

Juhani Jokitulppo

3D-KONENÄKÖ VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Niko Siltala
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Juhani Jokitulppo: 3D-konenäkö valmistavassa teollisuudessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2022

3D-konenäkö on valmistavassa teollisuudessa uudenlainen työkalu korvaamaan ihmistyövoimalla tehtäviä töitä. Se aiheuttaa muutoksen valmistavan teollisuuden työvoiman tarpeeseen automatisoimalla työtehtäviä, joita aiemmin käytössä olleet koneet eivät ole voineet hoitaa. 3D-konenäkö ratkaisee kaksiulotteisessa konenäköjärjestelmässä ilmenneet ongelmat tuomalla uuden ulottuvuuden kappaleen tutkimiseen ja mittaamiseen. Sen avulla valmistavan teollisuuden yritykset voivat myös saavuttaa kilpailuetua suhteessa kilpailijoihin.

Tutkielmassa tehdään kirjallisuuskatsaus valmistavassa teollisuudessa käytössä oleviin 3D-konenäkösovelluksiin. Tutkielman päätavoite on selvittää sekä 3D-konenäön sovelluksia että sen käytön etuja ja haittoja. Työn aineistona ovat vertaisarvioidut lehtiartikkelit, aiheesta kertovat kirjat ja konferenssijulkaisut.

Tutkielmassa tarkastellaan ensimmäisenä 3D-konenäkötekniikoita ja niiden toimintaperiaatteita. 3D-konenäköjärjestelmän toimintaperiaate on lähes samanlainen tavallisen konenäköjärjestelmän kanssa. Järjestelmässä on enemmän komponentteja, jotta 3D-näkymä on mahdollista luoda tietokoneella. Tämän selityksen seurauksena on myöhemmin käsiteltäviä valmistavan teollisuuden sovelluksia mahdollista ymmärtää paremmin. Tutkielmassa saatiin selville 3D-konenäön olevan käytössä esimerkiksi tuotteiden automaattisessa kokoonpanossa ja laadunvarmistuksessa. Tuotannon tehtävissä käytetäänkin 3D-konenäöllä varustettuja robotteja tunnistamaan kappaleen oikea sijainti ja asennus kokoonpanossa. 3D-konenäön käytön suurimpia haasteita ovat sen käyttöönoton korkea hinta. Teknologian suurimpia hyötyjä huomattiin olevan kustannussäästöt virheellisen tuotannon ja laadun heiketessä.

Avainsanat: 3D-konenäkö, valmistava teollisuus, konenäköjärjestelmä.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tavoite ja tutkimusongelma.....	1
1.2 Tutkimusmenetelmä ja työn rakenne.....	2
2. 3D-KONENÄKÖ.....	3
2.1 Konenäön kehitys	3
2.2 3D-konenäön merkitys	4
2.3 3D-konenäön rakenne.....	4
2.4 3D-konenäön tekniikat	6
2.4.1 Kulkuairotekniikka	7
2.4.2 Stereonäkö	9
2.4.3 Laserkolmiomittaus	10
3. 3D-KONENÄÖN SOVELLUKSET	13
3.1 Kappaleen ja paikan tunnistus	14
3.2 Robottiikka	15
3.3 Laadunvalvonta.....	18
4. POHDINNAT JA YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Valmistavaan teollisuuteen on tullut suuria muutoksia 3D-konenäön kehittymisen myötä. Sillä on merkittävä osa valmistavan teollisuuden tuotannossa ja sovelluksissa, jotka ovat muuttuneet hyvin nopealla vauhdilla. Sen laatu on seurausta 2000-luvulla tapahtuneesta tietokoneiden nopeasta kehityksestä 3D-tiedonkäsittelyssä. 3D-konenäöllä tarkoitetaan konenäön näkökentän laajenemista syvyysuuntaan. Konenäkö taas on järjestelmä, jolla on kyky tulkita ja nähdä siihen tullutta kuvaa (Steger et al. 2018 s.1). 3D-konenäkö on kehitetty 2010-luvulla paljon toistettavammaksi ja luotettavammaksi välineeksi kuin ihmisenäkö. Sitä hyödynnetään valmistavassa teollisuudessa esimerkiksi tuotteiden laadunvalvonnassa, joka tehostuu, kun tuotteiden tietoa pystytään käsittelemään myös syvyysuunnassa. Tätä käytetään esimerkiksi tuotteessa olevien säröjen paikantamiseksi. (Steger et al. 2018 s.1)

3D-konenäköteknologia on hyvin merkittävä aihe tutkia, sillä aihe on verrattain uusi suhteessa muihin käytössä oleviin teknologioihin teollisuudessa. Aiheesta olevaa tutkimusta ei ole läheskään yhtä paljon kuin kaksiulotteista konenäköä koskevaa tutkimusta. Se on lisäksi hyvin ajankohtainen, koska sen kehitys on 2010-luvulla jatkuvaa ja kiihtyvää kovan kilpailun vuoksi. Aihe on myös merkittävä tutkimuskohde, sillä 3D-konenäkö pystyy korvaamaan perinteiset ihmisenäöllä tehtävät työt, joihin aiemmat teknologiat eivät ole pystyneet. Näihin töihin on kuulunut tuotteiden kokoonpano ja laadun tarkastaminen kapaleissa, jotka ovat kaksiulotteiselle konenäölle mahdottomia tehtäviä syystä tai toisesta. 3D-teknologiaa käyttämällä voidaan saavuttaa työvoimakustannusten säästöjä tuotannossa. Tämä taas vaikuttaa yhteiskuntaan pitkällä aikavälillä valmistavassa teollisuudessa tarvittavan työvoiman kannalta.

1.1 Tutkimuksen tavoite ja tutkimusongelma

Tässä työssä selvennetään 3D-konenäön käytöllä saavutettuja etuja ja selvitetään, millaisia uusia mahdollisuuksia valmistavan teollisuuden yritykset saavat hyödyntämällä uutta teknologiaa. Työn tavoitteena on myös selvittää 3D-konenäön käyttöä ja hyödyntämistä valmistavan teollisuuden sovelluksissa sekä selvittää erilaiset tekniikat, joita käytetään 3D-konenäön muodostamiseksi.

Päättökysymys: Kuinka 3D-konenäköä hyödynnetään ja sovelletaan valmistavassa teollisuudessa?

Apututkimuskysymys: Mitä on 3D-konenäkö ja kuinka se toimii?

Apututkimuskysymys: Mitkä ovat 3D-konenäön käytön edut ja haitat?

