SCAN 20.

$$40 + \left(40 * \frac{L}{100}\right) \mu\text{m}.$$

, jossa L=Pituus (mm).

Kaavalla (Kaava 2) lasketaan Shining 3D EinScan-Pro 2X Plus tarkkuus yhden metrin mittaista kappaletta mitattaessa (Einscan pro 2, Sähköpostiviesti Shining 3D, 16.5.2019).

Kaava 2. EinScan-Pro 2X Plus.

$$\textit{Single shot accuracy (mm)} + (0,0003 * L)$$

, jossa single shot accuracy=yksittäisen skannauksen tarkkuus (mm) ja L=Pituus (mm).

Laittevalmistajat ilmoittavat tarkkuuden yksittäisiin skannauksiin. Tarkkuus on tällöin parempi ja soveltuu kohteisiin, joissa laite pysyy liikkumattomana erilliseen jalustaan kiinnitettynä. Tietokonetomografia- ja koordinaattimittauslaitteiden tarkkuudet ovat ilmoitettu tällä tavalla taulukossa (Taulukko 1).

5.2 Laitteiden tarkkuus ja hinnat

Laitteiden hinnat määräytyvät laitteessa käytetyn mittausmenetelmän mukaan (Taulukko 1). Yleisesti ottaen mitä tarkempi mittaustulos halutaan, sitä korkeampi on laitteen hinta. Tietokonetomografia- ja koordinaattimittauslaitteet ovat tarkkuudeltaan huomattavasti parempia kuin muihin menetelmiin perustuvat skannerit. Nämä laitteistot soveltuvat laboratorio-olosuhteisiin tai teollisuuteen, kun mittauksissa vaaditaan äärimmäistä tarkkuutta ja luotettavuutta.

Laitteiden hinnat ovat laitevalmistajien internetsivuilta tai yhteyshenkilöiltä sähköpostin välityksellä saatuja tarkkoja tai arvioituja hintoja euroissa (€). Ilmoitetut tarkkuudet ovat mittausepä tarkkuuksia millimetreissä yhden metrin matkaa mitattaessa. Tiedot ovat kerätty suoraan laitevalmistajien internetsivuilta, sähköpostin välityksellä tai laskemalla heidän ilmoittamallaan kaavallaan.

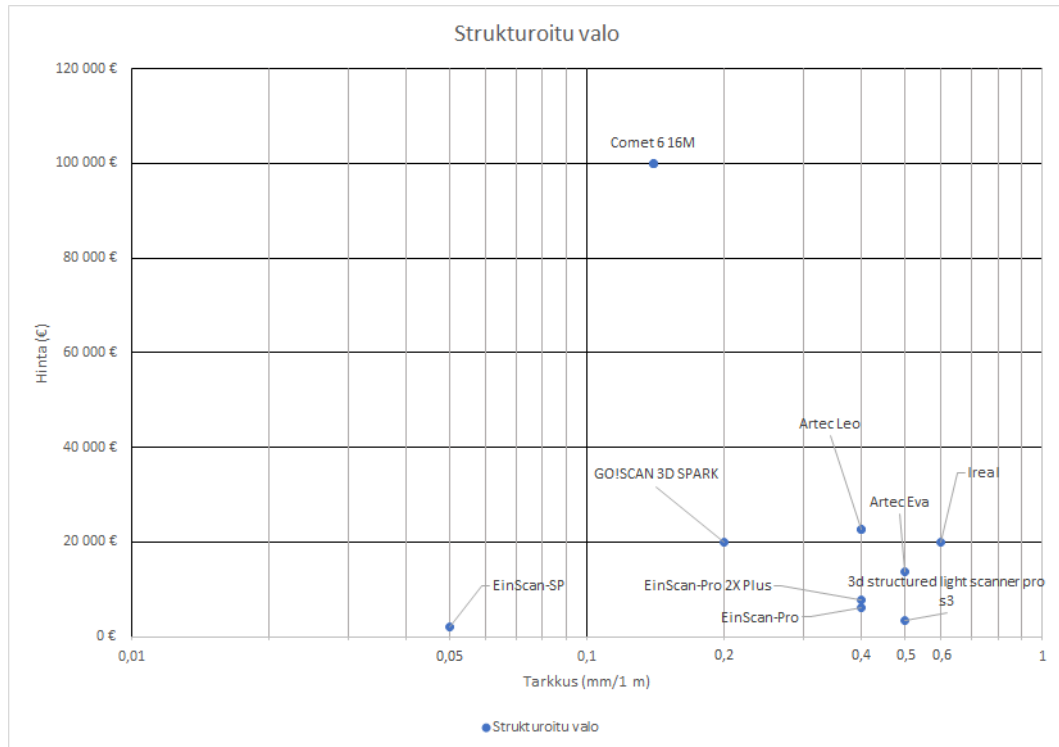
Vertailussa mukana oleva Comet 6 16M -laitteen tarkkuus mitattaessa 530 mm pitkää kappaletta on 0,140 mm. (Iso 10360, Sähköpostiviesti Kosunen 15.5.2019). Tässä vertailussa käytetään laitteiden tarkkuutta yhden metrin mittaista kappaletta mitattaessa lukuun ottamatta Comet 6 16M -laitetta. Tarkkuuden arvo heikkenee mitattavan kohteen kasvaessa, joten vertailu olisi hyvä suorittaa juuri käyttökohteen pituuteen sopilla arvoilla. Vertailussa esitetyt tarkkuudet eivät enää päde esimerkiksi 2 metrin mittaista kappaletta mitattaessa.

