

Valtteri Niiranen

3D-LASERSKANNERIT KÄÄNTEISTEK- NIKASSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Ilari Laine
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Valtteri Niiranen: 3D-Laserskannerit käänteistekniikassa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Toukokuu 2023

Kolmiulotteisten (3D) skannausteknologioiden käyttö on tänä päivänä suuressa osassa käänteistekniikan prosessin toteutuksessa. 3D-skannereilla voidaan nopeasti tallentaa suuri määrä tietoa kohteesta ja muuttaa tieto digitaaliseen muotoon. Tämän vuoksi skannereiden käytöllä voidaan usein saavuttaa sekä taloudellisia, että ajallisia säästöjä.

Tässä työssä tutkitaan erityisesti 3D-laserskannauksen soveltuvuutta käänteistekniikan tarpeisiin ja millaisia rajoitteita laserskannauksen hyödyntämisessä voi esiintyä. Työssä selvitetään lyhyesti laserskannauksen tekniikka sekä skannerilla tallennetun tiedon käsittelyn vaiheet. Lisäksi työssä tutkitaan käänteistekniikan prosessia yleisellä tasolla ja selvitetään, miten laserskannausta voidaan hyödyntää osana käänteistekniikkaa teollisuuden ja tekniikan alan sovelluksissa.

Tämä työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksen muodossa ja se jakautuu neljään osaan. Osioista ensimmäinen käsittelee käänteistekniikkaa ja sen prosessia yleisesti. Työn toinen osio keskittyy erilaisiin skannaustekniikoihin ja skannereiden keräämän datan käsittelyyn. Kolmannessa osiossa tutkitaan tarkemmin laserskannauksen tekniikkaa ja sen tekniikan aiheuttamia rajoitteita. Neljännessä osiossa tarkastellaan laserskannauksen soveltuvuutta käänteistekniikkaan, muun muassa sen hyötyjä sekä sovelluskohteita. Lisäksi neljännessä osiossa vertaillaan markkinoilla saatavilla olevia 3D-skannereita ja niiden soveltuvuutta käänteistekniikan tarpeisiin.

Kirjallisuuskatsaus osoittaa, että laserskannaus on hyvin käänteistekniikan tarpeisiin soveltuva teknologia. Laserskannauksen hyödyntäminen käänteistekniikassa on lisääntynyt sen kehittymisen myötä ja sitä hyödynnetään yhä useammilla teollisuudenaloilla osana käänteistekniikan prosessia. Kuitenkin sovelluskohteesta ja sen asettamista vaatimuksista riippuen, laserskannauksella saattaa olla rajoitteita, jotka estävät teknologian hyödyntämisen käänteistekniikassa. Tämän kaltaisissa tilanteissa, jokin vaihtoehtoinen skannausteknologia saattaa palvella käänteistekniikan tarpeita laserskannausta paremmin.

Avainsanat: laserskannaus, kosketukseton skannaus, laserkolmiointi, lentoaikamittaus, käänteistekniikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KÄÄNTEISTEKNIikka.....	3
2.1 Määritelmä	3
2.2 Käänteistekniikan vaiheet.....	3
2.3 Käänteistekniikka teollisuudessa.....	4
3. KOLMIULOTTEINEN SKANNAUS.....	6
3.1 Skannaus.....	6
3.1.1 Kosketukselliset skannerit.....	7
3.1.2 Kosketuksettomat skannerit	8
3.2 Datan käsittely ja muuntaminen	9
3.2.1 Pistepilvi	9
3.2.2 Pistepilven datan käsittely.....	9
4. LASERSKANNAUS	11
4.1 Laserkolmiointi	11
4.2 Lentoaikamittaus ja vaihesiirto	12
4.3 Laserin rajoitteet skannauksessa	13
4.4 Geometrian aiheuttamat haasteet laserskannaukselle	15
4.5 Laserskannauksen valmistelu	16
5. LASERSKANNERIT OSANA KÄÄNTEISTEKNIikka.....	18
5.1 Laserskannereiden käyttö käänteistekniikassa.....	18
5.2 Laserskannauksen sovelluksia käänteistekniikassa	19
5.3 Skannausteknologioiden vertailu.....	20
6. YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	Kolmiulotteinen
CAD	engl. Computer-Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CCD	engl. Charge-Coupled Device, varauskytketty piiri
CMM	engl. Coordinate Measuring Machine, koordinaattimittauskone
LiDAR	engl. Light Detection and Ranging, valotutka

1. JOHDANTO

Insinööritekniikalla (engl. engineering) tarkoitetaan prosessia, jossa suunnitellaan, valmistetaan, kootaan ja ylläpidetään tuotteita ja järjestelmiä. Insinööritekniikassa on kaksi erilaista lähestymistapaa, suoratekniikka (engl. forward engineering) ja käänteistekniikka (engl. reverse engineering). Suoratekniikka on perinteisempi insinööritekniikan menetelmä, jossa prosessi etenee korkean tason suunnitelmista valmiin fyysisen systeemin toteuttamiseen. (Raja & Fernandes 2008, s. 2) Suoratekniikassa korostuvat luovuus, omaperäisyys ja ongelmanratkaisutaidot haluttujen tarpeiden ja haasteiden kohtaamiseksi (Wang 2010, s. 11).

Vaihtoehtoisia menetelmiä saatetaan kuitenkin tarvita, kun perinteiset suoratekniikan menetelmät eivät ole tarkoituksenmukaisia tai riittäviä. Tällaisissa tapauksissa voidaan suunnittelun apuna käyttää käänteistekniikkaa. Käänteistekniikka tarkoittaa olemassa olevien osien, alikokonaisuuksien tai tuotteiden toisintamista (Raja & Fernandes 2008, s. 2). Käänteistekniikka on niin kutsutusti ”ylhäältä alas” tapahtuva uudelleenkehitysprosessi, jossa kehitystyö aloitetaan jo olemassa olevasta kappaleesta (Wang 2010, s. 11). Käänteistekniikkaa voidaan hyödyntää monenlaisissa tilanteissa, joissa tarvitaan tietoa olemassa olevasta tuotteesta tai systeemistä. Joissakin tilanteissa käänteistekniikka saattaa olla jopa ainoa vaihtoehto tuotteen tai systeemin toiminnan tai ominaisuuksien selvittämiseksi.

3D-skannaus on yksi käänteistekniikan työkaluista. 3D-skannaus on nopea ja tarkka tapa muuntaa fyysinen kappale digitaaliseen muotoon (Haleem et al. 2022). Erilaisia skannausteknologioita on useita erilaisia, mutta niiden perusidea on keskenään samankaltainen valitusta teknologiasta riippumatta. Skannerit luovat kappaleesta digitaalisen version tallentamalla sen ulkopintojen koordinaatit x-y-z-muotoon (Haleem et al. 2022). Keskeisin ero skannereiden välillä liittyykin siihen tekniikkaan, jolla nämä ulkopintojen koordinaatit kerätään. Laserskannaus on yksi käänteissuunnittelussa hyödynnetty digitointimenetelmä. Sillä on useita etuja verrattuna muihin skannausmenetelmiin. Tästä huolimatta laserskannauksella on myös omat heikkoutensa, jotka asettavat rajoitteita sen hyödyntämiselle.

Tämän työn tavoitteena on kirjallisuuskatsauksen avulla selvittää, miten 3D-laserskannereita voidaan hyödyntää käänteistekniikan tarpeisiin ja mitä mahdollisuuksia niiden käyttö tarjoaa käänteistekniikassa. Lisäksi työssä selvitetään, mitä haasteita ja rajoitteita laserskannausteknologialla voi esiintyä käänteistekniikan käyttökohteissa.

Työn toisessa luvussa tutustutaan tarkemmin käänteistekniikkaan ja sen teollisuuden sovelluskohteisiin. Kolmannessa luvussa käsitellään 3D-skannausta yleisellä tasolla sekä tutustutaan lyhyesti erilaisiin 3D-skannereihin ja skannereiden luomien pistepilvien käsittelyyn. Työn neljäs luku käsittelee laserskannauksen tekniikoita, haasteita sekä laserskannauksen valmisteluprosessia. Työn viimeinen luku käsittelee laserskannereiden hyödyntämistä eri käänteistekniikan käyttökohteissa. Lisäksi luvussa vertaillaan laserskannereiden ominaisuuksia muiden markkinoilta saatavien 3D-skannerien ominaisuuksiin sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta käänteistekniikan sovelluksiin.

Tämän työn kirjoittamisen apuna on hyödynnetty ChatGPT- tekoälyä. Tekoälyä on hyödynnetty erityisesti lauserakenteiden selkeyttämiseen ja vaihtoehtoisten ilmaisutapojen ja käännösten etsimiseen. Tekoälyn avustuksella kirjoitettu teksti on tarkistettu asiavirheiden varalta.

2. KÄÄNTEISTEKNIikka

Käänteistekniikka on nykypäivänä tärkeässä roolissa insinööritekniikan alalla. Tässä luvussa käsitellään käänteistekniikkaa ja tutustutaan käänteistekniikan prosessiin. Lisäksi luvussa esitellään muutamia yleisimpiä käänteistekniikan teollisuuden käyttötarkoituksia.