Kandidaatintyön ulkopuolelle rajataan sovellukset, jotka eivät liity valmistavaan teollisuuteen, kuten viihde-elektroniikka ja elintarviketeollisuus, joissa molemmissa hyödynnetään myös 3D-konenäköä eri tavoin. Valmiiden tuotteiden, kuten autopilotilla ajavien autojen toiminnassa olevat 3D-järjestelmät eivät myöskään kuulu työssä käsiteltäviin sovelluksiin. Työhön ei myöskään kuulu 2D-konenäköä hyödyntävät sovellukset valmistavassa teollisuudessa.

1.2 Tutkimusmenetelmä ja työn rakenne

Tämän kandidaatintutkielman toteutusmuotona oli kirjallisuusselvitys ja lähdeaineistona käytettiin 3D-konenäöstä kirjoitettuja kirjoja sekä vertaisarvioituja lehtiartikkeleita ja konferenssijulkaisuja. Aineiston haku toteutettiin käyttämällä Tampereen yliopiston kirjaston tiedonhakupalvelu Andoria sekä Google Scholaria. Näistä palveluista aineiston löytäminen tapahtui käyttämällä aiheeseen liittyviä peruskäsitteitä. Sopivan materiaalin etsinnässä käytettiin esimerkiksi hakusanoja ”Machine vision”, ”Manufacturing industry”, ”3D-machine vision”, ”machine intelligence”, ”3D-computer vision” sekä ”Intelligent manufacturing”. Hakua rajattiin yhdistelemällä käsitteitä toisiinsa. Käsitteiden rajaus englannin kieleen oli välttämätöntä, sillä suomenkielisiä julkaisuja aiheesta oli hyvin vähän saatavilla. Teknologian ollessa nopeasti kehittyvää ja uudistuvaa, aineiston valinnassa jätettiin huomiotta yli 15 vuotta vanhat julkaisut, jotka voivat sisältää vanhentunutta tietoa tai käytöstä poistuneita 3D-konenäön sovelluksia.

Tutkielman rakenne on seuraava. Luvussa 2 selvitetään 3D-konenäön teoreettista toimintaa ja selvennetään erilaisten 3D-tekniikoiden erot sekä toimintaperiaatteet. Luvussa 3 siirrytään käsittelemään 3D-konenäön sovelluksia valmistavan teollisuuden toiminnassa. Luvussa selvitetään myös teknologialla saavutettuja hyötyjä. Luvussa 4 esitellään ensin omaa pohdintaa tutkimuksen tuloksista, minkä jälkeen työ päättyy yhteenvetoon.

2. 3D-KONENÄKÖ

Konenäkö määritellään yleisesti koneen kyvyksi nähdä ja tulkita sen kameraan tulevaa kuvaa ja videota (Steger et al. 2018 s.1). 3D-konenäköksi erotetaan systeemi, joka tulkitsee tietoa x- ja y-koordinaattien lisäksi z-suunnassa eli syvyysuunnassa. Tämän lisäksi erotellaan myös yleensä toisistaan käsitteet *computer vision* ja *machine vision*, jotka suomennetaan tietokonenäköksi ja konenäköksi. Răileanu et al. (2021) määrittelevät *machine vision* -käsitteen teollisuuden koneen kyvyksi prosessoida siihen tullutta visuaalista tietoa. Teollisuudessa koneen prosessointikapasiteetti on yleensä rajallinen, koska teollisuudessa toiminnalta vaaditaan nopeutta ja halpaa hintaa. Tämän vuoksi koneet suunnitellaan niille laadittua tehtävää varten. *Computer vision* eli tietokonenäkö mielletään laajemmaksi käsitteeksi kuvaamaan konenäköä, sillä se ymmärretään kyvyksi käsitellä suuria konenäön tietomassoja (Batchelor 2012). Sen vastaanottaman tiedon käsittelyyn kuluu luonnollisesti enemmän aikaa. Käsite tulee esille, kun puhutaan konenäön teknisistä ominaisuuksista ja matemaattisista algoritmeista. Tässä työssä käsitellään enemmän *machine vision* -tekniikkaan ja sen teollisiin sovelluksiin. Työssä ei käsitellä tietokonenäön sovelluksia.

2.1 Konenäön kehitys

3D-konenäön kehityksen voidaan katsoa alkaneen vuonna 1978, kun MIT-yliopiston tutkijat saivat muodostettua 2D-kuvista tietokoneella ensimmäisen 3D-kuvan (Anand & Priya 2019 s.12). 1980-luvulla kehitys jatkui, kun ensimmäiset älykamerat keksittiin ja varhaiset *stereonäkö*- ja *laser triangulation* -tekniikka esiteltiin (Waszkevitz 2017 s.699). LED-valojen ja kamerajen jatkuvan kehityksen vuoksi nykyään konenäön keksinnöt ja tutkimukset painottuvat erityisesti juuri 3D-tekniikkaan, joka kykenee hyvin haastaviin tehtäviin. 3D-konenäön historiassa todetaan yleisesti, että juuri LED-valot olivat suuri kehitysaskel, sillä niiden valovoiman intensiteetin kyky on moninkertainen aiempiin ratkaisuihin verrattuna. (Anand & Priya 2019 s.12)

2000-luvun aikana tietokoneiden 3D-tiedonkäsittelyn kehitys on ollut nopeaa. Sen vuoksi kehitys nykyiselle tasolle on mahdollistanut komponenttien ja kokoonpanojen tutkimisen sekä analysoimisen lähes 100 %:n tarkkuudella aiemman osittaisen tutkimisen sijaan. 3D-konenäön avulla esimerkiksi robottien suorituskyky on tehostunut valmistavassa teollisuudessa, mikä mahdollistaa komponenttien sattumanvaraisen käsittelyn tuotantolin-

jastossa. 3D-konenäkö on alana kokenut myös viimeiset kymmenen vuotta kovaa kasvun vaihetta ja tälläkin hetkellä uusia innovaatioita kehitellään kilpailuedun saavuttamiseksi. (Connolly 2009)

2.2 3D-konenäön merkitys

Ihmisenäöllä on mahdollista tehdä suurimman osan teollisuuden tehtävistä. Valmistus, kokoonpano, tarkkailu, pakkaaminen ja viimeistely ovat pitkään olleet tehtäviä, joita ihminen on hoitanut näköaistin varassa. Ihmisen näköaisti on ollut tehokas väline teollisuuden työtehtävissä, sillä se osaa erottaa hyvinkin pienet värin vaihtelut havaittavassa kohteessa sekä tunnistaa tutun kappaleen muutosten jälkeen (Batchelor 2012). Se on kuitenkin kaikesta huolimatta hyvin rajallinen työkalu, sillä sen tehokkuuteen vaikuttaa useampi tekijä. Toimintakykyä alentavia tekijöitä ovat esimerkiksi stressi, epämukavuus, sairaus, tylsyys, toistuvuus, häirintä ja alkoholi. Ihmisen turvallisuus voi myös kärsiä, mikäli toimintaympäristönä on myrkyllinen, kuuma, savuinen, räjähdysherkkä tai meluisa tila. (Batchelor 2012)

