

Juho Noopila

3D-KONENÄÖN SOVELLUKSET VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Niko Siltala
Marraskuu 2025

TIIVISTELMÄ

Juho Noopila: 3D-konenäön sovellukset valmistavassa teollisuudessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2025

3D-konenäkö, joka mahdollistaa koneiden kyvyn nähdä ja prosessoida kolmiulotteista tietoa, tarjoaa uusia mahdollisuuksia valmistavan teollisuuden tehokkuuden ja joustavuuden parantamiseksi. Sitä voidaan hyödyntää monissa eri valmistusprosessin vaiheissa. 3D-konenäkö mahdollistaa tuotannon automatisoinnin, ja sen avulla voidaan korvata ihmistyövoiman tarve esimerkiksi vaarallisissa ympäristöissä. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, miten 3D-konenäköä voidaan hyödyntää valmistavassa teollisuudessa. Toisena tavoitteena on selvittää, mitä eri kuvantamistekniikoita käytetään 3D-konenäön toteuttamiseksi, ja esitellä niiden toimintaperiaatteet.

Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Lähteinä käytettiin alan kirjallisuutta, vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita ja konferenssijulkaisuja sekä konenäköä käsitteleviä verkkolähteitä.

Tutkielman tuloksena saatiin selville, että 3D-konenäköä käytetään valmistavassa teollisuudessa esimerkiksi laaduntarkastuksessa ja mittaamisessa. Valmiin tuotteen laaduntarkastamisen lisäksi 3D-konenäköä voidaan käyttää valmistusprosessin aikaiseen tarkkailuun ja säätämiseen, mikä ehkäisee virheiden syntymistä. 3D-konenäköä käyttävillä mittauskoneilla voidaan myös korvata perinteiset fyysiseen kosketukseen perustuvat koordinaattimittauskoneet, jotka eivät ole käyttökelpoisia kaikissa mittaustehtävissä. Monissa työtehtävissä hyödynnetään robotteja, jotka käyttävät 3D-konenäköä esimerkiksi esteiden havaitsemiseen sekä työosien paikantamiseen ja tunnistamiseen. Käsivarsirobotteja käytetään etenkin kokoonpanotehtävissä osien paikantamiseen, poimimiseen ja siirtämiseen oikealle paikalle. Itseohjautuvia mobiilirobotteja puolestaan hyödynnetään logistiikassa kappaleiden kuljettamisessa paikasta toiseen. Tutkielman tuloksena selvisi, että yleisimpiä valmistavan teollisuuden sovelluksissa käytössä olevia kuvantamistekniikoita 3D-konenäön toteuttamiseksi ovat stereonäkö, laserkolmiomittaus, strukturoitu valo, kulku-aikatekniikka sekä shape-from-focus.

Avainsanat: 3D-konenäkö, konenäkö, valmistava teollisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT-3.5, ChatGPT-4o, ChatGPT-5

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on käytetty lähdemateriaalien hakemisessa sekä luvun 4 rakenteen hahmottelussa.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Luku 4.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusongelma	1
1.2 Tutkimusmenetelmä ja työn rakenne	2
2. 3D-KONENÄKÖ	3
2.1 Konenäön yleistyminen teollisuudessa	3
2.2 Konenäköjärjestelmän rakenne	4
2.3 3D-konenäön tekniikat	4
2.3.1 Stereonäkö	5
2.3.2 Laserkolmiomittaus	6
2.3.3 Strukturoitu valo	8
2.3.4 Kulkuaiquatekniikka	9
2.3.5 Shape-from-focus	10
2.3.6 Yhteenveto tekniikoista	11
3. 3D-KONENÄÖN SOVELLUKSET	12
3.1 Laaduntarkastus ja mittaus	12
3.2 Poiminta ja paikoittaminen	14
3.3 Ympäristön havainnointi	15
4. POHDINNAT	16
4.1 3D-konenäön hyödyt valmistavassa teollisuudessa	16
4.2 Kuvantamistekniikoiden soveltuvuus eri käyttötapauksiin	17
4.3 3D-konenäön vaikutus ihmistyövoimaan	17
4.4 Johtopäätökset	18
5. YHTEENVETO	19
LÄHTEET	21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D	engl. three-dimensional, kolmiulotteinen
AMR	engl. autonomous mobile robot, itseohjautuva mobiilirobotti
CAD	engl. computer-aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CV	engl. computer vision, tietokonenäkö
LED	engl. light-emitting diode, valodiode
LIDAR	engl. light detection and ranging, valotutka
MV	engl. machine vision, konenäkö
SLAM	engl. simultaneous localization and mapping, samanaikainen paikannus ja kartoitus
TOF	engl. time-of-flight, kulkuairotekniikka

1. JOHDANTO

Viime vuosikymmeninä valmistava teollisuus on kehittynyt automatisoidun tuotannon saralla huomattavasti. 3D-konenäön kehitys on tarjonnut uusia mahdollisuuksia tuotantolinjojen tehostamiseen ja innovaatioiden syntyyn. 3D-konenäkö, joka mahdollistaa koneiden kyvyn nähdä ja prosessoida kolmiulotteista tietoa, on mullistanut perinteisiä valmistusprosesseja ja mahdollistanut esimerkiksi ihmisen korvaamisen robotilla monissa tuotannon tehtävissä. Se on tarjonnut uusia mahdollisuuksia teollisuuden tehokkuuden ja joustavuuden parantamiseksi. Esimerkiksi tuotannon laaduntarkastuksessa ja kokoonpanotehtävissä konenäköjärjestelmät tarjoavat mahdollisuuksia ihmisenäön korvaamiselle.

3D-konenäön sovellusalueet ovat viime vuosina kehittyneet kovaa vauhtia. Mahdoton pidetyt tehtävät ovat tulossa toteuttamiskelpoisiksi, ja samalla löydetään täysin uusia sovellusalueita. (Hornberg, 2017, s. 764)

1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusongelma

Tämän työn tarkoitus on selvittää, mitä eri sovelluskohteita 3D-konenäöllä on valmistavassa teollisuudessa. Olennaista on saada selville, miten 3D-konenäön avulla saadaan parannettua tuotannon tehokkuutta. Työn tavoitteena on myös esitellä yleisimmät kuvantamistekniikat, joita teollisuudessa käytetään 3D-konenäön toteuttamiseksi.

Päätutkimuskysymys: Miten 3D-konenäköä voidaan hyödyntää valmistavassa teollisuudessa?

Apututkimuskysymys: Mitä eri kuvantamistekniikoita käytetään 3D-konenäön toteuttamiseksi?

Tässä työssä käsitellään valmistavan teollisuuden sovellusalueista vain laaduntarkastus ja mittaaminen, poiminta ja paikoittaminen sekä ympäristön havainnointi, koska ne ovat yleisimpiä lähdemateriaalia etsiessä. Kandidaatintyön rajatun laajuuden takia muut sovellusalueet jäävät käymättä läpi. Samasta syystä myös kuvantamistekniikoista esitellään vain viisi tekniikkaa, jotka ovat yleisesti käytettyjä tekniikoita valmistavassa teollisuudessa.

1.2 Tutkimusmenetelmä ja työn rakenne

Tämä tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Lähdeaineistona on käytetty alan kirjallisuutta, vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita, konferenssijulkaisuja sekä konenäköä käsitteleviä verkkolähteitä. Lähdemateriaalin haussa käytettiin apuna Tampereen yliopiston Andor-hakupalvelua. Aineiston haussa käytettiin englanninkielisiä hakutermejä, sillä hakuprosessin aikana kävi nopeasti ilmi, että suomenkielistä lähdemateriaalia on vain niukalti olemassa. Hakutermeinä käytettiin esimerkiksi ”3D machine vision” ja ”computer vision” yhdistettynä hakutermeihin ”applications” ja ”manufacturing industry”. Lähdemateriaalin valinnassa pyrittiin suosimaan uudempaa saatavilla olevaa materiaalia, sillä vanhemmat julkaisut saattavat sisältää vanhentunutta tietoa konenäön nopean kehityksen takia. Tämän takia tutkielmassa ei ole käytetty ennen vuotta 2009 julkaistuja lähdemateriaaleja.

Luvussa 2 esitetään konenäköjärjestelmän yleistetty rakenne ja tyypillisesti vaadittavat pääkomponentit sen toteuttamiseksi. Tämän jälkeen esitellään viisi yleistä 3D-kuvantamistekniikkaa. Luvun lopussa on taulukko, johon nämä tekniikat on koottu toimintaperiaatteineen. Luvussa 3 käydään läpi 3D-konenäön sovelluskohteita valmistavassa teollisuudessa. Luvussa 4 esitetään omia pohdintoja tutkimuksen tuloksien perusteella, ja viimeisessä luvussa on yhteenveto työn sisällöstä.