2.1 Määritelmä

Käänteistekniikka on uudelleenkeksimisen työkalu, joka perustuu aiemman työn tiedon sekä datan keräämiseen ja hyödyntämiseen. Se on prosessi, joka pyrkii uudelleenluomaan tai selvittämään kappaleen rakenteen, toiminnan ja ominaisuudet mittauksen, analyysin ja testauksen avulla. (Wang 2010, s.1) Käänteistekniikka mahdollistaa tuotteen toiminnan ymmärtämisen ja kaksoiskappaleen tai kopion luomisen kappaleesta (Anwer & Mathieu 2016). Käänteistekniikassa keskitytään arvioimaan ja analysoimaan alkuperäisiä osia sekä löytämään realistisiin rajoituksiin sopivia vaihtoehtoisia insinööritieteellisiä ratkaisuja uuden osan keksimiseksi. Käänteistekniikan ensisijaisena tavoitteena on keksinnön avulla luoda uusi osa, joka vastaa alkuperäisen osan muotoa, sopivuutta ja toimintaa perustuen alkuperäisen osan mittaukseen ja analyysiin. (Wang 2010, s.2)

Käänteistekniikalla voidaan parantaa tuotteiden suorituskykyä ja hyödyntää sisällytettyä tietoa uudessa suunnittelussa (Anwer & Mathieu 2016). Käänteistekniikka ei kuitenkaan mahdollista täysin identtisen kopion valmistamista alkuperäisestä osasta teknisien syitten takia. Lisäksi on tärkeää huomioida, että käänteistekniikassa kaikki johtopäätökset perustuvat mitattuun dataan ja testattuihin tuloksiin. Tämän vuoksi on tärkeää, että käänteistekniikassa kerätty data on tarkkaa ja oikein tulkittua. (Wang 2010, s. 210)

2.2 Käänteistekniikan vaiheet

Yleisesti käänteistekniikan prosessi koostuu kolmesta vaiheesta. Nämä kolme vaihetta ovat datan kerääminen, datan käsittely sekä mallin muodostaminen. (Motavalli 1998; Raja & Fernandes 2008, s. 4) Kuvassa 1 on esitelty käänteistekniikan prosessin keskeisimmät vaiheet, kun fyysiselle kappaleelle tuotetaan CAD-malli (engl. Computer Aided Design).



Kuva 1. Käänteistekniikan vaiheet (mukaillen lähteestä Helle & Lemu 2021, s. 5256).

Ensimmäinen vaihe sisältää mittaukset ja datan keräämisen alkuperäisestä kappaleesta. Ensimmäisen vaiheen aikana tulisi myös kerätä mahdollisimman paljon muuta oleellista tietoa alkuperäisestä kappaleesta. Tämä tieto voi olla esimerkiksi dokumentaatioita, olemassa olevaa teknistä dataa ja ilman patenttioikeutta olevia piirustuksia. Tämän jälkeen kerätty data analysoidaan ja tulkitaan. (Wang 2010, s. 11)

Datan käsittelyvaiheen ja mallin muodostamisvaiheen sisältö riippuu datan keräämiseen käytetystä tekniikasta ja datan luonteesta. Mikäli kappaleen data muodostuu käsin mitatuista koordinaatti- ja mittapisteistä, eroaa datan käsittely esimerkiksi skannereilla kerätyn datan käsittelystä. Tämä johtuu muun muassa mittapisteiden lukumäärien eroista sekä mittaustarkkuuden vaihteluista eri menetelmien välillä. Esimerkiksi skannereilla kerätyn datan käsittelyssä voi olla tarpeen korjata skannerin aiheuttamia virheitä ja poistaa kohinaa, kun taas käsin mitatun datan käsittelyssä voi olla tarpeen käyttää interpolointia ja muita menetelmiä esimerkiksi puuttuvien tietojen täyttämiseksi. Skannereilla kerätyn datan käsittelyä käsitellään tarkemmin alaluvussa 3.2.

Käänteistekniikkaa hyödyntäessä ja käyttötarkoitukseen sopivaa tekniikkaa valittaessa täytyy huomioida useita lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä. Raja ja Fernandes (2008, s. 5) mukaan näitä tekijöitä ovat muun muassa käänteistekniikan käytön tarkoitus, analysoitavien kappaleiden määrä ja koko, kappaleiden monimutkaisuus, materiaalin koostumus sekä tarvittava tarkkuustaso lopputuloksissa.

2.3 Käänteistekniikka teollisuudessa

Nykypäivänä käänteistekniikkaa hyödynnetään laajasti useisiin erilaisiin käyttötarkoituksiin, kuten erilaisissa teollisuuden suunnittelutehtävissä ja tuotannoissa. Taulukko 1 esittelee erilaisia käänteistekniikan teollisuuden sovelluskohteita.

Taulukko 1. *Käänteistekniikan käyttötarkoituksia teollisuudessa. Taulukko perustuu teokseen (Raja & Fernandes 2008, s. 3–4). Osa esimerkeistä on omia esimerkkejä ja ne on erotettu lainatuista esimerkeistä kursivoinnilla.*

Käänteistekniikan käyttötarkoitus	Esimerkkejä
Alkuperäinen valmistaja ei ole enää toiminnassa.	Lentokoneen varaosien valmistus, kun kone on ollut käytössä pitkään.
Alkuperäinen valmistaja ei enää tuota tuotetta.	Tuote on vanhentunut, mutta osalle on yhä tarvetta.
Alkuperäisen tuotesuunnitteludokumentation puute.	Alkuperäinen tuotesuunnitteludokumentatio on kadonnut tai sitä ei ole koskaan ollutkaan.
Tietojen luominen osan korjaamiseksi tai valmistamiseksi, kun CAD-tietoja ei ole.	Vanhojen autojen tai laitteiden osat, korvaavat osat vanhoille valmistuslaitteille.
Tarkastus ja laadunvalvonta – valmistetun osan vertaaminen sen CAD-malliin tai standardoituihin kappaleisiin.	<i>Oman tuotannon tai kolmannen osapuolen toimittajien valmistamien osien tarkastaminen tarkkuuden ja yhtenäisyyden varmistamiseksi.</i>
Huonojen ominaisuuksien poistaminen tuotteesta.	Suunnitteluvirheiden tai heikkouksien tunnistaminen, jotka aiheuttavat kulumista tai muita ongelmia.
Hyvien ominaisuuksien vahvistaminen tuotteessa perustuen pitkäaikaiseen käyttöön.	<i>Tuotteita voidaan parantaa analysoimalla niiden kulumista.</i>
Kilpailijoiden tuotteiden hyvien ja huonojen ominaisuuksien analysointi.	<i>Kilpailuetujen tai parannusmahdollisuuksien tunnistaminen.</i>
Uusien tapojen tutkiminen tuotteen suorituskyvyn ja ominaisuuksien parantamiseksi.	<i>Käänteistekniikan avulla voidaan luoda prototyyppisiä tai testata uusia suunnittelukonsepteja.</i>

Taulukon 1 perusteella voidaan todeta, että käänteistekniikkaa hyödynnetään varsin kattavasti eri teollisuudenaloilla erilaisiin käyttötarkoituksiin. Samalla taulukon esimerkit myös osoittavat, että käänteistekniikalla on tärkeä rooli teollisuudessa. On kuitenkin tärkeää huomioida, että taulukossa esitetyt käyttötarkoitukset ovat vain muutamia esimerkkejä käänteistekniikan sovelluskohteista, ja todellisuudessa sovellusmahdollisuuksia on huomattavasti enemmän (Raja & Fernandes 2008, s. 4).

3. KOLMIULOTTEINEN SKANNAUS

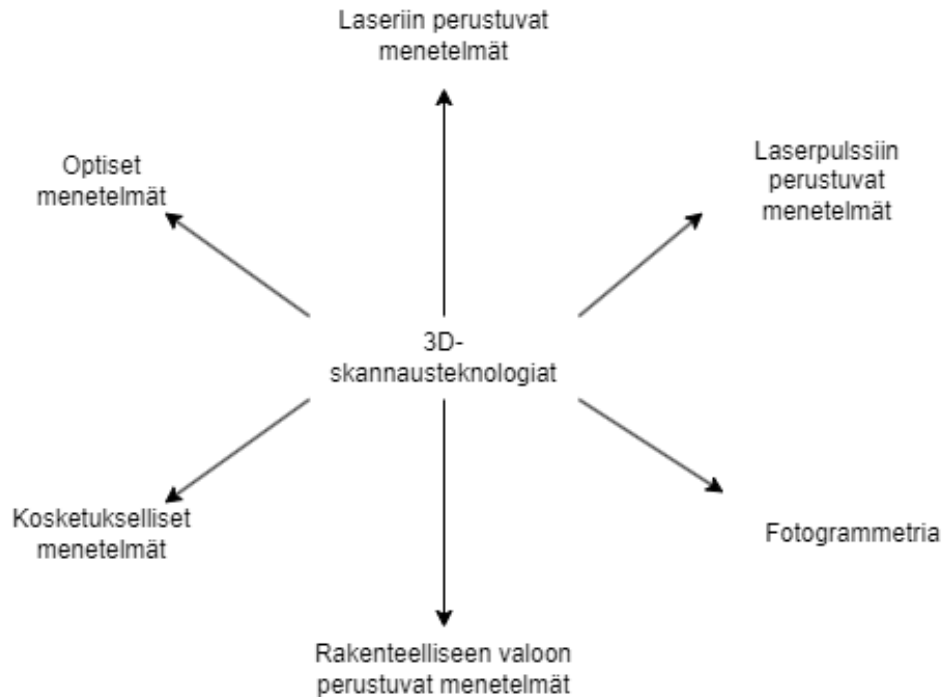
3D-skannaus on yksi käänteissuunnittelun työkaluista ja nykypäivänä sitä hyödynnetään useissa käänteistekniikan sovelluksissa. Tässä luvussa tutustutaan 3D-skannaukseen ja sen ominaisuuksiin. Lisäksi käsitellään yleisimpiä käänteistekniikassa käytettäviä skannausteknologioita ja niiden yleisimpiä ominaisuuksia. Lopuksi luvussa käsitellään 3D-skannereiden keräämän tiedon käsittelyä.