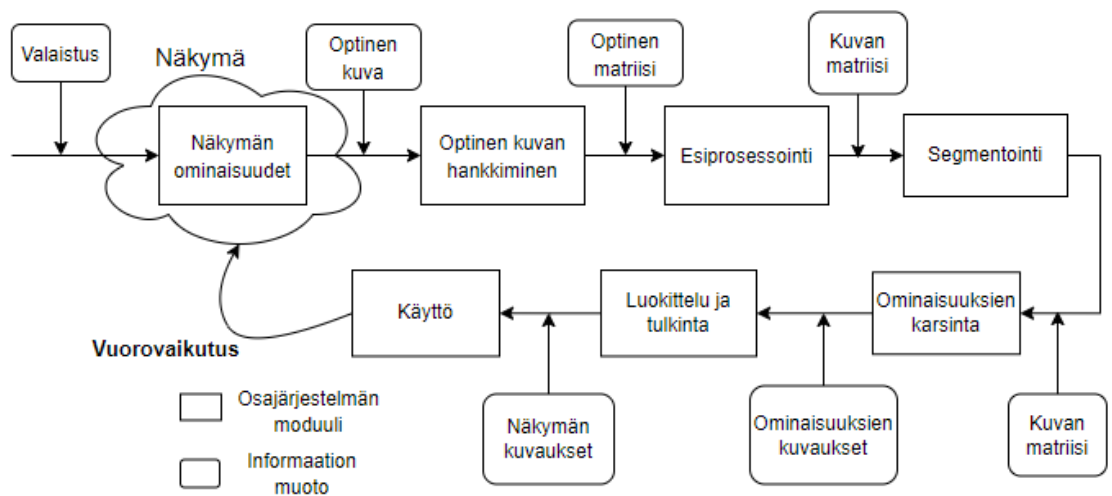
Ihmistyövoiman ongelmia on pyritty ratkaisemaan koneilla. Visuaalisten ratkaisussa konenäkö on ratkaissut suurimman osan ongelmista luotettavuudellaan. 3D-konenäkö on jatkanut tätä samaa prosessia ratkaisemalla jäljelle jääneitä ongelmia. Tästä huolimatta valmistavassa teollisuudessa tuotantoprosessit monimutkaistuvat ja kehittyvät kilpailun koventuessa. Jatkuvasti muuttuvat prosessit, valmistettavat tuotteet ja ympäristöolosuhteet vaikeuttavat tunnistettavuutta, mikä luo konenäölle uusia haasteita. 3D-konenäkö tarjoaa tässä kilpailuedun niille yrityksille, joilla siihen on varaa.

2.3 3D-konenäön rakenne

3D-konenäkö koostuu yleensä yhdestä tai useammasta kamerasta, linssistä, valaistuksesta sekä tiedonkäsittelystä. Tärkeimmät kuvanmuodostamiseen tarvittavat osat ovat kamerat ja tehokas valaistus, jotta saadaan tarkka kuvaus kuvattavan kappaleen rakenteesta. Näistä kuhunkin liittyy omanlaisiaan vaatimuksia ja toimenpiteitä, jotka täytyy ottaa huomioon järjestelmän suunnittelussa.

3D-konenäön osien keskeisiksi tehtäviksi voidaan jaotella valmistavan teollisuuden sovelluksissa kuvan tuotto, sen prosessointi ja hahmontunnistus. Kuvan tai kuvien tuottamisessa kuvan havaitsemisjärjestelmä muuntaa kuvan numeeriseksi tiedoksi, jonka järjestelmä lähettää tietokoneelle prosessoitavaksi. Koneelle lähetettyä 3D-tietoa kuvan tai

kuvien havaitsemisesta muokataan tietoa tulkitsevilla ohjelmalla sopivanlaiseen muotoon, jonka perusteella voidaan tehdä toimenpiteitä tiedon mukaan. (Golnabi & Asadpour 2007) Kuvassa 1 havainnollistetaan prosessin etenemistä yksinkertaistettuna.



Kuva 1 Teollisen 3D-konenäön toimintaperiaate (mukailtu lähteestä Golnabi & Asadpour 2007)

Kuvan havaitsemisen jälkeinen prosessi muodostaa ikään kuin toistorakenteen, mikä 3D-kuvan ottamisen jälkeen suorittaa toimenpiteitä tarvittaessa havaittuun näkymään (Golnabi & Asadpour 2007). Tällaisia toimenpiteitä esitellään luvussa 3.

Ehdottoman tärkeä osa 3D-konenäköprosessia on oikeanlaisen kameran tai kameroiden käyttö. Väärällä kameravalinnalla kuvattavan kappaleen tekstuuri voi jäädä vajaaksi, ja väärin olosuhteisiin sijoitettu kamera voi tuottaa ylivalottunutta kuvaa väärinlaisen valaistuksen johdosta. 3D-kameran keskeinen tarkoitus 3D-konenäössä on luoda kuva kappaleesta, johon kohdistetaan linssin avulla valaistusta hyvän kontrastin saamiseksi.

3D-konenäössä käytettävät kamerrat voidaan karkeasti jaotella niiden käyttämän tekniikan perusteella Time-of-Flight-tekniikkaa hyödyntäviin kameroihin ja triangulation-tekniikkaa hyödyntäviin kameroihin. Kameroissa on myös yleensä elektroniikkaa, jonka avulla video- tai kuvasignaali saadaan välitettyä kuvaa käsittelevälle tietokoneelle. (Steger et al. 2018 s.84)

Kuvan ottavat anturit jaotellaan kahteen tyyppiin, CCD:hen (charge-coupled device) ja CMOS:ään (complementary metal-oxide semiconductor). Näiden molempien anturien toimintaperiaatteet ovat samankaltaiset. Niiden erot tulevat niiden virtapiiriin rakenteen perusteella. CMOS on uudempi teknologia kuin CCD, ja sen etuihin kuuluvat halvempi hinta sekä hyvä toimintanopeus. (Geng 2016) Tämän vuoksi nykyään lähes kaikki myytävät anturit perustuvat CMOS-teknologiaan. Anturin kuvan havaitseminen tapahtuu, kun

valo heijastuu näkymästä kohti kameraa, jolloin valo osuu sensorin pikseleihin, joka muunnetaan sähköiseksi energiaksi tai varaukseksi (Anand & Priya 2019 s.47).