Taulukko 1. Laitteiden keskiarvioillisia tarkkuuksia ja hintoja eri menetelmien perusteella.

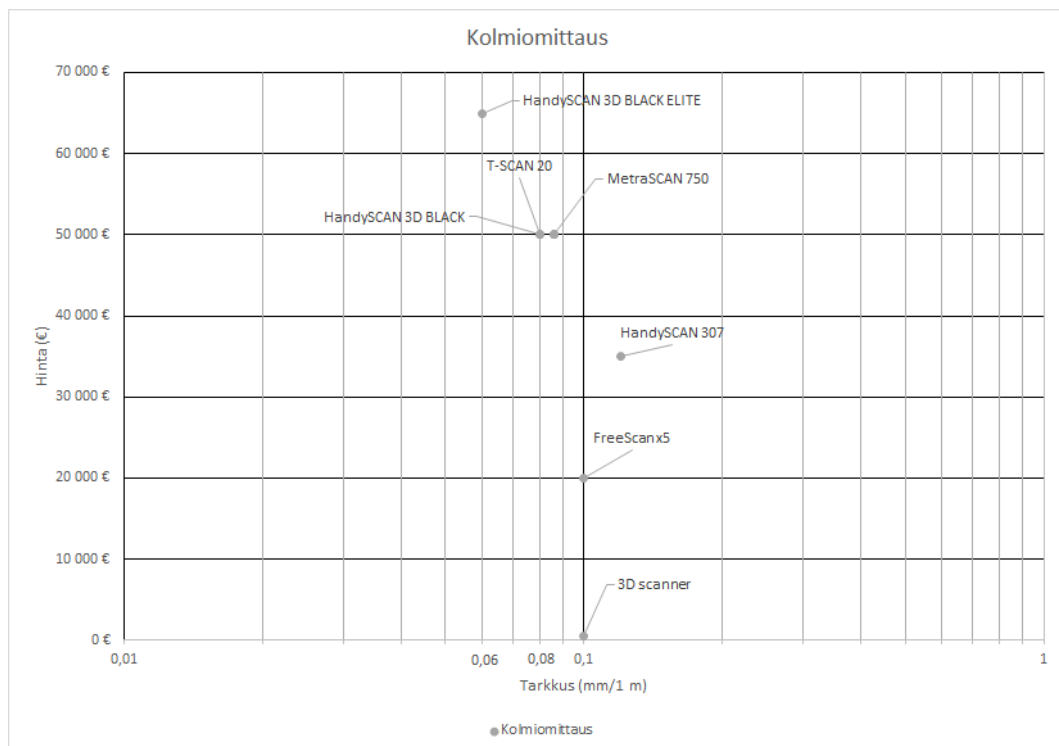
Mittausmenetelmä	Tarkkuus (mm)	Hinta (€)
<i>Kolmiomittaus</i>	0,06-0,12	600-65 000
<i>Strukturoitu valo</i>	0,14-0,9	3 300-330 000
<i>Mittavarsilaitteisto</i>	0,05	50 000-80 000
<i>Pulssilaser</i>	0,15-0,3	50 000-65 000
<i>Koordinaattimittauskone</i>	0,00435	50 000-300 000
<i>Tietokonetomografia</i>	0,003	300 000-550 000

Laitteiden tiedon hankinnassa on keskitytty sellaisiin menetelmiin, jotka mahdollistavat laitteen liikuttamisen ja erilaisten kappaleiden skannaamisen pienistä keskisuuriin ja suuriin tilaskannauksiin. Näihin vaatimuksiin soveltuvia menetelmiä ovat strukturoitu valo ja kolmiomittaus. Muista menetelmistä selvitettiin suppeammin hinta- ja tekniset tiedot yleisen kokonaiskuvan muodostamiseksi.