3.1 Skannaus

Kolmiulotteinen skannaus voidaan määritellä prosessiksi pistekoordinaattien keräämiseksi osien pinnoilta (Motavalli 1998, Mian et al. 2015 mukaan). 3D-skannereilla voidaan nopeasti mitata monimutkaisia kappaleita ja merkittävästi nopeuttaa suunnittelun etenemistä (Haleem et al. 2022 s. 163). Skannaaminen on tehokas työkalu, jolla voidaan kerätä kappaleesta tarkkoja tietoja todella nopeasti, verrattuna perinteisiin menetelmiin, kuten valokuvaukseen ja käsin mittaukseen.

Sen lisäksi, että kappaleista saadaan skannaamalla nopeasti kerättyä dataa, nopeuttaa skannaus myös mallinnusvaihetta. Perinteisessä CAD-mallinnuksessa saattaa kulua useita tunteja valmistaa malli monimutkaisesta kappaleesta. 3D-skannaus auttaa vähentämään toimivan 3D-mallin luomiseen kuluvaa aikaa, täten tuoden merkittäviä säästöjä taloudellisesti. (Haleem et al. 2022 s. 161)

Kuvassa 2 on esitelty muutamia yleisimpiä teollisuudessa hyödynnettäviä skannausteknologioita. Näiden teknologioiden toimintaperiaatteet ja ominaisuudet eroavat toisistaan, vaikuttaen niiden sovelluskohteisiin ja käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi teknologian tarkkuus tai liikuteltavuus voivat olla käyttöä rajoittavia tekijöitä.



Kuva 2. Erilaisia teollisuudessa hyödynnettäviä 3D-skannausteknologioita. (muokailen lähteestä Haleem et al. 2022)

3D-skannausteknologioiden monipuolisuudesta huolimatta 3D-skannerit voidaan jakaa karkeasti kahteen eri kategoriaan niiden toimintaperiaatteiden mukaisesti, kosketuksellisiin ja kosketuksettomiin skannereihin (Helle & Lemu 2021, s. 5256). Näitä käsitellään tarkemmin alaluvuissa 3.1.1 ja 3.1.2.

3.1.1 Kosketukselliset skannerit

Kosketuksellinen skanneri tallentaa tietoa kappaleen pinnanmuodoista hyödyntäen antureita, jotka koskettavat kappaleen pintaa. (Helle & Lemu 2021, s. 5256) Kosketukselliset skannerit perustuvat CMM-tekniikkaan (Raja & Fernandes 2008, s. 5–6). Kosketuksellisessa skannerissa anturin on osuttava kappaleeseen rekisteröidäkseen pisteen. Tämä johtaa siihen, että kappaleen pintaan syntyy kosketuksesta paine, joka säilyy mittauksen ajan. Tämä aiheuttaa teknologian hyödyntämiseen rajoitteen muun muassa pehmeiden ja helposti muokkautuvien kappaleiden ja materiaalien kanssa. (Raja & Fernandes 2008, s. 6) Esimerkiksi helposti muokkautuvan kappaleen tapauksessa, kappaleen ulkopintaan kohdistuva paine saattaisi aiheuttaa kappaleessa muodonmuutosta, joka vääristäisi mittaustulosta. Tämän lisäksi kosketuksellinen skannaus on varsin hidas tapa suorittaa kappaleen kolmiulotteinen skannaus. Tämä johtuu siitä, että kosketuksel-

linen skanneri vaatii jokaisen tallennettavan pisteen koskettamista skannerilla, mikä hidastaa skannausprosessia merkittävästi. (Raja & Fernandes 2008, s. 6; Helle & Lemu 2021, s. 5256)

3.1.2 Kosketuksettomat skannerit

Kosketuksettomien skannereiden toimintaperiaatteet vaihtelevat paljon valitun teknologian mukaan. Kosketuksettomia skannausteknologioita ovat muun muassa erilaiset optiset menetelmät kuten laserskannerit, fotogrammetria, sekä rakenteelliseen valoon pohjautuvat skannerit. Kosketuksettomat teknologiat käyttävät pinnanmuotojen tunnistamiseen erilaisia tekniikoita, kuten esimerkiksi kolmiointia (engl. triangulation), lentoaikamenetelmää (engl. time-of-flight), rakenteellista valoa (engl. structured light) tai erilaisia kuvankäsittelyalgoritmeja. (Raja & Fernandes 2008, s. 37) Liite A sisältää taulukoituna erilaisia kosketuksettomia teknologioita hyödyntäviä skannereita sekä niiden ominaisuuksia.

Kaikille kosketuksettomille skannereille on kuitenkin yhteistä, ettei niiden nimensä mukaisesti tarvitse koskettaa kappaletta kerätäkseen pistekoordinaatteja kappaleen pinnasta. Tämä mahdollistaa muun muassa haastavien pinnanmuotojen sekä helposti muokkaantuvien ja pehmeiden materiaalien skannaamisen. Tämänkaltaisten kappaleen ominaisuuksien skannaaminen kosketuksellisella skannerilla voisi olla haastavaa tai jopa mahdotonta. Lisäksi kosketuksettomien skannereiden etuna on nopeus, mutta niissä on heikko tarkkuus verrattuna kosketuksellisiin metodeihin (Helle & Lemu 2021, s. 5256). Yksittäisellä kosketuksettomalla skannerilla voidaan tallentaa jopa useita miljoonia datapisteitä sekunnissa (Liite A).

Skannereiden tarkkuudet saattavat vaihdella suuresti eri teknologioiden välillä (Haleem et al. 2022, s. 162). Kosketuksettomien skannereiden tyypillinen toleranssi on $\pm 0,025$ mm – 0,200 mm välillä, toisin kuin kosketuksellisilla skannereilla, joilla toleranssit ovat yleensä +0,010 mm – 0,020 mm välillä (Raja & Fernandes 2008, s. 6). Kosketuksettomilla skannereilla ei siis yleensä päästä yhtä tarkkoihin lopputuloksiin kuin kosketuksellisilla skannereilla. Tarkkuuserot näiden välillä voivat olla kymmenistä mikrometreistä satoihin mikrometreihin. Tämä voi rajoittaa kosketuksettomien skannereiden soveltuvuutta käyttötarkoituksiin, joissa vaaditaan erittäin tarkkaa lopputulosta.

3.2 Datan käsittely ja muuntaminen

3D-skannereilla saadaan kerättyä nopeasti suuri määrä dataa. Kerätty data täytyy kuitenkin käsitellä, jotta sitä voidaan hyödyntää digitaalisen mallin luomisessa. Tässä luvussa kerrotaan lisää skannereiden keräämien pistepilvien käsittelystä ja muuntamisesta jatkotoimenpiteitä varten.

3.2.1 Pistepilvi

3D-skannauksen tuotoksena syntyy pistepilvi (Helle & Lemu 2021, s. 5256). Pistepilvi on useiden mittapisteiden muodostama joukko, joka kuvaa skannatun kohteen pinnanmuotoja ja muodostaa niin sanotun pilven. Pistepilven data sisältää kappaleen tilakoordinaatit ja joitakin kappaleen fyysisiä parametrejä, kuten informaatiotiheyttä tai pisteiden väritietoja. (Huang et al. 2011, s. 3485)

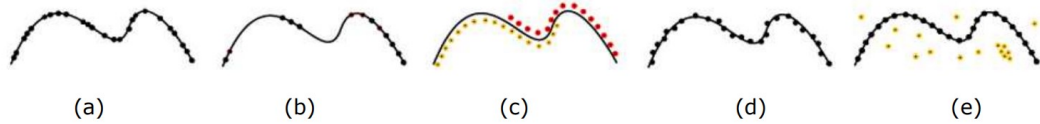
Kerätty data tallennetaan usein tiedostoon, jossa kappaleen tilakoordinaatit on tallennettu x-y-z-muotoon. Jokaiseen pisteeseen on myös usein liitetty musta-valko-intensiiteettitiedot tai väritiedot kyseisestä mittauspisteestä. (Helle & Lemu 2021, s. 5256) On kuitenkin tärkeää huomioida, että vaikka korkealla resoluutiolla skannatun kappaleen pistepilvi kauempaa tarkasteltuina näyttääkin muodostavan kappaleen, ei pistepilvi itsessään muodosta kappaletta tai sen pintoja (Huang et al. 2011, s. 3486). Tämän vuoksi pistepilven dataa tulee käsitellä usein erillisillä ohjelmistoilla, jotka muodostavat pistepilvistä pintoja ja yhtenäisiä kappaleita CAD-ohjelmistoissa käsiteltäviksi.

3.2.2 Pistepilven datan käsittely

Useimmat CAD-ohjelmistot eivät pysty yksinään käsittelemään pistepilvien suurta määrää dataa. Lisäksi pistepilvissä epätarkkuutta ja virhettä aiheuttavia tekijöitä on useita. Tämän vuoksi usein tarvitaan erillinen ohjelmisto, joka pystyy käsittelemään pistepilvien dataa ja muuntamaan pistepilvet CAD-ohjelmistoissa käytettävään muotoon (Helle & Lemu 2021, s. 5256).