2. 3D-KONENÄKÖ

Termillä konenäkö (engl. Machine Vision, MV) tarkoittaa tieteenalaa, joka käsittelee tietokoneiden kykyä nähdä ja analysoida fyysisen maailman kappaleita (Anand & Priya 2020, s. 1). Usein konenäöstä puhuttaessa viitataan myös termiin tietokonenäkö (engl. Computer Vision, CV). Merkitykseltään nämä termit ovat lähellä toisiaan, mutta selkeyden vuoksi määritellään ero näiden termien välille. Davies (2012, s. 13) määrittelee CV:n tieteenalaksi, joka tutkii konenäköä ja siihen liittyvän tietokoneohjelmiston suunnittelua, kun taas MV keskittyy enemmän konenäön laitteistoihin ja kuvantamistekniikoihin ja siihen, miten konenäköä voidaan käyttää käytännön sovelluksissa. Batchelorin (2012, s. 10) mukaan monet kuitenkin käyttävät käsitteitä MV ja CV synonyymeinä toisilleen, mutta alan asiantuntijat pitävät niitä erillisinä aloina. Tässä työssä konenäöllä tarkoitetaan englannin kielen termiä ”Machine Vision”.

3D-konenäkö tuottaa tietoa kolmesta ulottuvuudesta, eli se tulkitsee kappaletta pituus-, leveys- ja syvyys suunnassa. Tämä on keskeinen ero 2D-konenäköön, joka näkee kuvan tasolla, eli se ei sisällä syvyystietoa. Tässä luvussa tutustutaan muutamaa eri 3D-kuvantamismenetelmään ja niiden toimintaperiaatteisiin.

2.1 Konenäön yleistyminen teollisuudessa

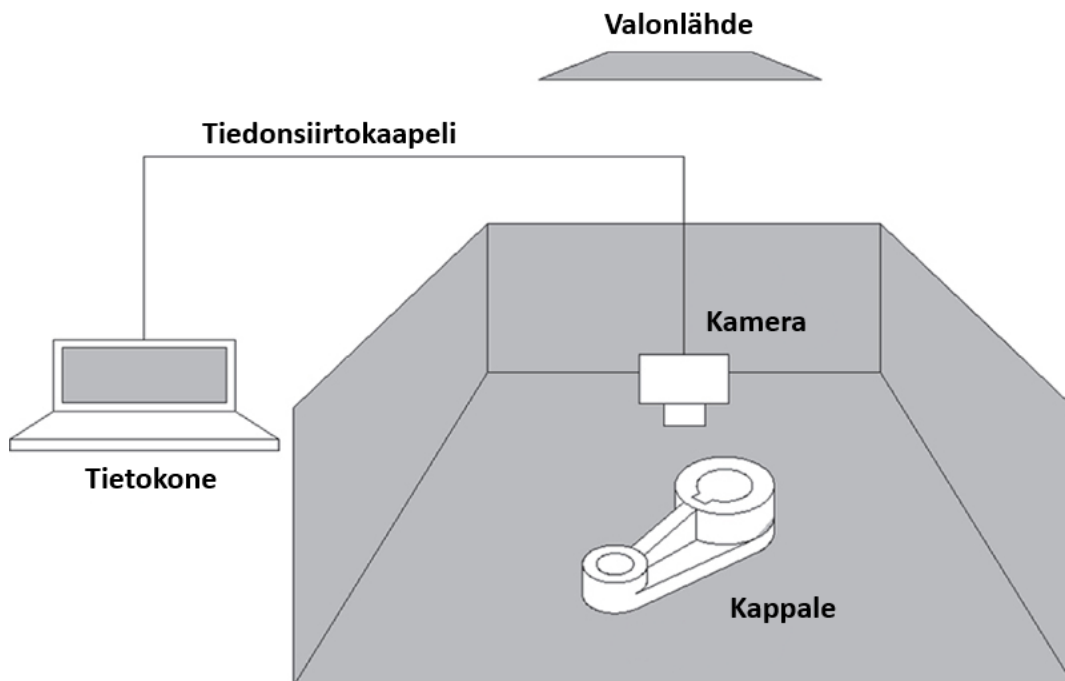
Konenäköjärjestelmät tulivat ensimmäisen kerran merkittävän huomion kohteeksi teollisuudessa 1970-luvun puolivälissä. 1980-luvulla niiden kehitys eteni hitaasti, mutta kiinnostus niitä kohtaan kasvoi merkittävästi, erityisesti kun suuret amerikkalaiset autonvalmistajat alkoivat kiinnittää huomiota konenäköjärjestelmiin. 1990-luvulla ja 2000-luvun alussa konenäkömarkkinat kasvoivat jatkuvasti uusien teknologioiden, kuten muovisten optisten komponenttien, LED-valaistuksen, korkearesoluutioisten kameroiden ja nopeiden tietokoneiden ansiosta. (Batchelor 2012, johdanto)

Hornbergin (2017, s. 699–700) mukaan 2010-luvulta eteenpäin konenäkömarkkinat ovat jatkaneet kasvuaan. Euroopan ja Pohjois-Amerikan markkinaluvut osoittavat, että konenäkösektorin kasvu on usein ylittänyt talouden kokonaiskasvun. Viime vuosina myös Kiinasta on tullut konenäkösektorin merkittävä markkina-alue. Konenäkömarkkinan kasvuun vaikuttaneita tekijöitä ovat olleet teknologian kehittyminen, kasvavat työvoimakustannukset sekä jatkuvasti kasvavat laatuvaatimukset. Kasvua ovat ajaneet myös tiukentuneet turvallisuusvaatimukset esimerkiksi robotiikan alueella työympäristön valvonnassa ja törmäysten välttämiseksi. 3D-konenäön tekniikat ovat yleistyneet, mikä johtaa

monissa sovelluksissa luotettavampiin ja tehokkaampiin ratkaisuihin kuin mitä perinteisillä 2D-konenäköjärjestelmillä voitaisiin saavuttaa sekä luo uusia sovellusalueita. (Hornberg 2017, s. 699–700)

2.2 Konenäköjärjestelmän rakenne

3D-konenäköjärjestelmän pääkomponentit ovat kamera, linssi, valonlähde sekä laitteistot ja ohjelmistot tiedonkäsittelyä varten. Sopivien komponenttien valitseminen konenäköjärjestelmään riippuu sovelluskohteesta. On oleellista tunnistaa, minkälaista informaatiota kuvista halutaan saada kussakin sovelluskohteessa, jotta konenäköjärjestelmän rakentaminen ja komponenttien valinta helpottuu ja jotta järjestelmä toimisi tehokkaasti. (Anand & Priya 2020, s. 45)



Kuva 1. Konenäköjärjestelmän peruskomponentit (mukailtu lähteestä Anand & Priya 2020, s. 46, kuva 3.1)

Kuvassa 1 on esitetty konenäköjärjestelmän yksinkertaistettu rakenne. 3D-konenäköjärjestelmässä kameroita tai valoja voi olla useita, käytettävästä tekniikasta riippuen.

2.3 3D-konenäön tekniikat

3D-konenäön tuottamiseksi on kehitetty useita erilaisia tekniikoita. Näitä tekniikoita eli kuvantamismenetelmiä voidaan luokitella eri tavoin. Sansonin et al. (2009, s. 570) mukaan on olemassa kolme toimintaperiaatetta 3D-kuvan muodostamiseksi: kolmiomittaus, kulkuaikamittaus ja 2D-kuvien (engl. monocular images) analysointi.

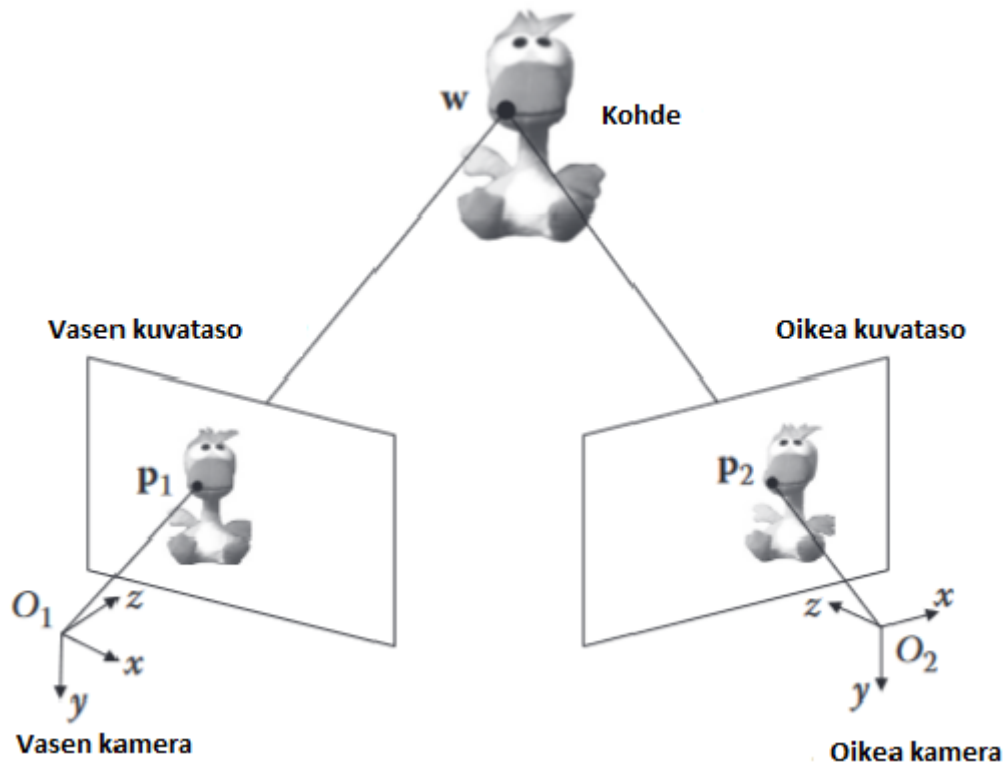
Kolmiomittauksessa 3D-kuvan muodostaminen perustuu matemaattiseen malliin, jossa kolmion kolmannen pisteen koordinaatit voidaan laskea trigonometrian avulla, kun kahden muun pisteen koordinaatit tunnetaan. Kulkuajamittauksessa puolestaan lähetetään säteilyä ja mitataan aikaa, joka säteilyltä kuluu heijastua kohteesta takaisin anturiin. (Steger et al. 2018, s. 82) 2D-kuvien analysointiin perustuvissa tekniikoissa 3D-tieto muodostetaan mittaamalla kuvista ominaisuuksia, kuten terävyyttä. Monet 2D-kuvien analyysiin perustuvat tekniikat ovat kuitenkin tarkkuudeltaan huonoja (Sansoni et al. 2009, s. 570–579). Tämän takia tässä työssä esitellään vain yksi tähän kategoriaan lukeutuva 3D-kuvantamistekniikka, shape-from-focus, jonka käytöstä löytyy useita sovelluskohteita teollisuudessa.