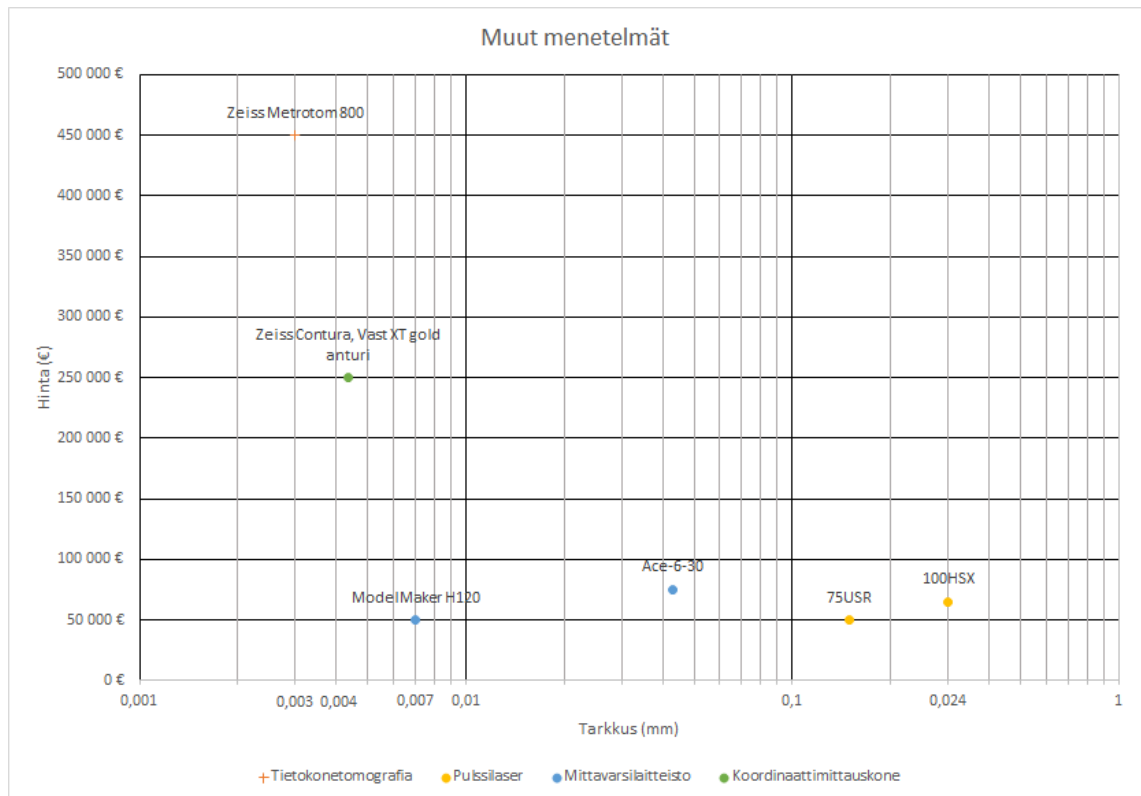
Strukturoidulla valolla (Kuvio 1) ja kolmiomittauksella (Kuvio 2) toimivien skannereiden hinta vaihtelee noin 3000 yli 100 000 euroon. Muissa menetelmissä (Kuvio 3) hinta on 50 000 ja 550 000 euron välillä. Hinta on sitä korkeampi, mitä tarkempi laite on kyseessä.



Kuvio 1. Strukturoidulla valolla toimivia laitteita.



Kuvio 2. Kolmiomittauksella toimivia laitteita.



Kuvio 3. Muilla menetelmillä toimivia laitteita.

5.3 Ominaisuuksien vertailu ja laitteen valinta

Vertailun lähtökohtana oli käyttökohteen määrittäminen. Skannauskohteet ovat pienestä keskisuuriin kappaleisiin ja ympäristön skannaamiseen, johon soveltuvat menetelmiksi strukturoitu valo ja kolmiomittaus. Tekniset arvot rajataan Artec Eva -laitteen ominaisuuksien mukaisesti, sillä koeskannausten perusteella halutaan parempi lopputulos tarkkuudelta ja resoluutiolta. Tarkkuudessa ja resoluutiossa rajattiin pois kaikki markkinoilla olevat Artec Evaa huonommat arvot saaneet (0,5 mm ja 0,5 mm) laitteet. (Puhelinkeskustelu Härö, Rensi Finland Oy 16.5.2019). Comet 6 resoluution arvo on ilmoitettu 700 mm kuvausetäisyydeltä. Tarkkuuden ja resoluution arvot saattavat muuttua mitatun matkan ja mittausetäisyyden vaihdellessa.

Laitteiden vertailu suoritettiin kahdella esimerkkitapauksella. Huomioon otettiin hinta ja kaksi tärkeää teknistä ominaisuutta pienten ja keskisuurien kappaleiden skannaamisessa; tarkkuus ja resoluutio. Ensimmäisessä tapauksessa (Kuva 24) käytettiin tarkkuutta ja resoluutiota, toisessa (Kuva 25) kaikkia kolmea.

Laskumenetelmässä arvot ovat lineaarisesti interpoloitu minimi- ja maksimiarvon väliltä. Kunkin ominaisuuden minimi- ja maksimipistemäärä on 0-100. Tarkkuuden ollessa valitun heikoimman (0,5) ja parhaimman (0,06) arvon väliltä, saa ominaisuus pistemäärän lineaarisesti määriteltynä. Resoluutiossa arvot ovat 0,02 ja 0,5 ja hinnassa 2000 € ja 50 000 € väliltä.