Pisteiden käsittelyssä pyritään vähentämään muun muassa kohinaa ja pisteiden määrää, hyödyntäen erilaisia suodatinalgoritmeja (Helle & Lemu 2021, s. 5256). Lisäksi suodatuksessa pyritään poistamaan epäolennaiset pisteet kappaleen pistepilvestä. Yksi suurimmista haasteista datan suodatuksessa on niiden pisteiden valitseminen, jotka sisältävät olennaista tietoa skannattavan kappaleen muodoista (Huang et al. 2011, s. 3486). Yksinkertaisimmillaan tämä voi käytännössä tarkoittaa esimerkiksi skannattavan kappaleen lähistöllä sijaitsevia ylimääräisiä kappaleita ja niiden erottamista varsinaisesta skannattavasta kappaleesta.

Pistepilvissä virhettä aiheuttavia tekijöitä ovat muun muassa heikko näytteenottitiheys, kohina, poikkeavat pisteet, huono kohdistaminen sekä puuttuva data (Helle & Lemu, 2021, s. 5258). Kuva 3 havainnollistaa näitä tekijöitä.



Kuva 3. Pistepilvien virheitä. Kuvassa yhtenäisellä viivalla kuvataan todellista pinnanmuotoa ja pisteillä mitattuja mittapisteitä. Virheitä aiheuttavia tekijöitä ovat muun muassa: (a) epätasainen näytteenotto, (b) puuttuva data, (c) heikko kohdistus, (d) epätarkka data sekä (e) poikkeamat. (Montlahuc et al. 2019)

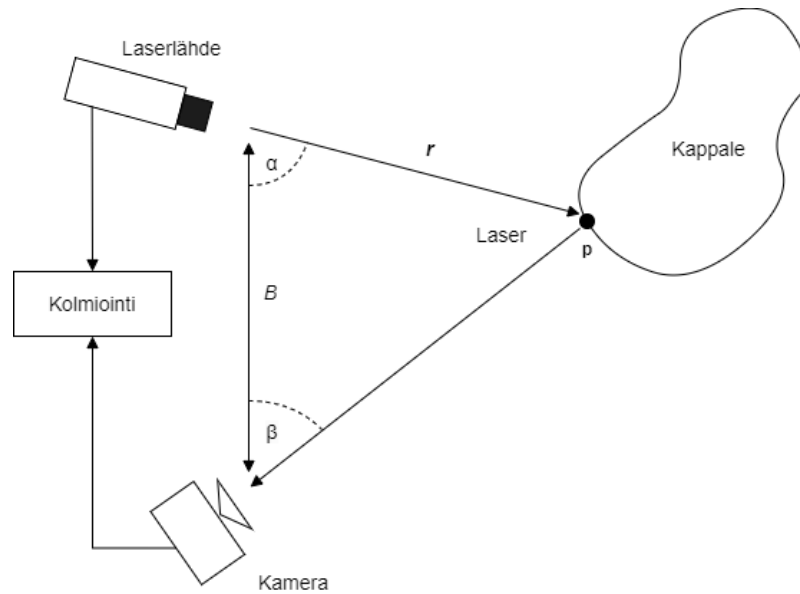
Tarkan skannaustuloksen varmistamiseksi on tärkeää ottaa huomioon ja tarpeen mukaan pyrkiä eliminoimaan virhettä aiheuttavat tekijät. Osaan näiden tekijöiden aiheuttamista vaikutuksista voidaan jälkikäteen pyrkiä vaikuttamaan esimerkiksi erilaisilla algoritmeilla ja suodatustekniikoilla. Kuitenkin esimerkiksi skannerin heikosta resoluutiosta johtuvaa mittapisteiden puuttumista on haasteellista korjata jälkikäteen.

4. LASERSKANNAUS

Laserskannaus on yksi kosketuksettomista 3D-skannaustekniikoista. Muihin kosketuksettomiin 3D-skannaustekniikoihin verrattuna laserskannaus on edullinen, suhteellisen luotettava ja tarkka skannaustekniikka (Vukašinović et al. 2010, s. 265). Pääasiallisesti laserskannereiden tekniikka perustuu yhteen seuraavista kolmesta periaatteesta: kolmiointiin, lentoaikamittaukseen tai vaihesiirtoon (engl. phase shifting) (Ebrahim 2011, s. 16–17).

4.1 Laserkolmiointi

Useat laserskannaustekniikat perustuvat laserkolmiointiin. Laserkolmiointi on hyvin tunnettu keino mitata ja kerätä dataa kappaleista lyhyillä tai keskipitkillä etäisyyksillä. (Javaid et al. 2021, s. 4–5) Laserkolmioinnilla voidaan määrittää pisteen sijainti tarkasteluilta pinnoilta, kun tunnetaan valonlähteen ja skannerin CCD-kennolle (engl. charge-coupled device sensor) kappaleesta projisoituneen heijastuksen väliset ominaisuudet, kuten kulma ja etäisyys. (Vukašinović et al. 2010, s. 266) Laserkolmioinnissa lasersäde heijastetaan tunnetussa kulmassa kohteen pinnalle. Laserin heijastus palaa skannerin kennolle, muodostaen kolmion, jolla on kaksi tunnettua kulmaa ja sivu (ks. Kuva 4). Näin ollen pinnan etäisyys sensorista voidaan laskea hyödyntäen trigonometriaa. (Javaid et al. 2021, s. 5) Usein laserkolmioinnin nopeuttamiseksi mitattavan kohteen yli pyyhkäistään laserraita yhden laserpisteen sijaan (Ebrahim 2011, s. 18). Tämä nopeuttaa skannausta, sillä yhden datapisteen sijaan voidaan tallentaa useampia pisteitä yhdellä pyyhkäisyllä.



Kuva 4. Yksinkertaistettu esimerkki laserkolmioinnista. B , α ja β ovat yleensä tunnetut muuttujat, joiden arvo määritellään systeemin kalibrointivaiheessa (mukailen lähteestä Raja & Fernandes 2008, s. 19).

Laserkolmiointiin perustuvilla menetelmillä on muihin lasermenetelmiin verrattuna rajoitettu käyttöetäisyys, mutta niiden etuna on niiden suuri tarkkuus. Kolmiointiin perustuvilla laserskannereilla voidaan saavuttaa jopa kymmenien mikrometrien tarkkuus. (Ebrahim 2011, s. 19)

4.2 Lentoaikamittaus ja vaihesiirto

Lentoaikamittaus perustuu lähetetyn laserpulssin takaisinheijastumiseen. Lentoaikamittauksessa kohteen etäisyys mitataan lähettämällä laserpulssi kohteeseen ja mittaamalla sen heijastumiseen kuluva aika t . Etäisyys kohteeseen voidaan laskea kaavalla

$$x = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (1)$$

jossa x on etäisyys mitattavaan kohteeseen. Koska valon nopeus c on tarkasti tunnettu vakio, on ainoa mittaustulokseen vaikuttava muuttuja laserin heijastumiseen kuluva aika t . Tämän vuoksi lentoaikamittauksen tarkkuus riippuu siitä, miten tarkasti laserin heijastumiseen kuluva aika voidaan mitata. (Ebrahim 2011, s.16–17) Esimerkiksi laajasti pitkän matkan mittauksissa hyödynnettävä LiDAR-teknologia (engl. Light Detection and Ranging) perustuu lentoaikamenetelmän hyödyntämiseen (Incoronato et al. 2021, s. 1).

Vaihesiirtoon perustuvat skannereissa vertaillaan heijastuvan laserin vaihe-eroa laserin vakiovaiheeseen (Ebrahim 2011, s. 17). Vaihesiirrossa käytetään sinimuotoista moduloitua lasersädettä, jonka heijastumista analysoimalla voidaan määrittää vaihe-ero.

Vaihe-eron suuruus on suoraan verrannollinen lasersäteen heijastumiseen kuluvaan aikaan, joka on puolestaan suoraan verrannollinen lasersäteen kulkemaan matkaan. Mittattavan kohteen etäisyys x voidaan laskea yhtälöllä

$$x = c \cdot \frac{T_1}{4} \cdot \pi \cdot f, \quad (2)$$

jossa c on valon nopeus, T_1 on vaihe-ero ja f on modulaatiotaajuus. (Shenga et al. 2014, s. 7595)

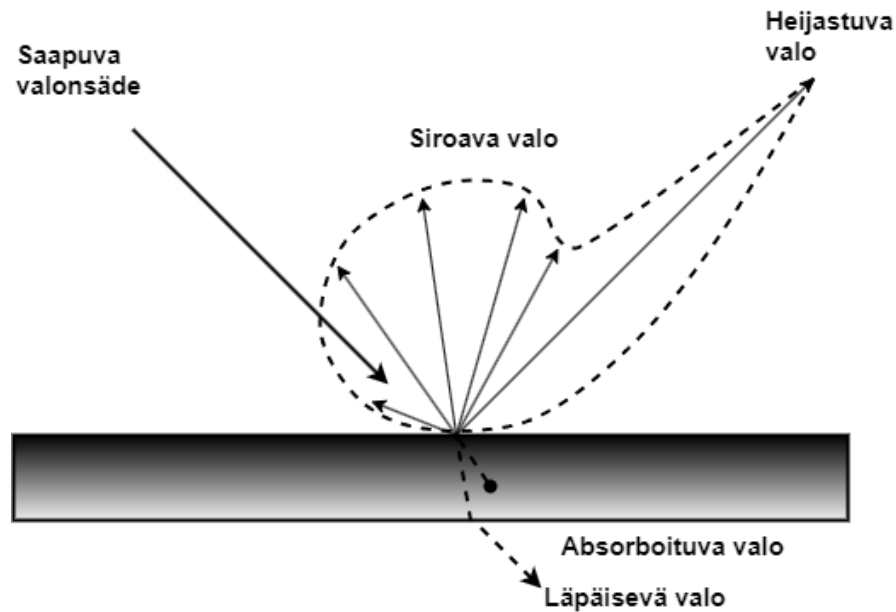
Lentoaikamittaukseen ja vaihesiirtoon perustuvien skannereiden etuna on niiden mittausetäisyys, joka vaihtelee kymmenistä metreistä satoihin metreihin. Menetelmien heikkoutena on kuitenkin niiden suhteellisen huono tarkkuus. Nämä skannerit soveltuvatkin parhaiten suurten kohteiden, kuten rakennusten ja suurten ympäristöjen skannaamiseen. (Ebrahim 2011, s.18–19)