Konenäön tekniikat voidaan luokitella myös niiden käyttämän valaistuksen mukaan aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. Passiivisissa menetelmissä käytetään vain ympäristön valaistusta, kun taas aktiivisissa menetelmissä käytetään jonkinlaista ohjattua valaistusta. (Hornberg 2017, s. 757)

Jokaisella tekniikalla on omat etunsa ja haittansa, joten parhaan tekniikan valitseminen riippuu tilanteesta ja sovelluskohteesta. Huomion arvoista on, että tekniikoita voidaan myös yhdistellä ja käyttää rinnakkain. Seuraavissa luvuissa esitellään lyhyesti viiden eri tekniikan toimintaperiaatteet. Nämä tekniikat on koottu luvussa 2.3.6 taulukkoon 1.

2.3.1 Stereonäkö

Stereonäkö (engl. stereo vision) on tekniikka, joka perustuu kahden kameran käyttämiseen 3D-informaation muodostamiseksi. Kumpikin kamera ottaa kuvan kohteesta samanaikaisesti, mutta eri suunnista. Tällöin tuloksena on kaksi kuvaa eri kulmista otettuna. Algoritmi etsii kuvista toisiaan vastaavat pisteet. Kun kameroiden sijainti ja kulma toisiinsa nähden on tunnettu, pystytään pisteiden etäisyys kameraan laskemaan geometrian avulla. (Hornberg 2017, s. 759) Stereonäköjärjestelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Stereonäköjärjestelmän toimintaperiaate (mukailtu lähteestä Zhang 2013, s. 2, kuva 1.1)

Stereonäön keskeinen ongelma on hyvien vastaavuuksien löytäminen kahden kuvan välillä. Siksi stereonäöllä ei tyypillisesti saada tehtyä tiheitä syvyyskarttoja kohteesta, koska etäisyys voidaan laskea vain pisteille, joille on löydetty vastaavuus kahdesta kuvasta. Stereonäkö toimii paremmin pinnoilla joissa on vahva teksturi, sillä teksturi lisää mahdollisten pisteiden määrää, joille voidaan löytää vastaavuus kahden kuvan välillä. Tämän takia stereokuvantamisessa käytetään joskus apuna erilaisia valaisumenetelmiä, jotta tekstuuria kohteen pinnalla saataisiin lisättyä keinotekoisesti. (Hornberg 2017, s. 759) Stereonäköä hyödynnetään esimerkiksi laaduntarkastuksessa, laajojen kappaleiden mittauksessa, sekä robotiikassa navigointiin (Hornberg 2017, s. 766–770).

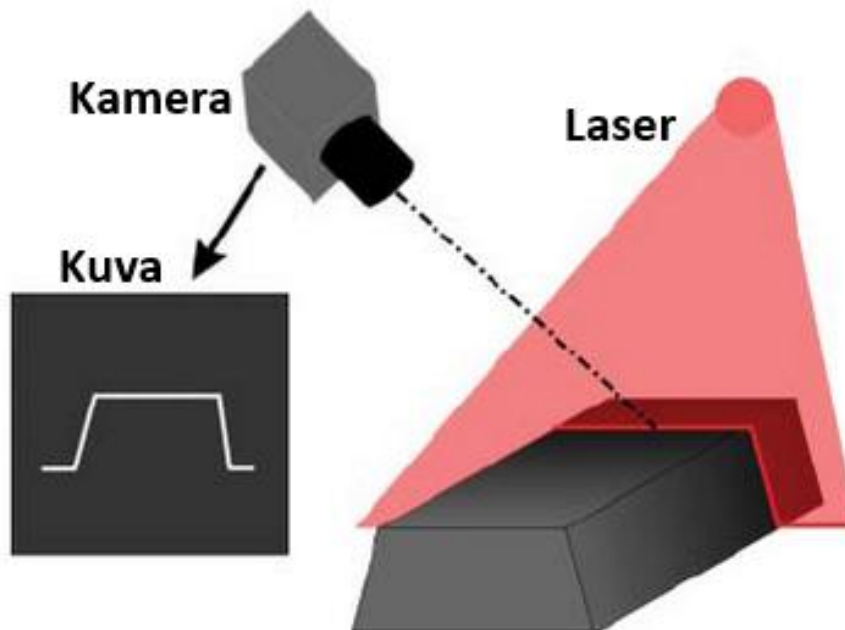
2.3.2 Laserkolmiomittaus

Laserkolmiomittaus (engl. laser triangulation) on tekniikka, jossa kappaleen muoto ja etäisyys määritetään lasersäteiden avulla. Järjestelmä koostuu kamerasta, ja laserprojektorista, joka lähettää tyypillisesti viivamaisen laserkuvion kohteen pinnalle. Laservalo heijastuu osuessaan kohteeseen, ja muodostaa kuvion kohteen pinnalle. Kamera tallentaa

kuvion eri kulmasta. Kun kameras ja laserin välinen kulma ja etäisyys tunnetaan, sekä laserin heijastuksen paikka kohteen pinnalta havaitaan, pystytään kameras ja kohteen välisen pinnan etäisyys määrittämään trigonometrian avulla. Joko kohdetta tai kuvantamisjärjestelmää pitää liikuttaa, jotta järjestelmä voi skannata koko kappaleen ja määrittää sen muodon. Näin saadaan tulokseksi sarja hajontakuvioita, jotka yhdistämällä tietokone voi rekonstruoida kappaleen 3D-mallin. (Steger et al. 2018, s. 84–86) Laserkolmiomittauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.

Järjestelmän vaatii toimiakseen sen, että kamera on kalibroitu. Myös laserkuvion asema suhteessa kameraan pitää olla kalibroitu. Tyypillisesti kalibroinnin suorittaa kameras valmistaja. (Steger et al. 2018, s. 85)

Laserkolmiomittauksessa laserprojektorin ja kameras voidaan asettaa usealla eri tavalla toisiinsa nähden. Paras asettelu riippuu kohteen muodosta sekä siitä, mitä halutaan mitata. Tyypillisesti jokaista kohteen pistettä ei pystytä rekonstruoimaan, johtuen varjoista ja peittymisestä. Riippuen laitteiden sijoittelusta, näitä ilmiöitä esiintyy, jos kohteessa on osia, jotka jäävät piiloon joko kameralta, tai laserilta. Kasvattamalla kameras ja laserin välistä kulmaa, kasvaa myös kappaleen rekonstruktion resoluution tarkkuus. Kulman kasvattamisen haittapuolena kuitenkin kappaleesta jää isompi alue piiloon, ja täten isompi alue jää rekonstruoimatta. (Steger et al. 2018, s. 86)