Vertailussa käytetään painotettua pisteytysmenetelmää, jossa kullekin ominaisuudelle annetaan tietty painoarvo prosentuaalisesti. Painoarvon avulla lasketaan jokaiselle ominaisuudelle sen ominainen pistemäärä. Lopuksi eri ominaisuuksien pistemäärät lasketaan yhteen ja ovat siten vertailukelpoisia keskenään.

Kummassakin tapauksessa oikean laitteen löydyttyä lopullinen ostopäätös tehtäisiin tarjouspyynnön perusteella, jolla varmistettaisiin laitteen ja mahdollisten lisävarusteiden hinta. Laittevalmistajilta voi pyytää demoesittelyinä 3D-malleja skannatuista kappaleista, joiden avulla voidaan tarkastella ja todeta laite sopivaksi käyttökohteeseen.

5.3.1 Tapaus 1

Tarkkuuden painoarvoiksi määritettiin 70 % ja resoluution 30 %.

<i>Menetelmä</i>	<i>Valmistaja</i>	<i>Malli</i>	<i>Tarkkuus (mm/1m)</i>	<i>Tarkkuuden pisteet</i>	<i>Resoluutio (mm)</i>	<i>Resoluution pisteet</i>	<i>Yhteenlasketut pisteet</i>
<i>Strukturoitu valo</i>	Shining 3D	EinScan-Pro 2X Plus	0,4	22,2	0,24	57,8	32,9
<i>Strukturoitu valo</i>	Shining 3D	EinScan-Pro	0,4	22,2	0,24	57,8	32,9
<i>Strukturoitu valo</i>	Shining 3D	EinScan-SP	0,05	100,0	0,2	66,7	90
<i>Strukturoitu valo</i>	Artec 3D	Artec Eva	0,5	0,0	0,5	0,0	0
<i>Strukturoitu valo</i>	Artec 3D	Artec Leo	0,4	22,2	0,5	0,0	15,6
<i>Strukturoitu valo</i>	Zeiss Industrial Metrology	Comet 6 16M	0,14	80,0	0,134	81,3	80,4
<i>Strukturoitu valo</i>	Scantech	Ireal	0,6	0,0	0,3	44,4	13,3
<i>Strukturoitu valo</i>	Creaform	GO!SCAN 3D SPARK	0,2	66,7	0,2	66,7	66,7
<i>Strukturoitu valo</i>	HP	3d structured light scanner pro s3	0,5	0,0	0,05	100,0	30
<i>Kolmiomittaus</i>	Shining 3D	FreeScan x5	0,1	88,9	0,1	88,9	88,9
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	HandySCAN 3D BLACK	0,08	93,3	0,1	88,9	92
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	HandySCAN 3D BLACK ELITE	0,06	97,8	0,1	88,9	95,1
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	HandySCAN 307	0,12	84,4	0,2	66,7	79,1
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	MetraSCAN 750	0,086	92,0	0,05	100,0	94,4
<i>Kolmiomittaus</i>	Zeiss Industrial Metrology	T-SCAN 20	0,08	93,3	0,075	94,4	93,7

Kuva 24. Vertailu tarkkuuden ja resoluution perusteella.

Vertailun neljä parasta olivat HandySCAN 3D BLACK ELITE (95,1 p.), MetraSCAN 750 (94,4 p.), T-SCAN 20 (93,7 p.) ja HandySCAN 3D BLACK (92,0 p.). Näistä neljästä paras tarkkuus on HandySCAN 3D BLACK Elitellä, (0,06 mm). Paras resoluutio puolestaan on MetraSCAN 750:illä (0,05 mm). Neljästä parhaasta valitaan HandySCAN 3D BLACK ELITE parhaimman tarkkuuden perusteella.

5.3.2 Tapaus 2

Tarkkuuden painoarvoiksi määritettiin 40 %, resoluution 20 % ja hinnan 40 %.