4.3 Laserin rajoitteet skannauksessa

Laserskannerit vaativat toimiakseen heijastuksen lähettämästään säteestä. Tämän vuoksi laserskannerin toiminnan kannalta on välttämätöntä, että ainakin jonkin verran valoa heijastuu skannerin kennolle säteen tulo- tai havainnointikulmasta riippumatta. (Vukašinović et al. 2010, s. 267)

Skannattavan kappaleen pinnan ominaisuudet vaikuttavat oleellisesti lasersäteen heijastumiseen ja käyttäytymiseen kappaleen pinnalla. Skannauksen kannalta haasteellimpia materiaaleja ovat värilliset, läpinäkyvät ja heijastavat pinnat (Raja & Fernandes 2008, s. 38). Tällaisia pintoja on haasteellinen skannata, sillä pinnan ominaisuudet vaikuttavat siihen heijastetun laserin käyttäytymiseen. Esimerkiksi kappaleen pinnan väri voi vaikuttaa lopputulokseen, sillä eri värit suodattavat heijastuvan valon erilaisia spektrejä (Vukašinović et al. 2010, s. 266).

Lähes kaikista todellisuuden kappaleiden pinnoista sekä heijastuu, että siroaa valoa. Kappaleesta heijastuvan ja siroavan valon määrä ja suhde riippuu kappaleen pinnan ominaisuuksista ja laserin tulokulmasta. Kappaleen pinnan ominaisuuksiin puolestaan vaikuttavat muun muassa kappaleen kemiallinen koostumus, mikrorakenne ja pinnan karheus. Lisäksi osa valosta saattaa kulkea kappaleen läpi tai absorboitua kappaleeseen. (Vukašinović et al. 2010, s. 267) Kuvassa 5 on havainnollistettu valonsäteiden käyttäytymistä kappaleen pinnalla.



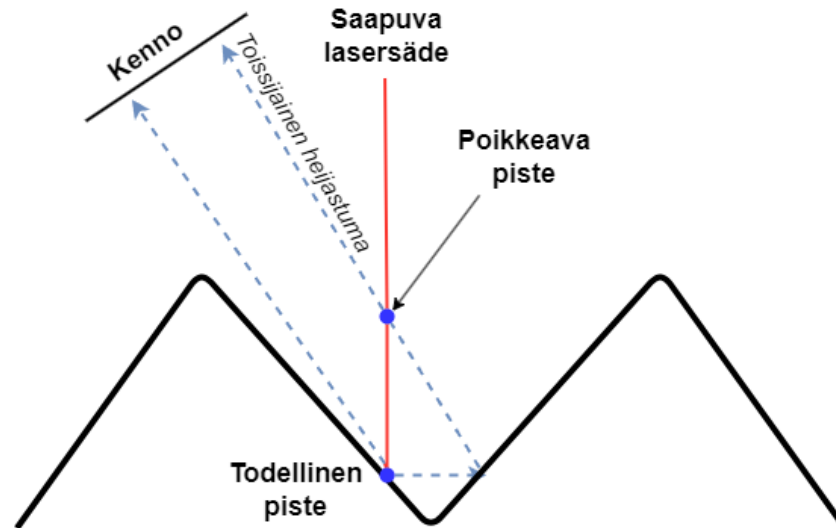
Kuva 5. Valonsäteiden heijastuminen, siroaminen, absorboituminen ja läpäisy (mukailien lähteestä Vukašinović et al. 2010, s.267).

Vukašinović et al. (2010, s. 267) mukaan kappaleen pinnalle tulevan valon energian muuntumista voidaan kuvata yhtälöllä

$$L_i = L_d + L_s + L_a + L_t. \quad (3)$$

Yhtälössä (3) L_i kuvaa pinnalle saapuvan valon energiaa, L_d siroavan valon energiaa, L_s heijastuvan valon energiaa, L_a absorboituvaa energiaa ja L_t kappaleen läpi siirtyneitä energiaa (Vukašinović et al. 2010, s. 267). Yhtälöstä (3) nähdään, että heijastuvan ja siroavan valon määrä on riippuvainen absorboituvan ja kappaleen läpi siirtyvän energian määrästä. Mitä enemmän valoa kulkee kappaleen läpi tai absorboituu, sitä vähemmän valoa heijastuu tai siroaa takaisin skannerin kennolle. Mikäli kappaleesta ei heijastu tarpeeksi valoa kennolle, voi skannauksen laatu kärsiä.

Toisaalta myös liiallinen heijastavuus aiheuttaa epätarkkuutta skannauksessa. Esimerkiksi heijastavalla koveralla pinnalla voi esiintyä saman lasersäteen useita heijastumia, kun heijastuva valo siroaa ympäröiville pinnoille. Tällöin syntyy toissijaisia heijastumia, jotka kennolle palatessaan muodostavat todellisen kappaleen muodoista poikkeavia pisteitä. (Wang & Feng 2016, s. 40) Kuva 6 havainnollistaa toissijaisen heijastumisen muodostumista.



Kuva 6. Toissijaisen heijastuman muodostuminen (mukaillen lähteestä Wang & Feng 2016, s. 41).

Muotokohina (engl. speckle noise) on myös seurausta heijastuvan valon käyttäytymisestä ja aiheuttaa virhettä mittaustuloksiin ja siten vaikuttaa skannaustarkkuuteen (Vukašinović et al. 2010, s. 266). Muotokohina on satunnainen rakeinen ilmiö, joka syntyy, kun laservalo heijastuu tai siroaa kohteen eri osista ja heijastuneet säteet interferoivat toistensa kanssa. Tämä interferenssi aiheuttaa heijastuneen valon voimakkuuden vaihtelua kennolla ja muodostaa satunnaisen kohinakuvion, joka voi heikentää kuvan tarkkuutta ja laatua. Koska muotokohina on satunnaisilmiö, sitä voidaan kuvata ainoastaan tilastollisesti. (Briers et al. 2013, s. 1) Muotokohinaa voidaan pyrkiä vähentämään erilaisilla suodatustekniikoilla, kuten keskiarvosuodatukseen perustuvilla menetelmillä (Pradeep & Nirmaladevi 2021, s. 2). Myös käytetyn laserin värillä on merkitystä muotokohinan kannalta, sillä esimerkiksi sininen laser muodostaa punaista laseria vähemmän kohinaa (Scantech 3D 2022).

4.4 Geometrian aiheuttamat haasteet laserskannaukselle

Laserskannereilla skannattavan kappaleen geometria voi aiheuttaa usein haasteita, jotka voivat vaikuttaa skannauksen lopputulokseen tai asettaa rajoitteita laserskannauksen käytölle. Geometrian aiheuttamat rajoitteet ovat usein seurausta laserskannereiden näköalueen (engl. line of sight) rajallisuudesta. Näköalueen aiheuttamaa rajoitetta pidetään yhtenä laserskannauksen suurimmista heikkouksista (Haleem et al. 2022, s. 168). Kuten luvussa 4.3 todettiin, laserskannaus on riippuva takaisinheijastuvasta laserista ja sen ominaisuuksista. Skannerin lähettämä laser ei tavoita näköalueen ulkopuolella olevaa pintaa, jolloin siitä ei voida myöskään tallentaa tietoa näköalueen ulkopuolisista koh-

teista. Esimerkiksi kappaleiden piiloon jäävää tai sisäistä geometriaa ei voida laserskannerilla mitata (Haleem et al. 2022, s. 168). Toisaalta näköalue aiheuttaa rajoitteen myös kappaleiden takapintojen ja oman geometrian mahdollisesti aiheuttamien näköesteiden vuoksi. Laserskannereilla saattaa esiintyä myös haasteita tallentaa tietoa laserin kanssa kohtisuorilta pinnoilta (Raja & Fernandes 2008, s. 6).

Nämä tekijät saattavat johtaa puutteelliseen informaatioon ja siten epätarkkaan skannaustulokseen. Usein tämän vuoksi yhdestä suunnasta suoritettu laserskannaus ei voi tuottaa kattavaa kaikkia piirteitä sisältävää mallia skannattavasta kappaleesta. Kuitenkin vaikka laserskannaus toteutettaisiin useista kulmista, voivat kappaleen monimutkaiset pinnanmuodot olla tästä huolimatta hankalia mitattavia. Esimerkiksi tarkan tiedon tallentaminen rei'istä tai kierteistä voi osoittautua haasteelliseksi. (Haleem et al. 2022, s. 168)

4.5 Laserskannauksen valmistelu

Skannausvaihe on monivaiheinen prosessi, joka pitää sisällään käyttötarkoitukseen sopivan tekniikan valinnan, kappaleen valmistelun sekä varsinaisen skannauksen toteuttamisen. 3D-skannauksen lopputulos on useiden tekijöiden summa. Erilaisten tekijöiden vaikutusta voidaan vähentää valitsemalla huolellisesti käytettävät tekniikat sekä valmistelemalla kappale ja ympäristö skannaukselle suotuisaksi.