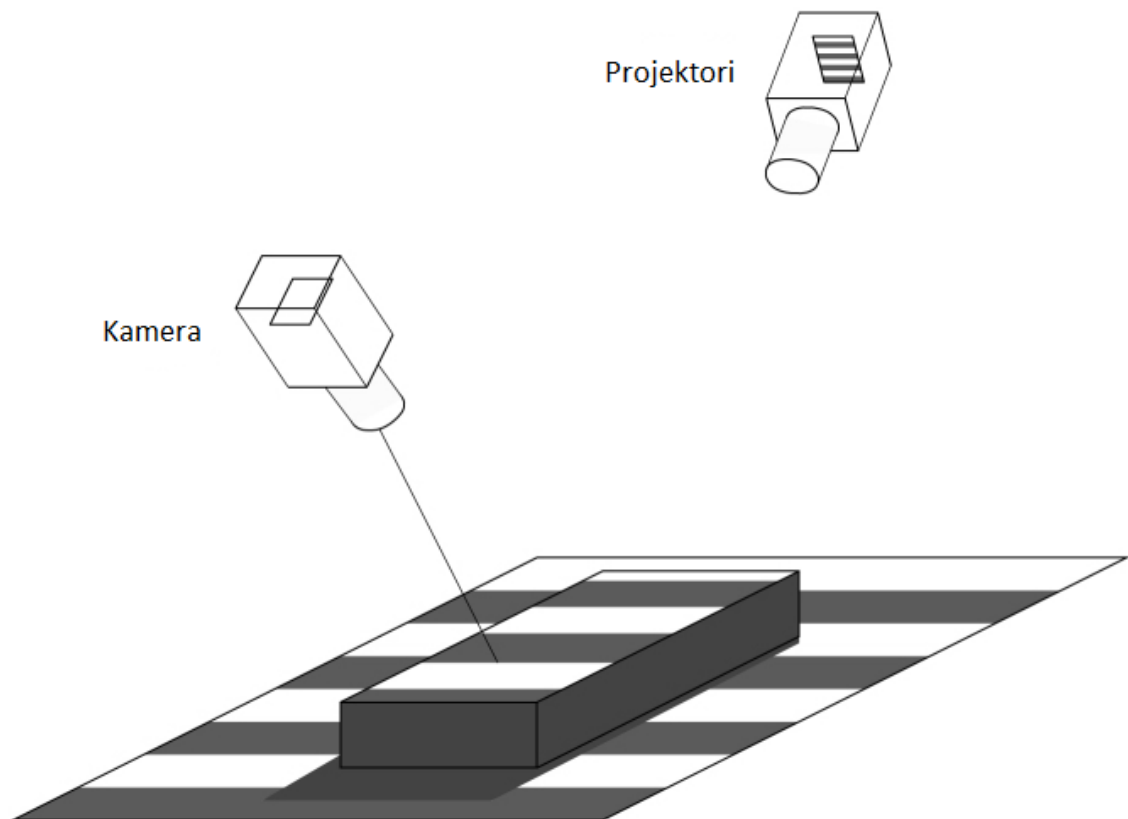


Kuva 3. Laserkolmiomittauksen toimintaperiaate (mukailtu lähteestä Hornberg 2017, s. 760, kuva 10.17)

Tyypillisiä laserkolmiomittauksen sovelluskohteita teollisuudessa ovat esimerkiksi kappaleiden pinnan muodon tarkastus virheiden varalta, sekä akselin halkaisijan mittaaminen. Myös robotit voivat käyttää laserskannausta ympäristönsä havainnointiin. (Hornberg 2017, s. 767–770)

2.3.3 Strukturoitu valo

Strukturoitu valo (engl. structured light) on kolmiomittaukseen perustuva 3D-konenäön tekniikka, joka on rakenteeltaan samankaltainen kuin yllä mainittu laserkolmiomittaus-tekniikka. Strukturoidun valon tekniikassa laserprojektorin on korvattu projektorilla, joka heijastaa rakenteellisia valokuvioita kohteen pinnalle. Kohteeseen voidaan heijastaa yksi tai useampi valokuvio. Monenlaisia eri valokuvioita käyttäviä järjestelmiä on esitelty vuosien saatossa. Esimerkiksi ruutu-, piste- ja viivakuvioita on tutkittu paljon. Tällä hetkellä hallitsevana teknologiana on heijastaa useita eritaajuuksisia viivakuvioita kohteeseen. (Steger et al. 2018, s. 86; Sansoni et al. 2009, s. 572) 3D-kuvan muodostaminen perustuu projektorin valokuvion ja kappaleen pinnalla näkyvän vääristyneen valokuvion vertaamiseen (Hornberg 2017, s. 138). Strukturoidun valon tekniikan toimintaperiaate on esitetty kuvassa 4.



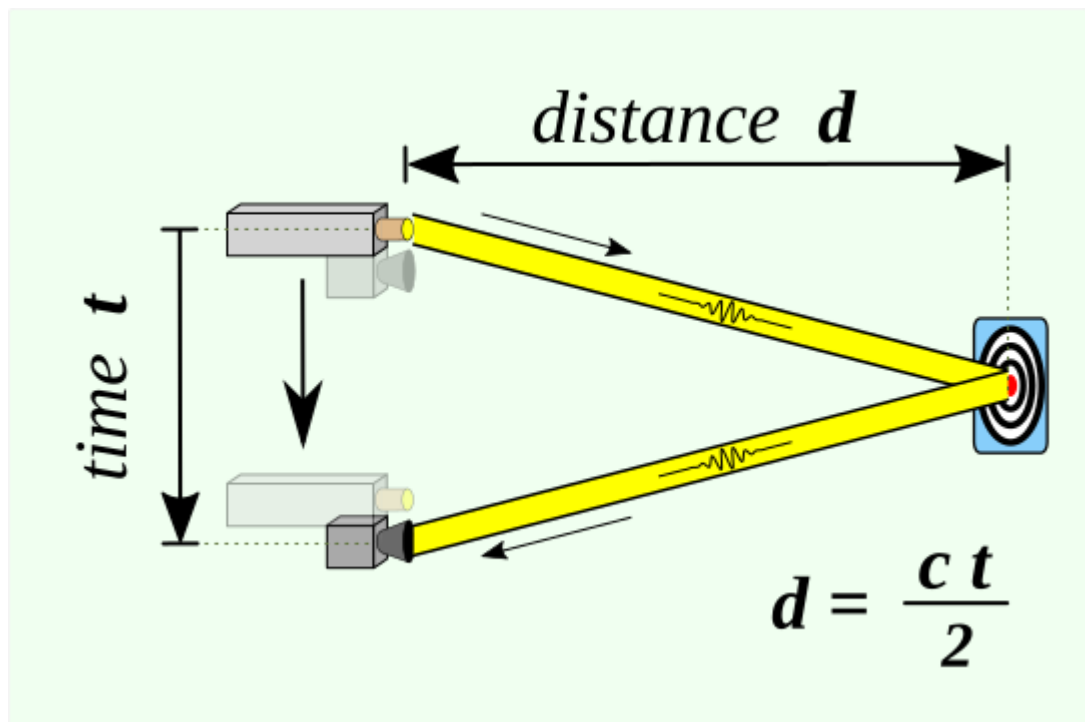
Kuva 4. Strukturoidun valon tekniikan rakenne (mukailtu lähteestä Steger et al. 2018, s. 86, kuva 2.66)

Strukturoitua valoa hyödynnetään valmistavassa teollisuudessa esimerkiksi suurten va-
paamuotoisten kappaleiden mittaamisessa sekä kappaleiden takaisinmallinnuksessa
(engl. reverse engineering) (Sansoni et al. 2009, s. 582–585).

2.3.4 Kulkuaiquatekniikka

Kulkuaiquatekniikka (engl. time-of-flight, TOF) on tekniikka, jossa kamerat lähettävät sä-
teilyä, esimerkiksi valoa tai infrapunasäteilyä, ja mittaavat ajan, joka säteilyltä kuluu hei-
jastua kohteesta takaisin kameraan. Tämän avulla voidaan laskea kohteesta pisteiden
etäisyyksiä kameraan. (Steger et al. 2018, s. 91)

TOF-järjestelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden toimintaperiaatteen mukaan:
Pulssimoduloitua säteilyä lähettävät kamerat, ja jatkuvaa aaltomoduloitua säteilyä läh-
tävät kamerat. Näistä ensiksi mainittu lähettää säteilypulssin, ja laskee sen matka-ajan
 t_d säteilylähteestä kohteeseen, ja takaisin anturiin. Kun valonnopeus c tunnetaan, saa-
daan kohteen etäisyys kameraan laskettua kaavalla $d = c \frac{t_d}{2}$. Kuvassa 5 on esitetty
tämä toimintaperiaate. Jatkovaa aaltomoduloitua säteilyä käyttävä järjestelmä sen sijaan
lähettää jatkuvaa säteilyä, joka on amplitudimoduloitua. Kamera mittaa vaihe-eroa takai-
sin heijastuneesta säteilystä, ja tämän perusteella kykenee määrittämään kohteen etäi-
syyden kameraan. (Steger et al. 2018, s. 92–93)

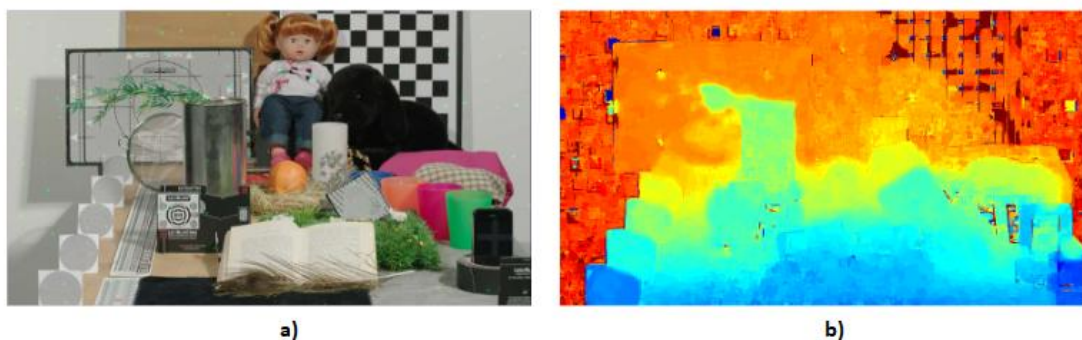


Kuva 5. Kulkuaiquatekniikan yksinkertaistettu toimintaperiaate (RCraig09 2020)