3D-konenäössä valaistus on olennainen osa onnistunutta kuvankäsittelyprosessia. Valaistuksen tarkoituksena on näin ollen saattaa kohteena oleva kappale kameralle mahdollisimman näkyväksi. Hyvän kuvan saaminen vaatii yleensä korkealaatuisia kontrastia, varjoja, tekstuuria ja kappaleen erottumista taustastaan. Konenäön asiantuntijat väittävätkin useasti valaistuksen olevan kaksi kolmasosaa hyvälaatuisesta konenäkötuloksesta (Hornberg 2017). Toisin sanottuna huonolaatuisella valaistuksella voidaan olla varmoja, että saadut tulokset ovat huonolaatuisia. 3D-tekniikoissa ei ole toistaiseksi olemassa algoritmia, joka voisi erottaa kappaleen reunat näkymästä ilman hyvää kontrastia ja valoa. (Hornberg 2017) Tästä ei pidä kuitenkaan päätellä, että valaistus on erillinen osa konenäköä, vaan valaistusta suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon systeemin muiden osien asettamat reunaehdot valaistukselle. Yleisimpinä valaistusratkaisuuksina pidetään nykyään LED- ja laservaloja pitkäikäisyyden ja vähäisten ympäristöongelmien vuoksi. (Geng 2016)

Jokaiseen kameraan tarvitaan 3D-konenäköä varten myös linssi. Linssin tehtävänä on muodostaa kuvattavasta kappaleesta heijastuneen valon perusteella kameraan kuva. Tämä ei kuitenkaan ole linssin ainoa tehtävä systeemissä. Linssin valinnalla määritetään myös systeemin resoluution ja kontrastin taso sekä kameran näkökentässä. (Geng 2016) Linssin valinnalla on siis näin ollen myös merkittävä osuus laadukkaan näkymän muodostuksessa kameraan.

3D-konenäkö tarvitsee toimiakseen tietokoneohjelman, joka tulkitsee havaittua kuvaa. Tätä riippuvuutta voidaan havainnollistaa ihmisenäköä avulla. Ihmisen näköaisti prosessoi kuvaa, kun silmät lähettävät kuvan aivoille, jotka tekevät tulkin silmiin havaitusta näkymästä. Samalla periaatteella kameran anturit lähettävät havaitun kuvan tietokoneelle prosessoitavaksi.

3D-konenäön myötä tietokoneilta vaadittavan prosessointitehon määrä on kasvanut. Suosituin käyttöjärjestelmä, jolla 3D-tietoa käsitellään, on Windows. Tämä johtuu sillä olevien 3D-tiedonkäsittelyohjelmien määrästä. Kappaleen tunnistamiseen käytettävät ohjelmat ovat Windowsilla myös kaikista laadukkaimmat, vaikka Linux-järjestelmän suosio 3D-tiedonkäsittelyssä kasvaa koko ajan. (Geng 2016)

2.4 3D-konenäön tekniikat

3D-konenäköprosessia voidaan havainnollistaa esimerkiksi pöydällä olevan kirjan kuvaamisella. Päältä otettuna kuvaan ei saada tietoa kirjan sivuista. Takaa otettuna kuvaan

ei saada kirjan etupuolta. Samanlainen näkökulma voidaan ottaa 3D-konenäköön, sillä täydellisen 3D-kuvan saaminen vaatii kappaleen liikuttamista, jotta kappaleiden kaikki pinnat tulevat näkyville.

3D-konenäön keskeisimmät tekniikat nykypäivänä ovat *Time-of-Flight*, *stereonäkö* ja *laser triangulation*. Näillä kaikilla on omat etunsa toisiinsa nähden, jonka vuoksi niiden sovelluskohteet valmistavassa teollisuudessa vaihtelevat hyvin paljon. Kaikissa menetelmissä keskeistä on kohteena olevan kappaleen kameraan näkyvän pinnan etäisyyden laskeminen, jotta 3D-tietoa voidaan tuoda saataville. Yleinen toimenpide jokaiselle tekniikalle ennen varsinaista toimintaa on kameroiden kalibrointi, jolla saadaan järjestelmän tarkkuus vaaditulle tasolle. Seuraavissa kolmessa kappaleessa käsitellään näiden kolmen tekniikan toimintaperiaatteet.

2.4.1 Kulkuaikatekniikka

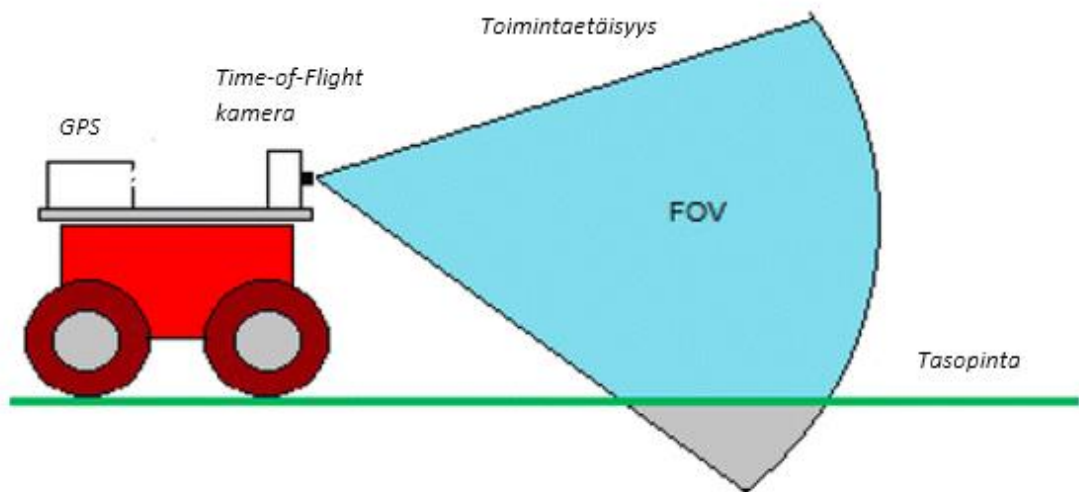
Kulkuaikatekniikka (*Time-of-Flight*) eli ToF on tekniikka, jossa 3D-kamera emittoi säteilyä ja mittaa ajan, jossa säteily palaa kameran sensoriin, joka päättelee etäisyyden edessä olevaan kappaleeseen. Tekniikan keskeiset edut muihin menetelmiin ovat sen hyvä tarkkuus ja suhteellisen yksinkertaiset konfiguraatiot (Zhang 2013 s.253).