<i>Menetelmä</i>	<i>Valmistaja</i>	<i>Malli</i>	<i>Tarkkuus (mm/1m)</i>	<i>Tarkkuuden pisteet</i>	<i>Resoluutio (mm)</i>	<i>Resoluution pisteet</i>	<i>Hinta (€)</i>	<i>Hinnan pisteet</i>	<i>Yhteenlasketut pisteet</i>
<i>Strukturoitu valo</i>	Shining 3D	EinScan-Pro 2X Plus	0,4	22,2	0,24	57,8	7795	87,9	55,6
<i>Strukturoitu valo</i>	Shining 3D	EinScan-Pro	0,4	22,2	0,24	57,8	6134	91,4	56,9
<i>Strukturoitu valo</i>	Shining 3D	EinScan-SP	0,05	100,0	0,2	66,7	2000	100,0	93,3
<i>Strukturoitu valo</i>	Artec 3D	Artec Eva	0,5	0,0	0,5	0,0	13700	75,6	30,3
<i>Strukturoitu valo</i>	Artec 3D	Artec Leo	0,4	22,2	0,5	0,0	22700	56,9	31,6
<i>Strukturoitu valo</i>	Zeiss Industrial Metrology	Comet 6 16M	0,14	80,0	0,134	81,3	100000	0,0	48,3
<i>Strukturoitu valo</i>	Scantech	Ireal	0,6	0,0	0,3	44,4	20000	62,5	33,9
<i>Strukturoitu valo</i>	Creaform	GO!SCAN 3D SPARK	0,2	66,7	0,2	66,7	20 000	62,5	65
<i>Strukturoitu valo</i>	HP	3d structured light scanner pro s3	0,5	0,0	0,05	100,0	3340	97,2	58,9
<i>Kolmiomittaus</i>	Shining 3D	FreeScan x5	0,1	88,9	0,1	88,9	20000	62,5	78,3
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	HandySCAN 3D BLACK	0,08	93,3	0,1	88,9	50000	0,0	55,1
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	HandySCAN 3D BLACK ELITE	0,06	97,8	0,1	88,9	65000	0,0	56,9
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	HandySCAN 307	0,12	84,4	0,2	66,7	35000	31,3	59,6
<i>Kolmiomittaus</i>	Creaform	MetraSCAN 750	0,086	92,0	0,05	100,0	50000	0,0	56,8
<i>Kolmiomittaus</i>	Zeiss Industrial Metrology	T-SCAN 20	0,08	93,3	0,075	94,4	35000	31,3	68,7

Kuva 25. Vertailu tarkkuuden, resoluution ja hinnan mukaan.

Vertailun neljä parasta olivat EinScan-SP (93,3 p.), FreeScan x5 (78,3 p.), T-SCAN 20 (66,9 p.) ja GO!SCAN 3D SPARK (65,0 p.). Koska EinScan-SP on pöytämallinen laite eikä sitä voi käyttää ympäristön skannaamisessa, se putoaa pois vertailusta. Neljästä parhaasta laitteesta valitaan T-SCAN 20, koska se erottuu hyödykseen paremmalla tarkkuudella ja resoluutiolla ellei korkeampaa hintaa pidetä rajoittavana tekijänä.

5.4 Muuttuvat lisäkustannukset

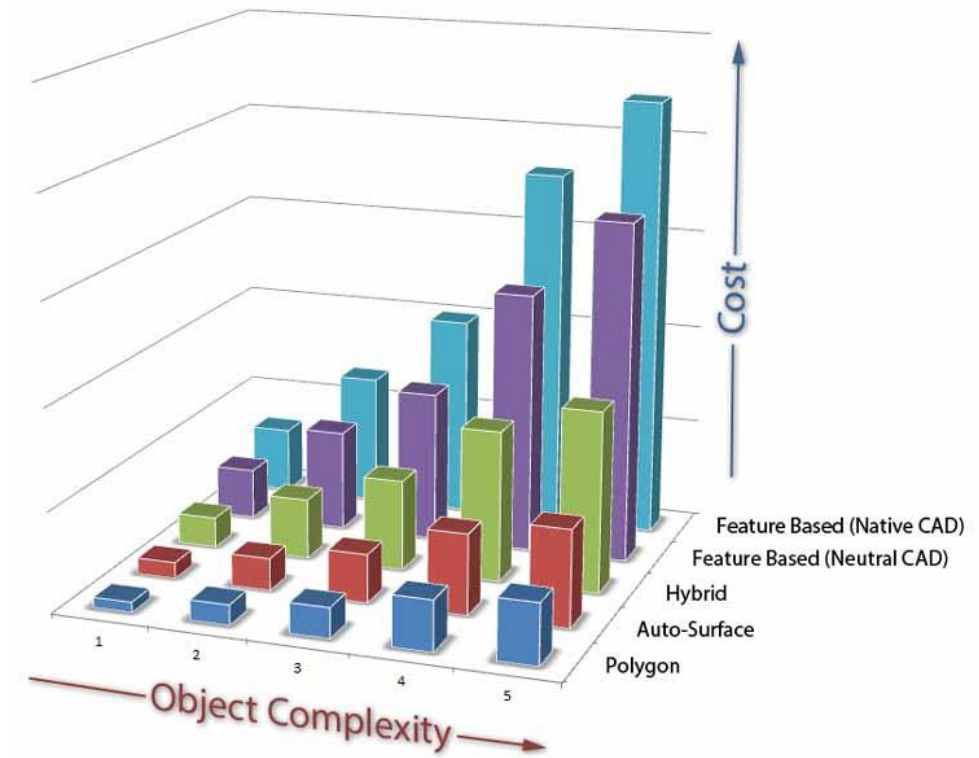
Laitehankinnan lisäksi muita huomioon otettavia lisäkustannuksia aiheuttavat mm. skannausoperaation suorittaminen, skannausdatan käsittely ja suunnittelu CAD-ohjelmistolla. Skannausoperaation suorittamiseen kuluva aika on yksilöllinen, sillä siihen vaikuttaa esimerkiksi kohteen koko ja yksityiskohtien lukumäärä.