TOF-kamerat tuottavat matalan resoluution kuvia, joten ne eivät sovellu esimerkiksi tarkkaan laaduntarkastukseen. Toisaalta tekniikan vahvuuksia on sen nopeus: kamerat pysyvät muodostamaan kokonaisen syvyyskartan yhdellä otoksella, ja suhteellisen nopealla kuvataajuudella. Täten tekniikka sopii paremmin käytettäväksi liikkuvien kohteiden sovelluksissa, kuten pelaaminen, eleiden tunnistus, ja robotiikka. TOF-tekniikkaa hyödyntää myös LIDAR-järjestelmät (engl. light detection and ranging), joissa muodostetaan syvyyskartta ympäristöstä laservalon avulla, mittaamalla heijastuksen kulku-aika piste pisteeltä. (Hornberg 2017, s. 760)

2.3.5 Shape-from-focus

Shape-from-focus (tunnetaan myös nimellä depth-from-focus) on passiivinen 3D-konenäön tekniikka, jossa syvyystiedon hankinta perustuu kuvien tarkkuusominaisuuksien mittaukseen kuvasarjoista, esimerkiksi reunojen terävyyden mittaus (Hornberg 2017, s. 758). Tarkemmin kuvattuna toimintaperiaate on seuraavanlainen: aluksi samasta kohteesta otetaan sarja kuvia eri tarkennusasetuksilla. Tämä tarkoittaa, että joko kameran ja kohteen välistä etäisyyttä tai kameran linssin tarkennusominaisuuksia muutetaan kuvien ottamisen välillä. Näin kohteesta saadaan luotua kuvasarja, joka koostuu eri etäisyyksille tarkennetuista kuvista. Seuraavaksi tietokone etsii kuvasarjasta jokaiselle pikselille kuvan, jossa pikseli on mahdollisimman ”terävä”. Kun jokaisen kuvan tarkennus-etäisyys ja linssin tarkennusominaisuudet tunnetaan, pystytään kohteesta luomaan syvyyskartta geometrisen laskennan avulla. (Moeller et al. 2015) Kuvassa 6 on esimerkki shape-from-focus-menetelmällä muodostetusta syvyyskartasta.



Kuva 6. Kuva b) on esimerkki syvyyskartasta, joka on saatu kuvasta a) käyttämällä shape-from-focus-menetelmää. Kuvan b) punaiset alueet kuvaavat kohteita, jotka ovat kaukana kamerasta, ja siniset alueet kohteita, jotka ovat lähellä kameraa. (Mukailtu lähteestä Moeller et al. 2015, kuva 6)

Shape-from-focus on suhteellisen yksinkertainen ja edullinen konenäkötekniikka, ja se sopii hyvin pienikokoisten kohteiden kuvantamiseen. Toimiakseen se vaatii, että koko

kohteen pinnalla on tekstuuria. (Sansoni et al. 2009, s. 576–579) Shape-from-focus -tekniikkaa hyödynnetään teollisuudessa etenkin hienokoneistettujen pintojen tarkastamiseen ja pienten rakenteiden pinnan profiilin tarkkaan mittaamiseen mikroskooppisella tasolla (Hornberg 2017, s. 769).

2.3.6 Yhteenveto tekniikoista

Yhteenvetona työssä läpikäydyistä tekniikoista voidaan todeta, että ne voidaan lajitella toimintaperiaatteen mukaan kolmeen eri luokkaan (kolmiomittaus, kulkuaikamittaus ja 2D-kuvien analyysi), sekä käytetyn valaistuksen mukaan kahteen eri luokkaan (aktiivinen ja passiivinen). Työssä esitellyt viisi tekniikkaa ovat koottuna taulukkoon 1.

Taulukko 1. 3D-konenäkötekniikoiden luokittelua. (Mukailtu lähteistä Hornberg 2017, s. 758, taulukko 10.1; Sansoni et al. 2009, s. 570, taulukko 1)

Tekniikka	Toimintaperiaate	Valaistus
Stereonäkö	Kolmiomittaus	Passiivinen
Laserkolmiomittaus	Kolmiomittaus	Aktiivinen
Strukturoitu valo	Kolmiomittaus	Aktiivinen
KulkuaiKateknikka	KulkuaiKamittaus	Aktiivinen
Shape-from-focus	2D-kuvien analyysi	Passiivinen

Työssä käsitellyistä tekniikoista kolmiomittausta käyttää useampi tekniikka. Valaistuksessa puolestaan kolme tekniikkaa käyttää aktiivista valaistusta ja kaksi tekniikkaa passiivista valaistusta.

3. 3D-KONENÄÖN SOVELLUKSET

Kolmiulotteista konenäköä voidaan hyödyntää monella eri tavalla teollisuuden valmistusprosessien eri vaiheissa. Konenäköjärjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi ihmisille liian vaarallisissa ympäristöissä, sillä tehtaissa työskenteleviä ihmisiä ei turvallisuussyistä saa altistaa liian korkeille lämpötiloille, myrkylliselle ilmalle, liian korkeille melutasoille tai ionisoivalle säteilylle. Konenäköjärjestelmät eivät myöskään kärsi ihmisten inhimillisistä rajoitteista, kuten väsymys, epämukavuus ja sairaudet. Konenäkö suoriutuu ihmistä nopeammin monissa tarkastustehtävissä, ja kykenee tarkkoihin mittaustehtäviin, joita ihminen ei pysty suorittamaan. (Batchelor 2012, s. 4) Yleisimmät perusteet teollisen konenäköjärjestelmän hankkimiselle ovat tuotantokustannusten vähentäminen, tuotteen luotettavuuden parantaminen, prosessitehokkuuden parantaminen ja työntekijän turvallisuuden parantaminen (Batchelor 2012, s. 1333).

Tässä luvussa esitellään 3D-konenäön käyttöä valmistavan teollisuuden sovelluksissa. Esiteltävät sovellusalueet ovat laaduntarkastus ja mittaus, poiminta ja paikoittaminen sekä ympäristön havainnointi. Näihin sovellusalueisiin päädyttiin, koska tiedonhakua tehtäessä nämä sovellusalueet nousivat määrällisesti useimmiten esille.

3.1 Laaduntarkastus ja mittaus

3D-konenäön yksi tärkeimmistä sovelluskohteista on laaduntarkastus teollisuudessa. Kolmiulotteisilla konenäköjärjestelmillä voidaan havaita tuotantovirheitä 2D-konenäköjärjestelmiä luotettavammin. (Wöhler 2009, s. 243) Hyvä esimerkki sovelluksesta, jossa 3D-konenäöllä saavutetaan huomattava etu 2D-konenäköön verrattuna, on liimauspinnan tarkastus auton korin osasta. Liiman ja liimauspinnan välinen kontrasti on 2D-kuvassa usein heikko ja epäluotettava, joten 2D-konenäöllä on vaikeaa toteuttaa laaduntarkastusta kyseisessä tehtävässä. 3D-konenäöllä voidaan sen sijaan havaita liimauspinnan topologia eli kolmiulotteinen muoto, joka tekee tarkastuksesta helppoa ja luotettavaa. (Wöhler 2009, s. 253) Vastaavalla tavalla myös juotosliitosten tarkastus on vaikeaa 2D-konenäöllä juotosmateriaalin vaihtelevan heijastuksen takia, kun taas 3D-konenäöllä voidaan tarkastaa juotoksen kolmiulotteinen muoto, mikä tekee tarkastuksesta helpompaa. (Hornberg 2017, s. 766)

Teollisuudessa yleinen tapa kappaleiden mittaamiseen on käyttää koordinaattimittauskonetta, jossa mittauspää koskettaa fyysisesti kappaleen pintaa eri pisteissä tallentaen

pisteiden koordinaatit, ja luo näin 3D-mallin. Joissain mittaustehtävissä 3D-konenäköjärjestelmillä voidaan kuitenkin saavuttaa huomattavia etuja koordinaattimittauskoneeseen verrattuna. Tang et al. (2019) esittelevät shape-from-focus-tekniikkaan perustuvan mittausmenetelmän, joka mahdollistaa hiomalaikkojen topografian eli pinnanmuotojen tarkan mittaamisen. Tässä mittaustehtävässä koordinaattimittauskoneella on monia haasteita, johtuen sen vaatimasta fyysisestä kontaktista hiomalaikkaan. Mittausprosessin aikana koneen mittauspää kuluu, joka aiheuttaa epätarkkuutta mittauksiin. Lisäksi kontakti voi aiheuttaa kulumaa ja vaurioita myös mitattavaan kappaleeseen eli hiomalaikkaan. 3D-konenäköjärjestelmät eivät puolestaan vaadi fyysistä kosketusta kappaleeseen, joten ne sopivat kyseiseen mittaustehtävään paremmin. (Tang et al. 2019)