ToF-teknologialla kappaleista on mahdollista muodostaa 3D-rekonstruktio eli tietokoneella oleva 3D-kuva kappaleen profiilista. 3D-rekonstruktion muodostamisessa yksittäinen sensori muodostaa 2D-tasossa edessä olevan kappaleen kameraan näkyvistä etäisyyksistä kuvan, minkä vuoksi yhdellä kameralla saadaan niin sanottu 2.5D-rekonstruktio kuvattavasta kappaleesta. 3D-rekonstruktio kappaleesta saadaan kääntämällä kappaletta, kääntämällä anturia tai käyttämällä useampaa anturia kuvan muodostamiseen. Tällaisia sensoreita, jotka tuottavat 2.5D-kuvaa, kuitenkin kutsutaan teollisuudessa 3D-sensoreiksi. (Steger et al. 2018 s.88)

ToF-kamerat voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden lähettämän säteilyn perusteella. Pulssimoduloidut kamerat lähettävät säteilyä pulsseina ja mittaavat sen heijastuttua takaisin kuluneen ajan (Steger et al. 2018 s.88). Jatkovaa aaltomoduloitua säteilyä lähettävät kamerat lähettävät amplitudimoduloitua säteilyä, jonka vaihe-ero takaisin heijastuneen säteilyn kanssa mitataan. ToF-kameroiden markkinoiden trendinä on viime vuosina ollut pulssimoduloitujen suosion kasvaminen joidenkin aaltomoduloitujen kameroiden poistuessa markkinoilta. (Steger et al. 2018 s.89) Selkeää syytä tähän trendiin ei ole kuitenkaan havaittu.

3D-tiedon saaminen nopeasti esimerkiksi robotin saataville on tärkeää. Sen navigointi ja ohjaaminen perustuu hyvin paljon ToF-tekniikkaan. Tekniikka ei kärsi kameran näkymän puuttuvasta tekstuurista tai huonoista valaistusolosuhteista sen linssin viereen rakennetun valaistuksen vuoksi. Se on myös huomattavasti halvempi suhteessa stereonäkötekniikkaan. Tekniikan toimintanopeus on lisäksi huomattavasti nopeampaa kuin laserskannereilla, jotka mittaavat kappaleen piste pisteeltä toisin kuin ToF-kamerat, jotka tekevät saman toiminnon yhdellä kuvauksella kappaleesta. Tekniikan nopea kuvausnopeus mahdollistaa esimerkiksi valmistavan teollisuuden robottien kyvyn väistää tielle osuvia esteitä, jotka voivat vaurioittaa robottia. (Francis et al. 2015)

Kun robotti käyttää ToF-tekniologiaa esteiden paikannukseen, jää väistämättä joitakin alueita kameran ulkopuolelle. Kuvassa 2 kameran ulkopuolelle jäävät alueet ovat kameran yläpuolella sekä aivan sen edessä. (Francis et al. 2015)



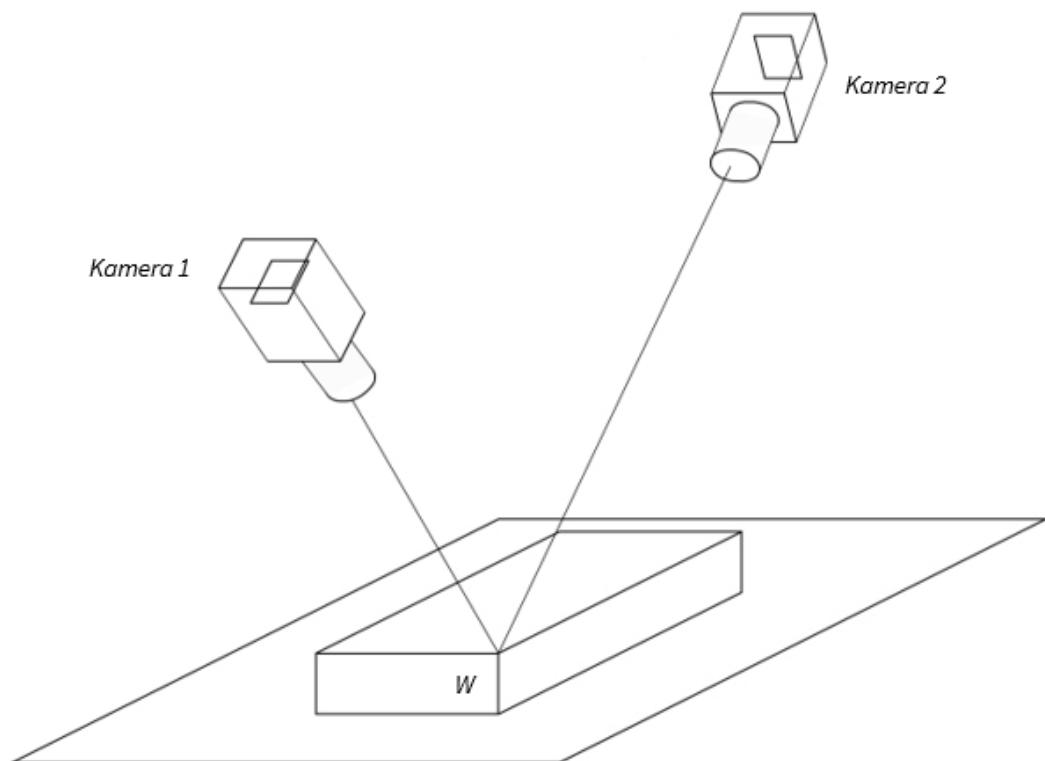
Kuva 2 Time-of-Flight kameran käyttö (mukailtu lähteestä Francis et al. 2015)

Tämä ongelma on yksi ToF-tekniologian huonoja puolia. Tämän vuoksi ToF-kameran optimaalisen orientaation laskeminen on tärkeä osa tekniikan käyttämisessä. Kameran edessä olevien kappaleiden havaitseminen tapahtuu, kun kamera tallentaa sen jokaiseen pikseliin 2D-matriisin etäisyyksistä edessä olevasta kuvasta. Yksittäisen kappaleen korkeuden ja leveyden 3D-ohjelma laskee käyttämällä sen pikselihin tallentunutta tietoa. Tietokoneella kappaleen etäisyyden ja sen pisteiden laskentaan voidaan käyttää esimerkiksi MATLAB-ohjelman trigonometry toolbox-toimintoa. (Francis et al. 2015)

2.4.2 Stereonäkö

Stereonäkö (*stereo vision*) on kehitetty alkujaan mukailemaan ihmisnäköä, joka kykenee näkemään asioita myös syvyysuunnassa. Zhang (2013) määrittelee sen 3D-konenäköksi, jolla on samanlaiset ominaisuudet kuin ihmisnäöllä. Sen käyttötarkoituksena on yleensä erilaisten kappaleiden tunnistaminen, rekonstruktio tai robotin ohjaus (Zhang 2013).