Skannausdatan jälkikäsitteilyn lopputuloksen määrittäminen vaikuttaa käytettävien resurssien määrään (Kuva 26). Olennaista on, riittääkö skannatusta kohteesta pelkän mesh-verkon muodostaminen -STL-tiedostoksi vai halutaanko CAD-malli.

Mesh-verkon tekoon riittää skannereiden mukana tuleva apuohjelma. Auto-surface vaiheessa kappaleesta muodostetaan pintamalli automaattisilla komennoilla CAD-ohjelmistolla. Hybridissä kappaleessa hyödynnetään automaattisesti tehtyjä pintoja sekä erikseen tehtyjä piirteitä esimerkiksi pursottamalla.

Feature Based CAD-mallin tekeminen vie huomattavasti enemmän aikaa, sillä se sisältää kappaleesta täydellisen historiapuun erilaisineen piirteineen. Piirteiden teossa käytetään sketch-, pursotus- ja muita työkaluja. (Clark, J, 2019.) Tähän saattaa kulua aikaa muutamista tunneista useisiin työpäiviin. Muita lisäkustannuksia voi aiheutua ohjelmistojen ja laitteen käytön koulutuksesta.

Skannattuja malleja varten olisi hyvä olla erillinen ohjelma esim. PolyWorks, jolla voitaisiin todentaa skannatun mallin poikkeamat verrattuna alkuperäiseen CAD-malliin tai työpiirustukseen. Näin voitaisiin estää mahdolliset virheet jälleentuotannossa.



Kuva 26. 3D-skannauksen jälkikäsittelyn vaikutus hintaan (NeoMek 2019).

6 TULOKSET

Erilaisten skannausmenetelmien tutkiminen ja niiden omaksuminen antavat hyvät lähtökohdat 3D-skannaukseen ja sen hyödyntämiseen 3D-suunnittelussa. Teoriaosuus menetelmistä oli vaikein, sillä kirjallisuus- ja tutkimustietoa piti lukea paljon. Lähdekirjallisuutta oli saatavilla kattavasti.

Työssä päästiin testaamaan laitteen toimintaa ja tutkimaan skannaustuloksia. Hyödynnettäviä kohteita 3D-suunnittelussa konetekniikan ja teollisuuden näkökulmasta ovat erilaisten kappaleiden takaisinmallinnus ja ympäristön skannaus. Edellä mainittujen skannaamisessa saatetaan päästä ajallisesti huomattaviin säästöihin verrattuna perinteiseen 3D-mallinnukseen. Jotkin yksityiskohdat voivat olla liki mahdottomia uudelleen mallintaa ilman alkuperäistä työpiirustusta tai 3D-mallia.

3D-skannaaminen ei ole vielä yhtä suosittua kuin 3D-tulostaminen, mutta sen potentiaali on suuri. Laitteiden menetelmät ja hinnat kehittyvät jatkuvasti. Laitteita saa edullisesti verrattuna kalleimpiin, mutta niiden ominaisuuksista joutuu tinkimään. Varteenotettavia laitevalmistajia valikoitui selvityksen mukaan noin kymmenkunta. 3D-skannaamisen yleistyttyä tulevaisuudessa laitteiden hinnat voivat pudota huomattavasti nykyistä hinnoista, jos markkinoille saadaan lisää kilpailua laitevalmistajien välillä.

Vertailussa piti monesti lähestyä laitevalmistajia sähköpostilla, sillä laitteiden teknisiä ominaisuuksia ilmoitettiin eri tavoilla tai puutteellisesti. Osa potentiaalista laitevalmistajista eivät vastanneet lähestyviin yhteydenottoihin työn aikana ja siksi jäivät pois vertailusta. Laitteiden karkea vertailu on hyvä suorittaa manuaalisesti, kun on tiedossa mitä teknisiä ominaisuuksia etsii ja millaiseen käyttökohteeseen se tulee.

Tarkempaa vertailua varten tehtiin matemaattinen malli. Tämä tuotti haasteita, sillä mallin tekemisessä piti soveltaa matemaattista osaamista, koska valmista mallia ei löytynyt internetistä suoraan. Käyttökohteesta ja menetelmästä riippuen mallia voidaan hyödyntää yrityksessä laitteen hankinnan konkretisoituessa.

Laitteen hankinnan lisäksi muihin ohjelmistoihin ja henkilökunnan kouluttamiseen saa kulutettua huomattavan määrän resursseja, riippuen yrityksestä ja sen tarkoitusperästä. Minimissään pelkän laitehankinnan lisäksi voidaan päästä pitkälle vain muutaman tunnin laitekohtaisella opettelulla, IT-osaamistaidoilla ja valmiiksi opituilla CAD-ohjelmistojen osaamisella.

Opinnäytetyö oli kokonaisuudessaan mielestäni haastava, mutta antoi paljon oppia. Koko opinnäytetyön aikana mielenkiintoni pysyi korkealla ja uskon, että tulevaisuudessa jatkan asian parissa. Työn aikana sain kehitettyä osaamistani itsenäisessä työskentelyssä ja yhteistyötaidoissa, josta on varmasti hyötyä työelämässä.