3D-konenäköä hyödynnetään myös erilaisissa mittauksissa, kuten valmistusprosessin aikaisessa mittauksessa. Garmendia et al. (2018) esittelevät hallintajärjestelmän, joka käyttää strukturoidun valon menetelmään pohjautuvaa 3D-skanneria. Sitä voidaan hyödyntää Laser Metal Deposition (LMD) -prosessissa. LMD on materiaalia lisäävän valmistuksen tekniikka, jossa kiinteitä osia rakennetaan kerros kerrokselta käyttäen metallijauhetta tai -lankaa, joka sulatetaan korkeatehoisella laserilla. LMD-prosessi on erittäin herkkä pienille muutoksille syöttöparametreissa, mikä edellyttää tarkan säädön ja valvonnan varmistamista lopputuotteen laadun takaamiseksi. Artikkelissa esitelty järjestelmä käyttää 3D-skanneria valmistusprosessin aikaisiin mittauksiin ja rakennuspolkujen korjauksiin. Mittaustietojen avulla järjestelmä pystyy ylläpitämään optimaalisen etäisyyden suuttimen ja valmistettavan kappaleen välillä, mikä on ratkaisevan tärkeää valmistusvirheiden välttämiseksi. Tietyissä valmistusprosessin vaiheissa aineen lisäys keskeytetään ja osa skannataan, ja siitä luodaan kolmiulotteinen pistepilvi. Tämän 3D-tiedon perusteella ohjausalgoritmi säätää suuttimen asetuksia korjatakseksi havaitut virheet, varmistaen, että valmistetun osan geometria vastaa tarkasti alkuperäistä CAD-mallia. Tämän 3D-konenäköä hyödyntävän hallintajärjestelmän avulla kyetään vähentämään ihmisen valvonnan tarvetta valmistusprosessin aikana. Myös kelvottomien osien tuottamisen todennäköisyyttä saadaan vähennettyä järjestelmän avulla. Vertaamalla osia, jotka on valmistettu hallintajärjestelmän kanssa ja ilman, saatiin todistettua, että järjestelmän avulla valmistetut kappaleet olivat tarkemmin muodon mukaisia.

Myös Buchner et al. (2023) hyödyntävät konenäköä kehittämässään 3D-tulostimessa samantyyllisesti kuin aiemman kappaleen esimerkissä. 3D-tulostimen konenäkö on toteutettu neljän kameran ja kahden laserlähteen avulla. Konenäön integroimisen myötä tulostimella on mahdollista tulostaa monimutkaisia ja monimateriaalisia kappaleita korkealla resoluutiolla ja nopeudella. Tämänkin järjestelmän toiminta perustuu konenäön

suorittamaan prosessin aikaiseen mittaukseen. Konenäkö skannaa tulostettavan kappaleen kerrokset reaaliajassa ja kartoittaa epätasaisuudet. Tallennettu topologinen tieto mahdollistaa tulostusaineen määrän säätämisen seuraaville kerroksille, korjaten havaitut poikkeamat. Tämä tulostusprosessin säätö poistaa kappaleen mekaanisen tasoittamisen tarpeen ja laajentaa siten materiaalien määrää, joita voidaan käyttää tulostuksessa. Teknologian avulla saatiin tulostettua jännevetoinen robottikäsi, jossa on jäykkä ydin ja pehmeä, taipuisa kuori, johon on integroitu kanavat pneumaattisesti ohjattuun liikkeeseen ja anturit paineen havaitsemiseen. Toinen esimerkki monimutkaisesta kappaleesta joka tulostimella saatiin valmistettua, on biologista sydäntä muistuttava neste-pumppu, jossa on yksisuuntaiset venttiilit ja virtauskammiot.

3.2 Poiminta ja paikoittaminen

Yksi tyypillisimmistä 3D-konenäköä hyödyntävistä robotin toiminnoista on poiminta ja paikoittaminen (engl. pick-and-place). Tällä tarkoitetaan 3D-konenäön käyttöä kappaleiden havaitsemiseen, tunnistamiseen ja paikantamiseen sekä kappaleiden siirtämistä paikasta toiseen. (Hornberg 2017, s. 771)

Valmistavassa teollisuudessa pick-and-place-robotteja käytetään laajalti automatisoiduilla kokoonpanolinjoilla. Yksi käyttökohde on pienten ja monimutkaisten osien kokoonpano, kuten piirilevyn komponenttien asennus, josta robotti suoriutuu ihmistä nopeammin ja tarkemmin. Toisaalta pick-and-place-robotit sopivat hyvin myös raskaampien kokoonpanojen tekemiseen, kuten auton osien kokoamiseen auton runkoihin. Robottien kyky nostaa raskaita kuormia ja suorittaa toistuvia tehtäviä väsymättä tekee niistä ihanteellisia tällaisiin sovelluksiin. (Wevolver 2024)

Jos poimittavat kappaleet ovat sijoitettuna ennalta määräämättömässä paikassa ja asennossa, on kyseessä robotiikassa yleisesti tunnettu kasasta-poimintaongelma (engl. bin picking) (Hornberg 2017, s. 771). Tyypillisesti bin picking -tehtävässä käytetään robottikättä, johon on integroitu jokin 3D-konenäkötekniikka. Pochyly et al. (2010) ovat kehittäneet bin picking -järjestelmän, jossa konenäkö on toteutettu kameralla ja kahdella lineaarisella laserprojektorilla. Järjestelmällä kyettiin poimimaan onnistuneesti kaikki ohutmetallilevyt säilytyslaatikosta. Oh et al. (2009) sen sijaan tekivät järjestelmän, joka hyödyntää strukturoidun valon tekniikkaa. Kim et al. (2012) puolestaan esittelevät useita näköantureita sisältävän järjestelmän, joka yhdistelee 3D- ja 2D-tietoa. Bin picking -tehtävään voidaan siis käyttää useita eri konenäkötekniikoita ja yhdistellä niitä.

3.3 Ympäristön havainnointi

Ympäristön havainnointi on keskeinen osa valmistavan teollisuuden autonomisia ratkaisuja, etenkin itseohjautuvia mobiilirobotteja (engl. AMR, Autonomous Mobile Robot) hyödyntävissä sovelluksissa. Itseohjautuvat mobiilirobotit ovat teollisuudessakin yleisesti käytössä olevia robotteja, joita hyödynnetään esimerkiksi logistiikassa kappaleiden kuljettamisessa paikasta toiseen. Robotit tarvitsevat konenäköä esimerkiksi liikkuaakseen työtilassa esteitä vältellen sekä työskennelläkseen yhteistyössä ihmisten kanssa (Pérez et al. 2016, s. 2). 3D-konenäöllä voidaan parantaa robotin aktiivista havainnointikykyä (Yang et al. 2021, s. 1).

Autonomisen navigoinnin kannalta yksi tärkeimmistä robotin tehtävistä on samanaikainen paikannus ja kartoitus (engl. SLAM, Simultaneous Localization and Mapping). Termillä tarkoitetaan prosessia, jossa robotti samanaikaisesti seuraa sijaintiaan suhteessa sen ympäristöön ja muodostaa kartan ympäristöstään (Pears et al. 2012, s. 86). SLAM-tekniikka on erityisen hyödyllinen apuväline muuttuvissa tehdasympäristöissä, joissa esteitä voi ilmaantua äkillisesti (Cadena et al. 2016, s. 1309). Pearsin et al. (2012, s. 86) mukaan korkean resoluution passiiviset konenäköjärjestelmät sopivat hyvin mobiilirobotteille, sillä ne pystyvät ottamaan kuvia millisekunneissa. Etenkin stereonäköä käyttävät mobiilirobotit ovat yleisiä, koska ne voivat mitata robotin asennon muutoksen kaikki kuusi vapausastetta. Vertaamalla visuaalisia maamerkkejä kuvien välillä robotin liike voidaan laskea. Tätä kutsutaan visuaaliseksi odometriaksi. (Pears et al. 2012, s. 86)

Ympäristön havainnointi on tärkeää myös törmäysten välttelyssä. Pearsin et al. (2012, s. 87) mukaan mobiilirobotit käyttävät usein stereonäköä esteiden havaitsemiseen, sillä stereonäön avulla pystytään muodostamaan ympäristön 3D-kuva liikuttamatta robottia.