Käänteistekniikassa on tärkeää, että kerätty data on tarkkaa ja sitä tulkitaan oikein (Wang 2010, s. 210) Lisäksi lopullisen skannauksen tulisi sisältää informaatiota kaikista kappaleen pinnanmuodoista, kuten porrastuksista, lovista, taskuista tai rei'istä. (Raja & Fernandes 2008, s. 5) Näiden tekijöiden vuoksi onkin erityisen tärkeää, että skannaus on toteutettu siten, että tarkan tiedon kerääminen on mahdollista. 3D-skannausta toteuttaessa on tärkeää ymmärtää, mitkä tekijät vaikuttavat skannauksen tarkkuuteen ja oikeellisuuteen. Skannaukseen vaikuttavia tekijöitä on monia ja niiden välillä on usein useita vuorovaikutuksia, joiden vaikutusta voi olla vaikea ennustaa. Tämän vuoksi skannausta valmistellessa tulisi valita tapauskohtaisesti keskeisimmät tarkasteltavat tekijät. Huolellinen skannaustekijöiden valinta voi edesauttaa skannauksen tehokkuutta ja parantaa skannaustarkkuutta. (Mian et al. 2015, s. 420) Tällaisia tekijöitä voivat olla esimerkiksi skannerin resoluution valinta, ympäristön olosuhteiden säätely, kappaleen esikäsittely tai skannausnopeus.

Kappaleiden pinnan ominaisuuksia on haastavien materiaalien tapauksissa usein tarpeen käsitellä. Esimerkiksi pinnan ominaisuuksia voidaan säädellä tilapäisesti käyttämällä kiiltämistä rajoittavaa jauhepinnoitusta tai maalikerrosta. Yleisesti skannausalalla

pintakäsittelyyn käytettävä aine on hienojakoista liitujauhetta. Jauhe- tai maalipinnoitusta lisättäessä on kuitenkin huomioitava pinnoitteen paksuus ja sen vaikutus kappaleen geometriaan. (Raja & Fernandes 2008, s. 6; Vukašinović et al. 2010, s. 273) Skannattavaa kappale on tulisi myös puhdistaa mahdollisimman tarkkojen mittaustulosten saamiseksi (Mian et al. 2015, s. 424). Kuten tarkoituksellisesti lisätyn esikäsitteilyaineenkin tapauksessa, myös ylimääräinen lika- tai pölykerros kappaleen pinnalla saattaa vääristää kappaleen geometriaa, aiheuttaen epätarkkoja mittaustuloksia. Lisäksi mittaustulosten tarkkuuden parantamiseksi skannattava kappale tulisi kiinnittää siten, ettei se pääse mittauksen aikana liikkumaan (Mian et al. 2015, s. 424). Kappaleen liike mittauksen aikana saattaa aiheuttaa epätarkkuutta ja vääristää mittaustuloksia.

Ennen skannauksen suorittamista tulee käytetyn skannerin olla asianmukaisesti kalibroitu. Skannereissa käytetään useita antureita keräämään dataa. Tämän vuoksi on tärkeää kalibroida ne yhteiseen referenssikeykseen, jotta antureiden tallentamaa dataa voidaan analysoida ja yhdistää tehokkaasti. Kalibroinnilla varmistetaan, että kaikki kerätty data on yhteisessä mittakaavassa ja referenssipisteissä. (Niola et al. 2010, s. 479)

Skannausympäristön parametrien, kuten lämpötilan ja kosteuden tulee olla asianmukaisesti säädetty, siten etteivät ne vaikuta mitattavaan kohteeseen. Skannauksessa on huomioitava myös ympäristön valon vaikutus. Mikäli ympäristön valo sekoittuu käytetyn laserin kanssa, voi skannaustarkkuus heikentyä. (Javaid et al. 2021, s. 8) Nämä ympäristön tekijät asettavat rajoitteita skannausympäristölle ja siten rajoittavat laserskannerien hyödyntämistä. Esimerkiksi skannauksen toteutus ulkoilmaympäristössä ei välttämättä ole suotuisin vaihtoehto skannausympäristöksi, sillä tällöin edellä mainittuja parametreja voidaan säädellä vain rajoitetusti, jos ollenkaan. Sen sijaan sisätiloissa voidaan lämpötilaa, ilmankosteutta ja valaistusta säädellä usein varsin vapaasti ja hallitusti.

5. LASERSKANNERIT OSANA KÄÄNTEISTEKNIKKAA

Käänteistekniikassa 3D-laserskannerit ovat olleet käytössä jo pitkään. Kuitenkin erityisesti viimeisen vuosikymmenen aikana laserskannausteknologiat ovat kehittyneet merkittävästi, keräten yhä suurempia määriä tarkkaa 3D-dataa, alhaisemmalla hinnalla (Lindenbergh et al. 2019, s. vii; Staffenova et al. 2022, s. 41). Ilmailuala oli yksi ensimmäisiä laserskannauksen hyödyntäjiä, mutta nykyään yhä useammat teollisuudenalat ovat alkaneet hyödyntämään laserskannausta osana käänteistekniikkaa (Javaid et al. 2021, s. 5). Useat eri yritykset ovat kehittäneet ja soveltaneet käänteistekniikan prosessia sekä sen yhdistelmiä erilaisiin tarkoituksiin. Laserskannauksen kehittyessä näistä käänteistekniikan prosesseista on tullut yhä nopeampia ja tehokkaampia. (Staffenova et al. 2022, s. 41) 3D-skannausteknologioiden kehittymisen seurauksena, käänteistekniikan hyödyntämisen on ennustettu kasvavan merkittävästi teollisuudessa (Haleem et al. 2022, s. 162). Erityisesti kilpailullisessa ympäristössä skannereiden nopeus ja parantunut suorituskyky voivat olla kilpailuetu yritykselle (Javaid et al. 2021, s. 6).

5.1 Laserskannereiden käyttö käänteistekniikassa

Käänteistekniikan prosessin keskeisin vaihe on kappaleen digitalisointi, jonka avulla todellisuuden kappaleista voidaan muodostaa virtuaalinen 3D-malli. Digitalisoinnissa kappaleesta kerätään dataa esimerkiksi käsin mittaamalla tai skannaamalla. Nykypäivänä 3D-laserskannaus on käytetyin digitalisointimenetelmä käänteistekniikassa. (Staffenova et al. 2022, s. 42) Onkin ilmeistä, että tänä päivänä laserskannauksen rooli käänteistekniikan prosessissa on merkittävä. Sen luomat ajalliset säästöt nopeuttavat käänteistekniikan prosessin suorittamista. Lisäksi se mahdollistaa tarkan tiedon keräämisen kohteesta, joka on tärkeää käänteistekniikassa (Wang 2010, s. 210; Haleem et al. 2022, s. 161).

Käänteissuunnittelussa tarvitaan myös korkeaa resoluutiota, joka voidaan saavuttaa laserskannauksella (Haleem et al. 2022, s. 161). Resoluutiolla tarkoitetaan kahden mitta-pisteen pienintä mahdollista etäisyyttä toisistaan. On kuitenkin huomioitava, että korkeammalla resoluutiolla tuotetusta mallista tulee myös raskaampi ja sen datan käsittely vie enemmän aikaa. Raskaammat mallit vaativat mallia käsitteleviltä tietokoneilta enemmän laskentatehoa, jolloin raskas malli voi olla ongelma esimerkiksi tehottomampien tietoko-

neiden tapauksessa. (Kivolya 2019) Tämän vuoksi skannattavasta kohteesta ja skannauksen tarkkuusvaatimuksista riippuen tulee skannaustekniikan ja käytettävän resoluution valinnassa käyttää harkintaa.

3D-skannausteknologian käyttö käänteistekniikassa on järkevää silloin, kun on kyse monimutkaisista osista, joilla on vapaamuotoisia, vaikeasti mitattavia pintoja (Helle & Lemu 2021, s. 5262). Kuitenkin yksinkertaisten kappaleiden tapauksessa 3D-skannaus ei välttämättä ole paras tapa suorittaa digitointia. Esimerkiksi yksinkertaisten muotojen, kuten sylinterin tai kuution mittaaminen ja mallintaminen CAD-ohjelmistolla on suhteellisen helppoa ja nopeaa. Yksinkertaisen kappaleen käsin mittaukseen ja mallintamiseen verrattuna skannaus voi kaikkine vaiheineen olla lopulta hitaampi ja epätarkempi menetelmä.