Ihmisellä tulee molempiin silmiin kaksi kuvaa, jotka aivot yhdistävät automaattisesti samaksi kuvaksi. Aivan kuten ihmisnäössä, koneen 3D-näköä vaatii toimiakseen kahden erillisen kuvan yhdistämisen syvyysnäön saavuttamiseksi, mikä tuottaa niin sanotun vastaavuusongelman stereonäkötekniikalle. (Steger et al. 2018 s.84) Stereonäkö koostuu vähintään kahdesta identtisestä kamerasta, joilla molemmilla on oma koordinaattisysteemi. Näiden koordinaattisysteemin suhteen määrittäminen muuttaa vastaavuusongelman stereo matching -ongelmaksi eli saman pisteen paikan määrittämisen molemmissa kameroissa. (Zhang 2013)



Kuva 3 Stereonäköjärjestelmä (mukailtu lähteestä Steger et al. 2018 s.83)

Kuvassa 3 esitetään stereo matching-ongelmaa. Kappaleen piste W näkyy kumpaankin kameraan pisteenä p_1 ja p_2 . Näiden pisteiden vastaavuuden määrittäminen on stereonäkötekniikan keskeisimpiä haasteita. Kameroiden ottaessa kuvat yhtäaikaaisesti eri suunnista puhutaan niin sanotusta stereorekonstruktio-prosessista, jossa rekonstruktio hoituu stereonäkötekniikalla. Piste W voidaan 3D-rekonstruoida, kun määritetään optiset kameroiden optiset säteet niitä kohti, minkä jälkeen säteet leikataan toistensa suhteen (Steger et al. 2018 s.84). Tuloksia esitetään monesti syvyyskartassa, jonka intensiteetti kuvastaa etäisyyksien välisiä eroavaisuuksia. Tulosten saaminen stereo matching -ongelmaan vaatii paljon laskentaoperaatioita, sillä 2D-syvyyskartan saamiseksi jokaisesta pisteestä vaatii kuvan resoluution neljän verran operaatioita. (Zhang 2013) Keskeinen ongelma stereonäkötekniikassa on siis syvyyskartan määrittäminen, jokaiselle pisteelle tietyssä kuvassa. Näiden laskemisessa käytetään niin sanottuja tiheysrekonstruktioalgoritmeja. Laskemiseen voidaan käyttää muitakin algoritmeja mutta niitä ei käytetä valmistavan teollisuuden sovelluksissa. (Hornberg 2017)

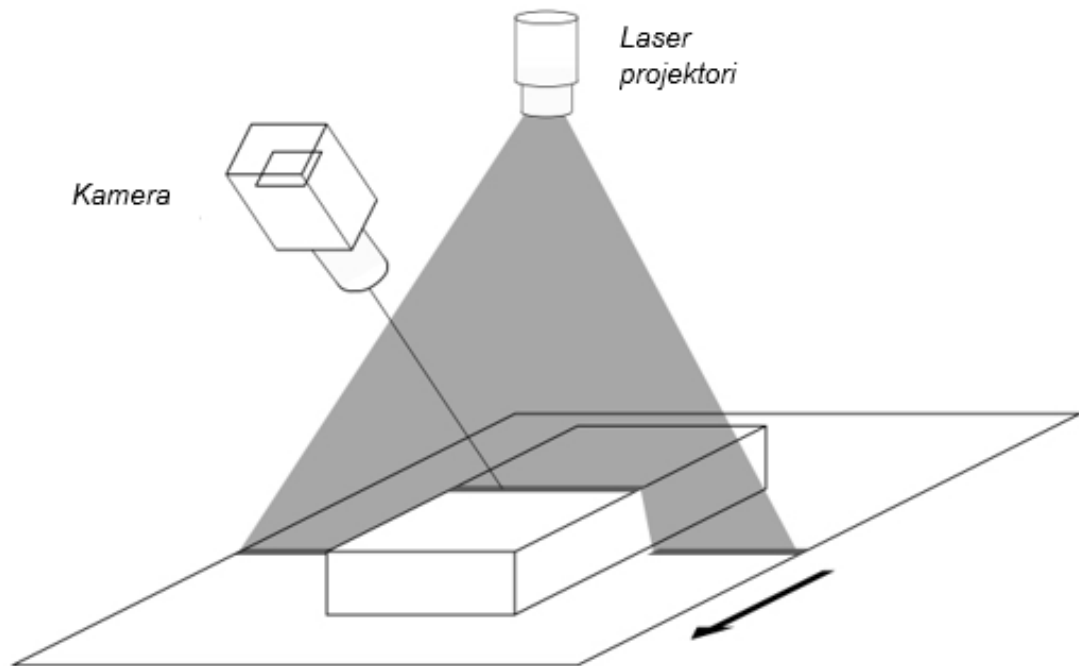
Stereonäkömenetelmän kalibrointi kameroiden koordinaattisysteemien välillä on tärkeä toiminto. Kalibroinnin avulla on mahdollista määrittää kappaleesta 3D-rekonstruktio. Se vaatii referenssikoordinaatiston määrittämisen kamerakoordinaatistoille. (Zhang 2013) 3D-rekonstruktio määrittämisessä tärkeää on vähintään kahden kameran käyttäminen, jotta kappaleen kaikki sivut tulevat näkyville. (Steger et al. 2018 s.254) Kameroiden ollessa kalibroituina, 3D-kuva saadaan erittäin nopeasti. Kalibroinnin hoidetaan yleensä laitevalmistajan toimesta.

Valmistavassa teollisuudessa stereonäkötekniikka mahdollistaa tuotteiden nopean valmistuksen ja korkean laadun. Tämä johtuu tekniikan toiminnan erinomaisesta luotettavuudesta. Tekniikan korkea laatu nykypäivänä mahdollistaa hyvinkin monimutkaisen geometrian omistavan kappaleen tarkan mittaamisen, mikä on ollut aiempina vuosikymmeninä hankalaa. (Hornberg 2017)

2.4.3 Laserkolmiomittaus

Laserkolmiomittaustekniikalla (*laser triangulation*) tarkoitetaan Struckmeierin et al. (2020) mukaan laservalolla kappaleen mittaamistekniikkaa, joka perustuu matemaattiselta teoreemaltaan kolmiomittaukseen. Tässä teoreemassa saadaan kolmas piste selville, kun tiedetään kahden pisteen sijainti ja kulma kolmiossa. Tämän tekniikan keskeinen ero stereonäkötekniikkaan on toisen kameran korvaaminen optisella anturilla, joka

projektoi laservaloa kuvattaville kappaleille. (Steger et al. 2018 s.84) Laserprojektiio saadaan, kun erityisen linssin läpi lähetetty lasersäde saapuu kappaleen pinnalle. Kappaleen ja laservalon leikkaavissa pisteissä tapahtuu laservalon heijastuminen. Kappaleen mittaaminen tapahtuu optisen anturin avulla. Yksinkertaisessa laser triangulation -järjestelmässä laserprojektorin on pystysuorassa kappaleeseen nähden ja kamera muodostaa terävän kulman projektorin kanssa. Tällaista järjestelmää esitetään kuvassa 4. (Struckmeier et al. 2020)