Valmistavan teollisuuden mobiilirobotit ovat jo arkipäivää monissa yrityksissä. ABB tarjoaa useita autonomisia mobiilirobottiratkaisuja, jotka hyödyntävät 3D-konenäköä ympäristön havainnoinnissa. Osa ABB:n roboteista käyttää navigoimiseen niin sanottua Visual SLAM -teknologiaa, joka yhdistää tekoälyn ja 3D-konenäön (ABB 2025). Myös japanilainen Omron on tuonut markkinoille laajan valikoiman itseohjautuvia mobiilirobotteja, jotka käyttävät kameroita, tutkia ja antureita ympäristön havainnointiin. Omron kertoo sivuillaan, että teollisuudenaloista esimerkiksi autoteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa sekä digitaali- ja puolijohdeteollisuudessa autonomiset mobiilirobotit ovat merkittävässä roolissa (Omron 2025). Samantyyllisiä mobiilirobotteja tarjoaa myös saksalainen KUKA, joka kertoo näiden robottien mahdollistavan merkittävän tehokkuuden kasvun varastoissa ja tuotantoympäristöissä (KUKA 2025).

4. POHDINNAT

Tässä luvussa käyn läpi omia havaintojani ja johtopäätöksiäni tutkielman tulosten perusteella. Tarkastelun lähtökohtana ovat tutkielman päätutkimuskysymys – Miten 3D-konenäkö voidaan hyödyntää valmistavassa teollisuudessa? – ja apututkimuskysymys – Mitä eri kuvantamistekniikoita käytetään 3D-konenäön toteuttamiseksi? Pohdinnat perustuvat pitkälti aiempiin lukuihin (tekniikoiden esittely ja sovelluskohteet) ja pyrkivät yhdistämään teorian käytäntöön.

4.1 3D-konenäön hyödyt valmistavassa teollisuudessa

Tutkimusaineiston perusteella 3D-konenäkö tarjoaa valmistavalle teollisuudelle kolme keskeistä hyötyaluetta: laaduntarkastuksen ja mittauksen parantaminen, robottien käytämisen mahdollistaminen haastavammissa tehtävissä sekä turvallisuuden ja joustavuuden parantaminen tuotantoympäristössä. Nämä hyödyt ovat linjassa esimerkkien kanssa, joissa 3D-mittaus mahdollistaa liimaus- ja juotosliitosten topologian tarkan tarkastelun ja missä prosessin aikainen mittaus korjaa valmistusparametreja reaaliaikaisesti (vrt. Wöhler 2009; Hornberg 2017; Garmendia et al. 2018; Buchner et al. 2023).

Laaduntarkastuksessa 3D-tieto tuo etua silloin, kun 2D-kuvan kontrastierot tai pinnan heijastusominaisuudet tekevät 2D-analyysistä epäluotettavaa. Edellä mainitut liimapintojen ja juotosliitosten tarkastus on tästä hyvä esimerkki, kuten myös pintaprofiilien mittaus. Mittaustehtävissä 3D-järjestelmät vähentävät tarvetta kosketusmittauksille (koordinaattimittauskone), mikä nopeuttaa mittauksia ja vähentää riskiä mittauspään ja kappaleen vaurioitumiselle (Tang et al. 2019). Robotiikassa 3D-konenäkö mahdollistaa kassasta-poimintatehtävät sekä paremman paikoittamisen kokoonpanossa, mikä laajentaa robottien käyttöä tehtäviin, jotka aiemmin vaativat ihmisen näkökykyä ja hienomotoriikkaa (Hornberg 2017; Kim et al. 2012). 3D-konenäöllä voidaan parantaa myös autonomisten mobiilirobottien havainnointikykyä (Yang et al. 2021). Tämän ansiosta robotteja voidaan käyttää muuttuvissa tehdasympäristöissä, sillä robotti kykenee havaitsemaan yllättäen eteen ilmaantuvat esteet (Cadena et al. 2016). Tämä parantaa tuotannon turvallisuutta ja joustavuutta.

4.2 Kuvantamistekniikoiden soveltuvuus eri käyttötapauksiin

Tutkielmassa esitellyt viisi 3D-konenäön kuvantamistekniikkaa (stereonäkö, laserkolmiomittaus, strukturoitu valo, kulkuairotekniikka ja shape-from-focus) ovat ominaisuuksiltaan erilaisia, joten parhaimman tekniikan valinta riippuu aina käyttötapauksesta. Jokaisella tekniikalla on omat etunsa ja heikkoutensa. Tekniikkaa valittaessa on otettava huomioon mm. tarkkuusvaatimukset, ympäristöolosuhteet, kohteen materiaali, nopeusvaatimukset ja kustannusrajoitteet.

Monesti joudutaan tekemään kompromissi kahden valintaperusteen välillä. Tästä hyvä esimerkki on tarkkuus ja nopeus; usein parempi kuvantarkkuus vaatii enemmän aikaa kuvantamisprosessiin, mikä laskee kuvantamisen nopeutta. Esimerkiksi laserkolmiomittaus ja strukturoidun valon menetelmät tarjoavat usein korkean resoluution ja tarkan pinnanmallinnuksen, mutta vaativat usein skannausliikettä tai useamman otoksen, mikä hidastaa mittauksia. Kulkuairotekniikkaa käyttävät TOF-kamerat ovat puolestaan nopeita ja pystyvät tuottamaan syvyyskartan yhdellä otoksella, mutta resoluutio on usein matalampi, joten ne soveltuvat paremmin esimerkiksi navigointiin ja muihin liikkuvien kohteiden sovelluksiin kuin tarkkoihin laaduntarkastustehtäviin (Hornberg 2017).

Ympäristöolosuhteet ja pinnan materiaalit ovat usein rajoittavia tekijöitä kuvantamistekniikan valinnassa. Heijastavat, kiiltävät tai läpinäkyvät pinnat haittaavat monia optisia menetelmiä. Esimerkiksi shape-from-focus ja tekstuuriperustaiset stereomenetelmät hyötyvät pinnan tekstuurista, joten ne eivät toimi hyvin homogeenisilla tai heijastavilla pinoilla (Hornberg 2017; Sansoni et al. 2009).

4.3 3D-konenäön vaikutus ihmistyövoimaan

3D-konenäön käyttöönotto vaikuttaa myös ihmisten työtehtävien luonteeseen. Automaation laajentaminen voi vähentää rutiininomaista ja vaarallista käsityötä, mutta samalla se edellyttää uudenlaista osaamista huollossa, ohjelmistokehityksessä ja datan tulkinnaissa. Työntekijöiden koulutus ja muutosjohtaminen ovat avainasemassa, jotta teknologiaa voidaan hyödyntää vastuullisesti ja tehokkaasti.

Toisaalta 3D-konenäön yleistyminen nostaa esiin myös työvoiman sopeutumiseen liittyviä haasteita. Automaatio ei välttämättä vähennä työpaikkojen kokonaismäärää, mutta se muuttaa niiden sisältöä ja vaatimustasoa (Frey & Osborne 2017). Yrityksissä, joissa muutosprosesseja ei hallita riittävän hyvin, voi esiintyä osaamisvajeita ja vastarintaa uutta teknologiaa kohtaan. Siksi organisaatioiden on tärkeää panostaa jatkuvaan koulutukseen ja työntekijöiden osallistamiseen, jotta konenäköjärjestelmien käyttöönotto tukee sekä tuottavuutta että henkilöstön hyvinvointia. (Nath et al. 2020)

4.4 Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa esitettyjen pohdintojen pohjalta on koottu yhteen taulukko 2, jossa on listattuna työssä esiteltyt viisi 3D-kuvantamistekniikkaa, niiden vahvuudet ja heikkoudet sekä parhaat sovelluskohteet.

Taulukko 2. 3D-kuvantamistekniikoiden vahvuudet, heikkoudet ja parhaat sovelluskohteet. (Taulukko perustuu luvussa 2 esiteltyihin teknisiin ominaisuuksiin ja luvun 3 sovel-lusesimerkkeihin.)

Tekniikka	Vahvuudet	Heikkoudet	Parhaat sovelluskohteet
Stereonäkö	Tarkkuus	Vaatii tekstuuria, vastaavuusongelmat homogeenisilla pinnoilla	AMR-navigointi, laaduntarkastus, poiminta ja paikointus
Laserkolmiomittaus	Tarkka yksittäisen profiilin mittaus	Vaatii liikettä (skannaus)	Pintaprofiilimittaukset, akselimittaukset, robottien tarkennettu havainnointi
Strukturoitu valo	Tarkkuus	Herkkä ympäristön valaistukselle, kohteen ja kameran täytyy pysyä paikoillaan	Laaduntarkastus, takaisinmallinnus (reverse engineering)
Kulkuaiquatekniikka	Nopeus, sopii liikkuviin kohteisiin	Matala resoluutio	AMR-navigointi, törmäysten välttäminen
Shape-from-focus	Halpa, soveltuu mikromittauksiin	Vaatii monia kuvia ja selkeän tekstuurin	Laaduntarkastus, tarkat pintaprofiilimittaukset

5. YHTEENVETO

Tämän tutkielman tavoitteena oli selvittää, miten 3D-konenäköä voidaan hyödyntää valmistavassa teollisuudessa ja mitä kuvantamistekniikoita käytetään 3D-konenäön toteuttamiseksi. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja siinä esiteltiin konenäön perusrakenne sekä viisi yleistä 3D-kuvantamistekniikka: stereonäkö, laserkolmiomittaus, strukturoitu valo, kulkuaikatekniikka ja shape-from-focus. Lisäksi tarkasteltiin kolmea keskeistä sovellusaluetta valmistavassa teollisuudessa: laaduntarkastus ja mittaus, poiminta ja paikoittaminen sekä ympäristön havainnointi, jossa käsiteltiin mobiilirobottien autonomista navigointia.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella 3D-konenäkö tarjoaa merkittäviä etuja tuotannon laadunvalvonnassa, mittaustehtävissä ja robotiikassa. Sopivimman kuvantamistekniikan valintaan vaikuttavat mm. tarkkuusvaatimukset, ympäristöolosuhteet, kohteen materiaali, nopeusvaatimukset ja kustannusrajoitteet. Joissain tapauksissa paras ratkaisu on käyttää useampaa kuvantamistekniikkaa rinnakkain.