5.2 Laserskannauksen sovelluksia käänteistekniikassa

Käänteistekniikassa on 3D-laserskannereille useita eri teollisuuden sovelluksia ja niitä hyödynnetään laajasti erilaisiin käänteistekniikan tehtäviin muun muassa tuotesuunnittelussa, tutkimuksessa ja laadunvalvonnassa. Käänteistekniikassa laserskannereilla voidaan nopeasti kerätä tarkkaa tietoa takaisinmallinnettavasta kohteesta. Kerättyä tietoa voidaan jälleen hyödyntää esimerkiksi mallinnuksen, analyysin ja kappaleen tulostamisen nopeuttamiseen. Skannaaminen avulla tuotteesta voidaan muodostaa helposti muokattava malli, jonka ominaisuuksia voidaan muuttaa CAD-ohjelmistolla. Tämä mahdollistaa esimerkiksi prototyyppien helpon valmistamisen ja muokkaamisen, joka puolestaan edesauttaa käänteistekniikan prosessin etenemistä. (Javaid et al. 2021, s. 5)

Javaid et al. (2021, s. 2) mukaan erityinen hyöty skannereista saadaan suurien kohteiden mittaamisessa, sillä ne nopeuttavat mittausprosessia. Suurten kohteiden tallentamisessa erityisesti lentoaika- ja vaihesiirtomenetelmään perustuvat laserskannerit ovat hyvä valinta käytettäväksi skanneriksi, niiden suuren käyttöetäisyyden vuoksi. Näitä teknologioita hyödynnetään paljon muun muassa vanhan arkkitehtuurin ja suurten maisemien tai ympäristöjen tallentamiseen. Teollisuuden alalla näitä teknologioita voidaan hyödyntää laitteiden ja laitosten suunnittelussa. Esimerkiksi monimutkainen tehdasympäristö tai laitteisto voidaan nopeasti takaisinmallintaa laserskannerilla ja parantaa siten työtehokkuutta. (Hu et al. 2020, s. 3)

Tarkempia mittaustuloksia vaativissa käänteistekniikan kohteissa laserkolmiointiin perustuvat menetelmät ovat parempia niiden hyvän tarkkuuden ja resoluution vuoksi. Laserkolmiointilla skannattavien kohteiden koko on kuitenkin rajoitetumpi, mikä rajaa laserkolmiointin käyttömahdollisuuksia.

Laserkolmiointi on korkean tarkkuutensa vuoksi sopiva teknologia muun muassa tuotannon käänteistekniikan sovelluksiin. Laserskannerilla voidaan esimerkiksi mitata tuotettu kappale ja varmistaa, että kappale on standardien mukainen. Lisäksi muun muassa kappaleen kulumista, valmistuslaatua, rakoja sekä kohdistuksia voidaan analysoida muodostetun mallin avulla. Skannereilla luotua 3D-mallia voidaan myös verrata alkuperäiseen CAD-malliin ja havainnoida niiden välisiä eroja. (Javaid et al. 2021, s. 2) Käänteistekniikan ja laserskannereiden avulla voidaan myös yksinkertaistaa tuotteiden mekaanisten ominaisuuksien selvittämistä ja mahdollistaa tarkkojen laskujen suorittaminen (Javaid et al. 2021, s. 6). Teollisuuden käänteistekniikassa skannereilla voidaan lisäksi tuottaa muun muassa vaihto-osia kappaleille, joiden valmistaja tai piirustukset eivät ole saatavilla (Haleem et al. 2022, s. 163–167).

5.3 Skannausteknologioiden vertailu

Liitteessä A on taulukoituna erilaisia markkinoilta saatavia käänteistekniikan tarpeisiin sopivia skannereita. Skannerien tiedot on koostettu avoimista lähteistä, kuten valmistajan tai jälleenmyyjien verkkosivuilta. Taulukko on kuitenkin vain pintaraapaisu markkinoilla saatavilla oleviin skannereihin. Skannereiden valinnassa taulukkoon on painotettu erityisesti niiden sopivuutta käänteistekniikan tarpeisiin teollisissa ympäristöissä. Sopivuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa tarkkuus, liikuteltavuus ja nopeus. Taulukossa on esitelty muun muassa laitteen valmistaja, malli, toimintaperiaate, tarkkuus, skannausnopeus ja hinta.

Taulukon perusteella voidaan todeta, että laserskannereilla saavutetaan yleisesti ottaen parempi tarkkuus, kuin rakenteelliseen valoon perustuvilla skannereilla. Toisaalta taulukosta voidaan havaita, että laserskannerien skannausnopeus on yleisesti ottaen hitaampi. Esimerkiksi rakenteelliseen valoon perustuvalla Artec Leo -skannerilla voidaan tallentaa parhaillaan jopa 35 miljoonaa mittapistettä sekunnissa, kun taas vertailun nopein laserskanneri SIMSCAN 42 kykenee parhaillaan vain 2,8 miljoonaan mittauspisteeseen sekunnissa. Nämä ominaisuudet vaihtelevat kuitenkin hyvin paljon laitekohtaisesti muun muassa laitteen ensisijaisen käyttötarkoituksen ja käyttöympäristön mukaan.

Hintojen osalta skannereiden välillä on suuria eroja ja hintahaarukka riippuu valmistajasta, mallista sekä skannerin ominaisuuksista. Vertailun skannerit ovat pääasiallisesti teollisuuden tarpeisiin valmistettuja skannereita. Niiden hinnat vaihtelevat ominaisuuksien mukaan tuhansista euroista, moniin kymmeneen tuhansiin euroihin. Jo pelkästään taulukoon koostettujen tietojen avulla voidaan todeta, että käyttötarkoitukseen sopivan skannerin valinnassa tulee käyttää harkintaa. Kun skannerin valinnassa harkitaan tarkasti muun muassa tarvittua tarkkuutta, skannausnopeutta ja kokorajoitteita, saatetaan

hankintahinnassa säästää jopa useita kymmeniä tuhansia euroja ja löytää mahdollisimman hyvin käyttötarkoitukseen soveltuva skanneri.

Taulukon tietojen perusteella ei voida yksiselitteisesti määrittää parasta skanneria tai skannausteknologiaa käännteistekniikan tarpeisiin. Voidaan kuitenkin todeta, että yleisesti ottaen laseriin perustuvat skannausteknologiat sopivat paremmin suurta tarkkuutta vaativiin tehtäviin, niiden suuren tarkkuuden vuoksi. Usein laserskannerit sopivat paremmin myös suurempien kohteiden tallentamiseen. Rakenteelliseen valoon perustuvat skannerit puolestaan sopivat tilanteisiin, joissa tarvitaan suurta määrää mittauspisteitä nopeasti, pienemmällä tarkkuusrajoitteilla. Käyttötarkoitukseen sopiva skannausteknologia määräytyykin siis parhaiten sovelluskohteen asettamien rajoitteiden mukaan.

6. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli selvittää, miten 3D-laserskannereita voidaan hyödyntää käänteistekniikassa ja mitä mahdollisia etuja ja rajoituksia laserskannausteknologian käytöllä käänteistekniikassa on muihin 3D-skannausteknologioihin verrattuna. Työssä havaittiin, että laserskannerit ovat hyödyllisiä työkaluja käänteistekniikan tarpeisiin, sillä ne mahdollistavat 3D-tiedon tallentamisen digitoitavasta kohteesta tarkasti ja nopeasti. Laserskannaus ei ole teknologiana uusi, mutta sen jatkuvan kehittymisen myötä skannereista on tullut yhä tarkempia, luoden lisää mahdollisuuksia laserskannereiden käyttökohteisiin.

Laserskannausteknologioita on erilaisia ja niiden ominaisuudet ja soveltuvuudet käänteistekniikan tarpeisiin vaihtelevat teknologiasta ja sovelluskohteesta riippuen. Laserkolmiointiin perustuvat menetelmät sopivat parhaiten lyhyillä etäisyyksillä tehtäviin, suurta tarkkuutta vaativiin sovelluskohteisiin. Laserkolmiointiin perustuvilla menetelmillä voidaan tallentaa useita miljoonia mittapisteitä sekunnissa, jopa kymmenien mikrometrien tarkkuudella. Lentoaika- ja vaihesiirtomenetelmiin perustuvat skannerit sopivat parhaiten suurten kohteiden tallentamiseen. Näiden heikkoutena on kuitenkin laserkolmiointiin verrattuna heikompi tarkkuus. Muihin skannausteknologioihin verrattuna laserskannauksella saavutetaan hyviä mittaustarkkuuksia. Kuitenkin esimerkiksi rakenteelliseen valoon perustuvilla skannereilla voidaan tallentaa selkeästi enemmän mittapisteitä kuin laserskannereilla.

Laserskannereilla on lisäksi muitakin heikkouksia, jotka voivat asettaa rajoitteita niiden hyödyntämiseen käänteistekniikassa. Laserskannerit ovat riippuvaisia niiden kennolle takaisinheijastuvasta lasersäteestä. Tämän vuoksi kappaleen heijastusominaisuuksilla on suuri merkitys laserskannauksen onnistumisen kannalta. Laserskannereille haastavia pintoja ovat muun muassa valoa läpäisevät tai voimakkaasti absorboivat pinnat. Näitä haasteita voidaan kuitenkin hallita, käyttämällä esimerkiksi erilaisia väliaikaisia pinnoitteita kappaleiden pinnanominaisuuksien muuttamiseksi. Laserskannauksen suurena haasteena on myös niiden näköalueen aiheuttamat rajoitteet. Laserskannerilla ei voida mitata pintoja, joita skannerin laservalo ei saavuta tai jolta lasersäteestä ei palaa heijastusta. Tällaisia pintoja voivat olla esimerkiksi kappaleiden sisäpinnat tai kappaleen oman geometrian taakse piiloon jäävät pinnat.

Kirjallisuuskatsaus osoittaa, että laserskannereilla on useita erilaisia käyttökohteita teollisuuden käänteistekniikassa. Laserskannereiden suurta tarkkuutta voidaan hyödyntää

muun muassa laadunvalvontaan. Laserskannereilla mahdollistetaan myös nopea prototyyppien luominen ja muokkaaminen sekä esimerkiksi isojen teollisuuden kohteiden nopea digitointi. Laserskannereiden yksi suurimpia etuja on niiden mahdollistamat ajalliset säästöt.