Kuva 4: Laserkolmiomittaus (mukailtu lähteestä Steger et al. s.84)

Kappaleen pinnan eri etäisyydet laserprojektoriin aiheuttavat parallaksi-ilmiöitä eli paikallaan oleva kappale näyttäisi liikkuvan suhteessa kameran kuvaan. Tästä aiheutuu myös pystysuoria poikkeamia kuvan laserviivaan. Nämä viivat mahdollistavat kappaleen 3D-rekonstruktion tekemisen. Leikkaamalla kameraan näkyvät kappaleen pisteet laser-tason kanssa saadaan tietokoneella muodostettua 3D-rekonstruktio kappaleesta (Steger et al. 2018 s.85). Kuvan 4 tilanteessa kuvattavaa kappaletta täytyy kuitenkin liikuttaa täydellisen kuvan saamiseksi, sillä mittauksessa voi jäädä joitain kappaleen osia valaistuksen ulkopuolella. Tämä vaatii kameran suhteellisen liikkeen tietämystä kappaleen suhteen. Toinen tapa on vaihtaa jatkuvasti laservalolevyn orientaatiota. Tämä tehdään yleensä rotaatioissa olevalla tasopeilillä, joka heijastaa laservalon kappaleeseen. Mittausjärjestelmä täytyy aina suunnitella kuvattavan kappaleen mukaan, jotta kappaleesta ei jää osia mittaustulosten ulkopuolelle. (Struckmeier et al. 2020)

Menetelmä on erittäin tehokas mittaamaan kappaleesta 3D-rekonstruktion, sillä sen avulla saadaan hyvin pieni virhemarginaali kuvauksesta. Se vie enemmän aikaa, kuin ToF mutta sillä saadaan tarkempia tuloksia. Tekniikka ei ole luonnollisesti kuitenkaan viaton. Mikäli kuvattavassa kappaleessa on varjoja tai katvealueita niin tarkkuus huonontuu. Toinen 3D-rekonstruktion valmistamista vaikeuttava tekijä on rakeinen häiriö. Ilmiö syntyy, kun lähetettävän lasersäteilyn aallot interferoivat kappaleesta heijastuvien aaltojen kanssa. Tätä on saatu vähennettyä käyttämällä LED-projektoreita, jotka lähettävät säteilyä, joka koostuu useista eri aallonpituuksista. (Steger et al. 2018 s.85) Vaikka *laser triangulation* on pitkäikäinen teknologia, niin se on yhä käytössä uusien teknologisten innovaatioiden ansiosta. Se on omalta osaltaan yhä ajankohtainen teknologia muiden rinnalla.

3. 3D-KONENÄÖN SOVELLUKSET

3D-konenäköä sovelletaan nykyään monenlaisissa kohteissa niin arkielämässä kuin myös teollisuudessa. Esimerkiksi viihde-elektroniikassa 3D-konenäköä hyödynnetään, kun kehitetään interaktiivisia videopelejä. Tässä luvussa keskitytään kuitenkin valmistavan teollisuuden sovelluksiin.

Valmistavan teollisuuden tuotteiden laatu ja vaatimukset kasvavat jatkuvasti kansainvälisellä tasolla. Valmistettavien tuotteiden kilpailun koventuessa niiltä vaaditaan yhä useammin korkealaatuisempaa estetiikkaa ja ergonomiaa. Tuotteiden valmistuksessa on näin ollen suuresti kysyntää älykkäämmistä ratkaisuksista, jotta tuotannon prosessista saadaan kilpailijoita tehokkaampi. Ilyasin (2013) mukaan tästä johtuen teollisuuden uusia valmistuksen haasteita varten on 3D-konenäkö otettu osaksi valmistusprosessia. Monet 3D-konenäön sovelluksista halutaankin pitää tämän vuoksi kilpailijoiden tietämättömissä, minkä vuoksi niistä ei ole julkista tietoa saatavilla kovin paljoa.

3D-konenäkö on suhteellisen uusi teknologia, minkä vuoksi sen kaupalliset markkinat ovat jatkuvassa kasvussa (Waszkevitz 2017 s. 699). Erityisesti saksalaisessa autoteollisuudessa finanssikriisin jälkeen tapahtui nopeaa 3D-teknologian kehitystä, joka johti entistä edistyneempiin sovelluksiin. Nykyään teknologisen kasvun keskeisessä osassa on tuotantoprosessin parantaminen, 3D-konenäkörobottien kehitys ja pick-and-place-tekniikan soveltaminen. 3D-konenäön keskeisiä kehityksen ajavia voimia valmistavassa teollisuudessa nykypäivänä on kehittyneissä maissa työvoiman korkea hinta. Työvoiman korkeat kulut vaativat valmistavaan teollisuuteen uutta robotiikkaa ja laadunvarmistusta, mitkä vaativat 3D-konenäköteknologiaa toimiakseen tehokkaasti. (Waszkevitz 2017 s.700)

3D-konenäön sovellukset valmistavassa teollisuudessa voidaan jakaa kappaleen tunnistamiseen, tutkimiseen, robotiikan ohjaukseen ja prosessin hallintaan (Golnabi & Asadpour 2007). Yksi tärkeimmistä sovellusalueista on kappaleiden tutkiminen automaattisesti 3D-konenäön avulla. Sen tuoman tiedon avulla tuotteiden laaduntarkkailusta saadaan automaattinen prosessi. Vaikka 3D-konenäön sovelluksista puhutaankin eri kappaleissa, täytyy kuitenkin panna merkille, että monesti sovelluskohteissa yhdistellään monta eri osa-aluetta samanaikaisesti.

3.1 Kappaleen ja paikan tunnistus

Kappaleentunnistuksella (*object recognition*) tarkoitetaan tekniikassa kappaleiden muodon, mittojen, värin, rakenteen ja tekstuurin määrittämistä (Waszkevitz 2017 s.701). Siinä keskeistä on useamman kappaleen erottaminen toisistaan tietyssä näkymässä. Suoritettavien tehtävien monimutkaisuus vaihtelee suuresti sovelluskohteesta riippuen hyvin yksinkertaisesta erittäin haastavaan. Tämä johtuu erityisesti syvyyskoordinaattien tuomasta uudesta ulottuvuudesta tehtäviin.