Stereonäkö on tekniikka, jossa kaksi kameraa ottavat kuvan eri suunnista. Kolmiulotteinen kuva muodostetaan etsimällä kuvista toisiaan vastaavat pisteet. Tekniikka on suhteellisen yksinkertainen ja edullinen, ja sitä voidaan hyödyntää monissa eri sovelluksissa, kuten robottien navigoinnissa, laaduntarkastuksessa, poiminnassa ja paikoittamisessa. Stereonäön heikkoutena on suorituskyvyn heikkeneminen homogeenisilla pinnoilla.

Laserkolmiomittauksessa kohteeseen heijastetaan lasersäde ja mitataan sen heijastuksen paikka kuvatasossa. Näin saadaan tarkkaa tietoa kohteen pinnanmuodoista. Menetelmän etuna on korkea mittaustarkkuus ja kyky tuottaa yksityiskohtainen pintaprofiili. Robotit voivat käyttää laserskannausta myös ympäristön havainnointiin. Menetelmän heikkoutena voidaan pitää sitä, että kuvantaminen vaatii usein kappaleen tai anturin liikkuttamista, mikä voi hidastaa prosessia.

Strukturoidun valon menetelmässä kohteeseen heijastetaan ennalta tunnettu valokuvio, ja kuvion vääristymistä päätellään pinnanmuodot. Tekniikka tarjoaa korkean resoluution ja tarkkuuden, minkä ansiosta se on suosittu erityisesti yksityiskohtaista pinnanmittausta vaativissa laaduntarkastussovelluksissa. Sen haasteena on kuitenkin herkkyyys valaistusolosuhteille. Lisäksi se soveltuu parhaiten paikallaan oleviin tai hitaasti liikkuviin kohteisiin.

Kulkuairotekniikassa mitataan aika, jonka valopulssi tarvitsee kulkeakseen kohteeseen ja takaisin anturiin. Tuloksena saadaan syvyyskartta koko näkökentästä. Tekniikan vahvuutena on sen nopeus ja kyky tuottaa syvyyskartta yhdellä otoksella, mikä tekee siitä erinomaisen liikkuvissa sovelluksissa, kuten mobiilirobottien navigoinnissa ja törmäysten välttämässä. Tekniikan heikkoutena on matala kuvan tarkkuus.

Shape-from-focus-tekniikka perustuu sarjaan kuvia, joissa tarkennusta muutetaan systemaattisesti. Pinnan kolmiulotteinen muoto rekonstruoidaan määrittämällä, millä tarkennussyvyydellä kukin kuvapiste on terävimmillään. Menetelmän etuna on sen edullisuus ja soveltuvuus mikromittauksiin, mutta se vaatii monia kuvia ja riittävästi tekstuuria pinnasta. Siksi se ei sovellu nopeutta vaativiin sovelluksiin. Shape-from-focus soveltuu erityisesti pienten kappaleiden laaduntarkastukseen ja tarkkoihin pintaprofiilimittauksiin.

Lopuksi todettakoon, että 3D-konenäkö on kelvollinen teknologia moniin valmistavan teollisuuden tehtäviin, mutta menestyksekkäs käyttöönotto vaatii huolellista suunnittelua. Oleellista on määrittää mm. nopeus- ja tarkkuusvaatimukset sekä kustannusrajoitteet, jotta sopivimman kuvantamistekniikan valinta onnistuisi. 3D-konenäön käyttöönoton yhteydessä tärkeää on myös yrityksen valmius ylläpitoon ja osaamisen kehittämiseen. Näin toimien teolliset toimijat voivat hyödyntää 3D-konenäön tuomia etuja laadussa, tehokkuudessa, joustavuudessa ja turvallisuudessa.

LÄHTEET

- ABB. Visual SLAM. Saatavissa (viitattu 26.9.2025): <https://new.abb.com/products/robotics/autonomous-mobile-robots/visual-slam>
- Anand, S. & Priya, L. (2020). *A Guide for Machine Vision in Quality Control*. 1st ed. CRC Press, Milton.
- Batchelor, B.G. (2012). *Machine Vision Handbook*. 1st ed. London: Springer London.
- Buchner, T.J.K., Rogler, S., Weirich, S., Armati, Y., Cangan, B.G., Ramos, J., Twiddy, S.T., Marini, D.M., Weber, A., Chen, D., Ellson, G., Jacob, J., Zengerle, W., Katalichenko, D., Keny, C., Matusik, W. & Katzschmann, R.K. (2023). Vision-controlled jetting for composite systems and robots. *Nature* 623, pp. 522–530.
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I. & Leonard, J. (2016). Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), pp. 1309–1332.
- Davies, E.R. (2012). *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*. 4th edition. Waltham, Mass: Elsevier.
- Frey, C.B. & Osborne, M.A. (2017). The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 114, pp. 254–280.
- Garmendia, I., Leunda, J., Pujana, J. & Lamikiz, A. (2018). In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning. *Procedia CIRP*. 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23–27 April 2017, Bilbao, Spain, pp. 375–380.
- Hornberg, A. (2017). *Handbook of machine and computer vision: the guide for developers and users*. Second, revised and updated edition. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Kim, K., Kim, Joongbae, Kang, S., Kim, Jaehong & Lee, J. (2012). Vision-based bin picking system for industrial robotics applications. 9th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), IEEE, Daejeon, South Korea.
- KUKA. Autonomous mobile robotics (AMR). Saatavissa (viitattu 26.9.2025): <https://www.kuka.com/en-de/products/amr-autonomous-mobile-robotics>
- Moeller, M., Benning, M., Schonlieb, C. & Cremers, D. (2015). Variational Depth From Focus Reconstruction. *IEEE Transactions on Image Processing* 24, pp. 5369–5378.

- Nath, S.M., Dunkin, A., Chowdhary, M. & Patel, N. (2020). *Industrial Digital Transformation: Accelerate Digital Transformation with Business Optimization, AI, and Industry 4.0*. Packt Publishing, Limited. Birmingham, United Kingdom.
- Oh, J.-K., Baek, K., Kim, D. & Lee, S. (2009). Development of structured light based bin picking system using primitive models. 2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), Seoul, South Korea, pp. 46–52.
- Omron. Autonomous Mobile Robots (AMR). Saatavissa (viitattu 26.9.2025): <https://industrial.omron.fi/fi/products/autonomous-mobile-robot>
- Pears, N., Liu, Y. & Bunting, P. (2012). *3D Imaging, Analysis and Applications*. London: Springer London (SpringerLink Bücher).
- Pérez, L., Rodríguez, Í., Rodríguez, N., Usamentiaga, R. & García, D.F. (2016). Robot Guidance Using Machine Vision Techniques in Industrial Environments: A Comparative Review. *Sensors* 16.
- Pochlyly, A., Kubela, T., Kozak, M. & Cihak, P. (2010). Robotic Vision for Bin-Picking Applications of Various Objects. *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, pp. 1–5.
- RCraig09. (2020). Diagram illustrating the concept of Time of flight. Saatavissa (viitattu 26.10.2023): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:20200501_Time_of_flight.svg
- Sansoni, G., Trebeschi, M. & Docchio, F. (2009). State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors* 9, pp. 568–601.
- Steger, C., Ulrich, M. & Wiedemann, C. (2018). *Machine vision algorithms and applications*. 2nd ed. Wiley, Newark.
- Tang, J., Qiu, Z. & Li, T. (2019). A novel measurement method and application for grinding wheel surface topography based on shape from focus. *Measurement* 133, pp. 495–507.
- Wevolver. (2024). *Pick-and-Place Robots: An In-Depth Guide to Their Functionality and Applications*. Saatavissa (viitattu 6.2.2025): <https://www.wevolver.com/article/pick-and-place-robots-an-in-depth-guide-to-their-functionality-and-applications>
- Wöhler, C. (2009). *3D Computer Vision: Efficient Methods and Applications*. Springer Berlin Heidelberg.
- Yang, R., Mo, Q., Li, Y., Gan, L. & Hu, R. (2021). Application of three-dimensional vision perception technology to industrial robots. *Journal of Physics: Conference Series*.

Zhang, S. (2013). Handbook of 3D machine vision: optical metrology and imaging. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Fla.