LÄHTEET

3Dnatives. Viitattu 29.1.2019. <https://www.3dnatives.com/en/3d-scanner-laser-triangulation080920174-99/>

Alvarez, I.: Enguita, J. M.: Frade, M.: Marina, J & Ojea, G. On-Line Metrology with Conoscopic Holography: Beyond

AN-cadsolutions. 3D-skanneri. Viitattu 25.4.2019. <https://www.an-cadsolutions.fi/tuote-osasto/3d-skannerit/>.

AN-Cadsolutions. Käänteinen suunnittelu. Viitattu 23.1.2019. <https://www.an-cadsolutions.fi/kaanteinen-suunnittelu/>

Artec 3D. Artec Eva>Specification. Viitattu 5.5.2019. https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva?keyword=eva%20artec&qclid=EA1aIQobChMImNanzZmE4glVBe-WaCh2mCQ6BEAAYASABEgKS0_D_BwE#specifications

Automationworld. New Compact R2000 detection Laser Scanner leverages true Time-of-Flight technology and delivers precise 460-degree scanning, with intuitive user-configurable detection fields. 2014. Viitattu 3.3.2019. <https://www.automationworld.com/article/new-compact-r2000-detection-laser-scanner-leverages-true-time-flight-technology-and-delivers>

Chougule, V.N.: Gosavi, H.S.: Dharwadkar, M.M. & Gaind, A.A. 2018. Review of Different 3D Scanners and Scanning Techniques. Viitattu 25.1.2019. <http://iosrjen.org/Papers/RDME-2018/Volume-2/8.%2041-44.pdf>

Clark, J. 3D Scanning Services Cost. Viitattu 5.5.2019. <https://www.neomek.com/resources/3d-scanning-services-cost/>

Crump, C. 2007. 3-D, Non-Contact Scanning for Inspection: Info for Moldmakers. Viitattu 28.1.2019. <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/3-d-non-contact-scanning-for-inspection-what-moldmakers-need-to-know>

Ems-Usa. 3D knowledge center. > 3D Scanning Technologies Overview Viitattu 26.1.2019. <https://www.ems-usa.com/tech-papers/3D%20Scanning%20Technologies%20pdf>

Europac3d. Parametric solid model. Viitattu 10.3.2019. <https://europac3d.com/products/parametric-solid-model/>

Europac3d. Polygonal mesh. Viitattu 10.3.2019. <https://europac3d.com/products/polygonal-mesh/>

Flisch, A.: Wirth, J.: Zanini, R.: Breitenstein, M.: Rudin, A.: Wendt, F.: Mnich, F. & Golz, R. Industrial Computed Tomography in Reverse Engineering Applications. Viitattu 22.2.2019. https://www.researchgate.net/publication/200018530_Industrial_Computed_Tomography_in_Reverse_Engineering_Application

Formlabs. How to Choose the Best 3D scanner: Accuracy, Scan Volume, And Budget. Viitattu 23.4.2019. <https://formlabs.com/blog/how-to-choose-a-scanner-accuracy-volume-budget/>

Georgopoulos, A.: Loannidis, CH. & Valanis, A. 2010. Assessing the performance of A structured light scanner. Viitattu 21.2.2019. <https://pdfs.semanticscholar.org/18a2/1037a3a846f407d599bea3e5006eb32b3fce.pdf>

Globalspec. LEARN MORE ABOUT 3D SCANNERS. Viitattu 2.3.2019. https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/3d_scanners

Guo, J.: Ding, F.: Jia, X. & Yan, D-M. 2018. Automatic and high-quality surface mesh generation for CAD models. <https://ac-els-cdn-com.ezproxy.turkuamk.fi/S0010448518302690/1-s2.0-S0010448518302690-main.pdf?tid=04f3cdbc->

Gupta, R. & Chaudhary, H. 2017. A Literature Review on Low Cost 3D Scanning Using Structure Light and Laser Light Scanning Technology. Viitattu 25.1.2019. <https://pdfs.semanticscholar.org/edfd/d32574cdca25dd0fc9245ddea42ac89a875c.pdf>

Hexagon. Global classic. Viitattu 3.3.2019. <https://www.hexagonmi.com/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/global-classic>

Higgins, S. 2004. Time-of-Flight vs. Phase-based Laser Scanners: Right Tool for the Job. Viitattu 28.1.2019. <https://www.spar3d.com/news/related-new-technologies/time-of-flight-vs-phase-based-laser-scanners-right-tool-for-the-job/>

Hoffmann, J.: Flisch, A. & Obrist, A. Adaptive CT scanning—mesh based optimisation methods for industrial X-ray computed tomography applications. Viitattu 22.2.2019. <https://pdfs.semanticscholar.org/cf1d/b42a1bf585797e0162688e8a169e23332077.pdf>