Laserskannerit ovat hyvin käänteistekniikan tarpeisiin soveltuva teknologia. Kuitenkin sovelluskohteen mukaan jokin vaihtoehtoinen teknologia saattaa olla parempi käänteistekniikan tarpeisiin. Esimerkiksi kohteen tarkkuusvaatimukset, kappaleen ominaisuudet tai teknologian hinta saattavat olla vaihtoehtoista teknologiaa puoltavia seikkoja. Myös eri laserskannereiden väliset ominaisuudet saattavat vaihdella paljon. Tämän vuoksi ei voida yksiselitteisesti nimetä parasta skannausteknologiaa käänteistekniikan tarpeisiin.

LÄHTEET

3D ScanTech. (2022). 5 Things to Know When Choosing Handheld 3D Scanners. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.3d-scantech.com/5-things-to-know-when-choosing-handheld-3d-scanners/>

3D ScanTech, a. SimScan 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.3d-scantech.com/product/simscan-3d-scanner/>.

3D ScanTech, b. TrackScan-P 3D System. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.3d-scantech.com/product/trackscan-p-3d-system/>.

3D ScanTech, c. KSCAN Magic Composite 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.3d-scantech.com/product/kscan-magic-composite-3d-scanner/>.

Aniwaa. The Best Handheld and Portable 3D Scanners: A Buyer's Guide. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-scanners/best-handheld-and-portable-3d-scanner/>.

Anwer N & Mathieu L. (2016). From reverse engineering to shape engineering in mechanical design. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 65(1), pp. 1–6.

Artec 3D, a. Artec Eva 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-eva>.

Artec 3D, b. Artec Leo 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-leo>.

Artec 3D, c. Artec Micro Desktop 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-micro>.

Artec 3D, d. Artec Ray 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/laser-ray>.

Artec 3D, e. Artec Spider 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-spider>.

Briers D, Duncan D, Hirst E, Kirkpatrick S, Larsson M, Steenbergen W et al. (2013). Laser speckle contrast imaging: theoretical and practical limitations. *Journal of biomedical optics*, 18(6), pp. 1.

Creaform. (2019). Go!SCAN 3D Scanners. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): https://www.mltfinland.fi/wp-content/uploads/2016/05/GoSCAN-3D_Brochure_EN_EMEA_15042019-002.pdf.

Creaform. HandySCAN 3D Silver Series – Professional 3D Scanners. Technical Specifications. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.creaform3d.com/en/handyscan-3d-silver-series-professional-3d/technical-specifications>.

Ebrahim M. (2011). 3D LASER SCANNERS: HISTORY, APPLICATIONS, AND FUTURE. Assiut University, pp. 16–19.

FARO. (2021). FARO Quantum Max 3D ScanArm. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Re-sources/2021/06/30/22/08/Brochure_QuantumMax_3DM_LTR_ENG.pdf?rev=1c15613e14294965b5c088ecd9ba4375.

Haleem A, Javaid M, Khan I, Kumar L, Rab S, Singh R et al. (2022). Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 4(2), pp. 161–171.

Helle R & Lemu H. (2021). A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control, in *Materials today: proceedings*. Elsevier Ltd, pp. 5255–5262.

Hu C, Kong L, Lv F. (2021). Application of 3D laser scanning technology in engineering field. *E3S Web of Conferences*, 267, pp. 1–4.

Huang T, Song J, Zhang D. (2011). CAD Model Reconstruction Using 3D Laser Scanning. *Applied Mechanics and Materials*, Volumes 71-72, pp. 3485–3488.

Incoronato A, Locatelli M, Zappa F. (2021). Statistical Modelling of SPADs for Time-of-Flight LiDAR. *Sensors*, 21(13), pp. 1.

Javaid M, Haleem A, Singh R, Suman R. (2021). Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and it's analytical applications, *Sensors International*, 2, pp. 1 –8.

Kivolya N. (6.6.2019). How to Choose a 3D Scanner. Artec 3D. Saatavissa (viitattu 3.3.2023): <https://www.artec3d.com/learning-center/how-choose-3d-scanner>

Lindenbergh R & Riveiro B. (2019). *Laser Scanning: An Emerging Technology in Structural Engineering*. CRC Press.

Mian S, Al-Ahmari A, Mannan M. (2015). Accuracy of a reverse-engineered mould using contact and non-contact measurement techniques. *International journal of computer integrated manufacturing*. 28(5), pp. 419–436.

Montlahuc J, Ghazanfar A, Polette A, Pernot J, Métiers. (2019). As-scanned Point Clouds Generation for Virtual Reverse Engineering of CAD Assembly Models. *Computer-Aided Design and Applications*. Vol.16, pp. 1171–1182.

Motavalli S. (1998). Review of reverse engineering approaches. *Computers & industrial engineering*, 35 (1-2), pp. 25–28.

Niola V, Rossi C, Savino S, Strano S. (2011). A method for the calibration of a 3-D laser scanner. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 27 (2), pp. 479–484.

PLM Group. Peel 2 3D Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://plmgroup.fi/3d-tulostus/3d-skannerit/peel-2/>.

Pradeep S & Nirmaladevi P. (2021). A Review on Speckle Noise Reduction Techniques in Ultrasound Medical images based on Spatial Domain, Transform Domain and CNN Methods. *IOP conference series. Materials Science and Engineering*, 1055 (1), pp. 2.

Raja V & Fernandes K. (2008). *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. 1. Aufl. London: Springer Verlag London Limited, pp. 2–38.

Siteline360. Why Use 3D Scanning? Saatavissa (viitattu 28.2.2023): <https://siteline360.com/Why-Use-3D-Scanning.html>

Shenga P, Broman O, Hagman O. (2014). 3D Phase-shift Laser Scanning of Log Shape. *BioResources*, 9, pp.7593–7605

Staffenova K, Binasova V, Miroslav R. (2022). The possibility of using 3D laser scanning as support for reverse engineering. *Acta simulation*, 8 (4), pp. 41–45.

Stonex. X120GO SLAM Laser Scanner. Saatavilla (viitattu 15.3.2023): <https://www.stonex.it/project/x120go-slam-laser-scanner/>.

Vukašinović N, Bračun D, Duhovnik J, Možina J. (2010). The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning. *International journal of advanced manufacturing technology*, 50 (1-4), pp. 265–274.

Wang W. (2010). *Reverse engineering: technology of reinvention*. Boca Raton, Fla: CRC Press. pp. 1–11, 210.

Wang Y & Feng H. (2016) Effects of scanning orientation on outlier formation in 3D laser scanning of reflective surfaces. *Optics and Lasers in Engineering*, 81, pp. 35–45.

LIITE A: KÄÄNTEISTEKNIKKASSA HYÖDYNNETTÄVIÄ 3D-SKANNAUSLAITTEITA

Tekniikka	Valmistaja	Malli	Tarkkuus	Käyttöetäisyys / skannattavan kappaleen maksimikoko	Skannausnopeus	Liikuteltavuus	Hinta	Lähde
Laser	FARO	FAROblu xR	0,010 mm	Tieto puuttuu	1 200 000 pistettä/s	Varteen kiinnitettävä / Käsin liikuteiltava	Ei saatavilla	(FARO, 2021)
Laser	Creaform	HandySCAN 3D SILVER Series	0,040 mm	0,1–4,0 m	480 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 21 900 \$	(Creaform)
Laser	Stonex	X120GO SLAM Laser Scanner	6,000 mm	0,5–120,0 m	320 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 19 000–25 000 \$	(Stonex)
Laser	Simscan	SIMSCAN 42	0,020 mm	Tieto puuttuu	2 800 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	Ei saatavilla	(3D ScanTech, a)
Laser	TrackScan	TrackScan-P550	0,025 mm	0,1–8,0 m	2 600 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	Ei saatavilla	(3D ScanTech, b)
Laser	KSCAN	KSCAN-Magic	0,020 mm	Tieto puuttuu	1 350 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 45 000 \$	(3D ScanTech, c)
Laser	Shining 3D	FreeScan UE Pro	0,020 mm	0,2–0,3 m	1 850 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 24 000 \$	(Aniwaa)
LiDAR	Artec 3D	Artec Ray	0,700 mm	1,0–110,0 m	208 000 pistettä/s	Jalustaan kiinnitettävä	n. 58 000 \$	(Artec 3D, d)

Tekniikka	Valmistaja	Malli	Tarkkuus	Käyttöetäisyys / skannattavan kappaleen maksimikoko	Skannausnopeus	Liikuteltavuus	Hinta	Lähde
Rakenteellinen valo	Artec 3D	Artec Leo	0,100 mm, + 0,300 mm/m etäisyyden kasvaessa	0,35–1,2 m	35 000 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 34 800 €	(Artec 3D, b)
Rakenteellinen valo	Artec 3D	Artec Eva	0,100 mm, + 0,300 mm/m etäisyyden kasvaessa	0,4 – 1,0 m	18 000 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 13700 €	(Artec 3D, a)
Rakenteellinen valo	Artec 3D	Artec Micro	0,010 mm	90 x 60 x 60 mm	1 000 000 pistettä/s	Kiinteä, työpöytämalli	n. 27900 \$	(Artec 3D, c)
Rakenteellinen valo	Artec 3D	Space Spider	0,050 mm + 0,300 mm/m	0,2 – 0,3 m	1 000 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 21700 \$	(Artec 3D, e)
Rakenteellinen valo	Creaform	Go!SCAN 3D	0,050 mm + 0,150 mm/m	0,1 – 4,0 m	1 500 000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	Ei saatavilla	(Creaform, 2019)
Rakenteellinen valo	Peel 3D	Peel 2	0,100 mm	0,3 – 3,0 m	550000 pistettä/s	Käsiikäyttöinen	n. 7500 €–10000 €	(PLM Group)