Höglund, R. & Large, P. Direct reflex EDM technology for the surveyor and civil engineer. Viitattu 28.1.2019. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-208582/022543-010D_TrimbleS6_DR_WP_1104_lr.pdf

Instrumentic. 3D scanner. Viitattu 23.2.2019. <http://www.instrumentic.info/en/hardware/scanner-3d.html>

Isinstruments. Modulated 3D cross-correlation Light Scattering. Viitattu 9.3.2019. <https://isinstruments.ch/en/technology/dynamic-light-scattering-dls/modulated-3d-cross-correlation-technology>

Javaid, M.: Haleem, A. & Kumar, L. 2019. Current status and applications of 3D scanning in dentistry. Viitattu 25.1.2019. https://ac-els-cdn-com.ezproxy.turkuamk.fi/S2213398418301593/1-s2.0-S2213398418301593-main.pdf?tid=e138703e-5072-44a0-8e21-1c14cf9caab9&ac-dnat=1548422587_cb0cf7e76c17cdf8a88be9009e7ad736

Laserdesign. 3D scanning technology – Hard Work That Looks Like “Magic”. Viitattu 10.3.2019. <https://www.laserdesign.com/what-is-3d-scanning>

Leanmec Oy.> Palvelut. Viitattu 23.1.2019. <https://www.leanmec.fi/palvelut/> > Palvelut

Mendricky, R. 2016. DETERMINATION OF MEASUREMENT ACCURACY OF OPTICAL 3D SCANNERS. Viitattu 29.1.2019 http://www.mmscience.eu/content/file/archives/MM_Science_2016183.pdf

Mymechatronics.Laser rangefinder. Viitattu 8.3.2019. <http://mymechatronics.pbworks.com/w/page/74907566/Laser%20Rangefinder>

NeoMek. 3D Scanning Service Cost. Viitattu 2.5.2019. <https://www.neomek.com/resources/3d-scanning-services-cost/>

NeoMetrix Technologies, Inc. What you need to know about 3D scanning. Viitattu 3.3.2019. <http://3dscanningservices.net/blog/need-know-3d-scanning/>

- Optimet. Technology. Our technology. Viitattu 23.2.2019. (<https://www.optimet.com/technology.php>).
- Peivari, A. & Taabbodi, B. A. 2010. Reliable 3D Laser Triangulation-based Scanner with a New Simple but Accurate Procedure for Finding Scanner Parameters. Viitattu 29.1.2019. https://www.researchgate.net/publication/228998226_A_Reliable_3D_Laser_Triangulation-based_Scanner_with_a_New_Simple_but_Accurate_Procedure_for_Finding_Scanner_Parameters
- Pezzati, L. & Fontana, R. N.d. 3D Scanning of Artworks. Viitattu 25.1.2019. <http://www.science4heritage.org/COSTG7/booklet/chapters/3D2.htm#3.2.1>
- Ritmindustry. 3D measuring arms, Laser trackers. Viitattu 3.3.2019. <http://ritmindustry.com/catalog/3d-measuring-arms-laser-trackers/portable-3d-measuring-arm-with-laser-scanner-integrated-2/>
- Sitnik, R. & Karaszewski, M. 2008. Optimized point cloud triangulation for 3D scanning systems. Viitattu 9.3.2019. https://www.researchgate.net/publication/229838769_Optimized_point_cloud_triangulation_for_3D_scanning_systems
- Slidefirmsscanner. Morales, C. Viitattu 3.3.2019. <http://slideandfilmsscanner.com/david-sls-2-structured-light-3d-scanner-review/>
- Tapiovaara, M.: Pukkila, O. & Miettinen, A. Röntgensäteily diagnostiikassa. s. 1-101. Viitattu 22.2.2019. https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja3_1.pdf/a825da96-784a-4868-80a7-3a3d33549257
- Tito, A. Photogrammetry: A Study of Image-Based Modeling. 2004. Viitattu 2.3.2019. <https://www.awn.com/vfxworld/photogrammetry-study-image-based-modeling>
- Triangulation. Viitattu 22.2.2019. <https://www.mdpi.com/1424-8220/9/9/7021>
- Upadhyay, N. 2014. Basic of Photogrammetry. Viitattu 5.5.2019. http://www.gisresources.com/basic-of-photogrammetry_2/
- Vermeulen, M.M.P.A.: Rosielle P.C.J.N. & Schellekens, P.H.J. 1998. Design of a High-Precision 3D-Coordinate Measuring Machine. Viitattu 26.1.2019. https://ac-els-cdn-com.ezproxy.turkuamk.fi/S0007850607628716/1-s2.0-S0007850607628716-main.pdf?tid=9a9ab389-ee75-4b20-8fe6-0b8dc8826e9f&ac-dnat=1548494756_441cc072e61d1de470f27a27da82314d
- Xviewct. Computed tomography technology. How computed tomography works. Viitattu 3.3.2019. <http://www.xviewct.com/computed-tomography-technology/how-ct-works>