Paikantunnistus (*position recognition*) määrittellään Waszkevitzin (2017 s.701) mukaan kappaleen tai pisteen paikan ja asennon tarkaksi määrittelyksi. Määrittely tehdään ennalta määritetyssä kolmiulotteisessa koordinaattisysteemissä, mikä on välttämätöntä relevanttien tulosten saamisen kannalta. Paikantunnistus on hyvin usein osana kappaleen tunnistusta, mutta kappaleentunnistus voidaan tehdä myös ilman sen paikan tunnistamista.

Ihmisten kehonosien tunnistaminen näkyvästä videokuvasta on yksi kappaleen tunnistamisen sovelluskohteista. 3D-konenäkö voi tunnistaa esimerkiksi tuotantoprosessissa vaarallisella alueella liikkuvan ihmisen ja aiheuttaa hälytyksen. Ihmiskehon koostumus on hyvin epätasainen, sillä ihmisen ruumiinosia yhdistävät nivelet, jotka tekevät 3D-mittaamisen ja tunnistamisen haastavaksi. Teknologialla muodostetaan syvyyskartta kuvassa näkyvästä ihmisen kehosta, joka tunnistetaan systeemin tekoälyn avulla. Tämä sovelluskohde kuuluukin haasteellisuutensa vuoksi niihin ongelmiin, jotka ovat ainoastaan mahdollista ratkaista käyttämällä 3D-konenäköä. (Liu et al. 2020)

Kappaleen- ja paikantunnistuksen hyödyntäminen valmistavassa teollisuudessa on usein pick-and-place-tekniikkaan ja esteiden tunnistamista. Pick-and-place-tekniikalla tarkoitetaan työtehtävää, jossa tavoite on tarttua haluttuun kappaleeseen ja asettaa se ennalta määritettyyn sijaintiin. Erityisen tärkeäksi 3D-konenäkö tulee, kun täytyy välttää ihmisen ja robotin yhteentörmäys, joka voi aiheuttaa merkittäviä vahinkoja. (Waszkevitz 2017 s.766)

3D-konenäön suorittamat pick-and-place-tehtävät jaotellaan kappaleitten sijainnin perusteella eri kokonaisuuksiin. Tehtävien suorittamiseen käytetään usein robottia, jolla on osiin tarttumiseen kykenevä osa. Tarttumiskohteena olevien kappaleiden sijainnit voivat olla tarkasti määriteltyjä, jolloin robotti ei tarvitse tarkempaa ulkoista ohjausta toimiakseen. Kun käsittelyssä on epätarkasti määritellyt kappaleitten positiot, puhutaan niin sanotusta bin-picking-tekniikasta, jossa ennestään määrittelemättömästä sijainnista tunnistetaan kappale ja tartutaan siihen. (Waszkevitz 2017 s.767) Systeemin asetukset

vaihtelevat usein kuinka tartuttavat kappaleet ovat sijoittuneet kappaleeseen tarttuvaan robottiin nähden.

Kappaleitten profiilin tutkiminen on pitkään ollut konenäön keskeisimpiä tehtäviä teollisuudessa. Profiilin tutkimisella on yleensä haluttu tietoa mahdollisista halkeamista, säröistä ja karheudesta. Tämän perusteella kappaleen profiilin tutkiminen voidaan jakaa kvantitatiiviseen ja kvalitatiiviseen tutkimiseen (Waszkevitz 2017 s.702). Kvantitatiivisella tutkimuksella voidaan tutkia valmistavan teollisuuden tuotteiden pinnankarheuden suuruutta. Kvalitatiivisella tutkimuksella saadaan tietoa naarmuista, säröistä ja muista muutoksista haluttuun tekstuuriin.

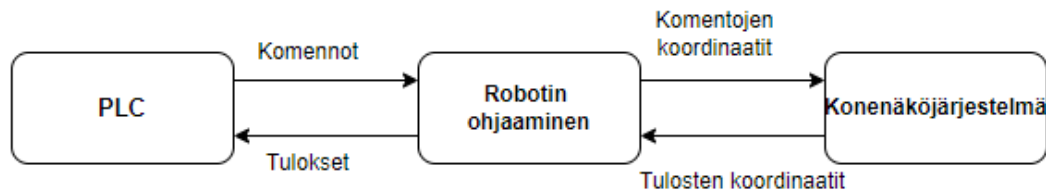
3D-konenäöllä pinnan profiilin tutkimisen ulottuvuudet ovat kasvaneet ja toiminta tehostunut merkittäväällä tavalla uuden mitan myötä. Lasertekniikkojen, kuten laser triangulation -tekniikan avulla kappaleen pinnan profiilista saadaan nykyään tietoa jopa 0.01 mm:n resoluutiolla. Tämä on mahdollistanut tuotteiden laadun ja luotettavuuden paraneamisen. Tällaista 3D-konenäköä käytetään erityisesti ilmailualan osien valmistuksessa, mikä vaatii tarkkaa informaatiota osien ominaisuuksista. Pistepilven avulla pintaa tutkitaan myöskin autojen renkaiden sekä kumieristeiden. (Connolly 2009) Autojen renkaista esimerkiksi tarkistetaan sallittu syvyys kvantitatiivisen tutkimuksen avulla. Kumieristeistä 3D-konenäöllä etsitään mahdollisia epäpuhtauksia kvalitatiivisella tutkinnalla.

Vaateteollisuudessa kenkien pinnan tutkiminen on tärkeä osa prosessia, jotta kengille voidaan määrittellä tarkat valmistustavat. Etenkin naisten kenkien pintaprofiili on usein hyvinkin monimutkainen niiden korkeatasoisen suunnittelutyön vuoksi. Ilman 3D-konenäköantureita pintaprofiilista on ollut ennen erittäin hankala luoda tarkkaa kuvaa. 3D-konenäkötekniikkojen kehittymisen ansiosta on kengille mahdollisuus määrittellä lähes virheetön 3D-kuva, mikä mahdollistaa niiden valmistuksen kehittämisen. Pinnan tutkimiseen käytettävä järjestelmä koostuu kamerasta, laservalosta ja rotaatioon kykenevästä tasosta. (Zhongxu et al. 2007)

3.2 Robottiikka

Robottiikalla tarkoitetaan tekniikan alaa, joka yhdistelee konetekniikkaa, tietotekniikkaa, mekatroniikkaa ja automaatiotekniikkaa. Robotti on näitä tekniikkoja yhdistelemällä tehty laite, jonka tarkoituksena on hoitaa aiemmin ihmisten tekemiä työtehtäviä. Valmistavassa teollisuudessa robottien tehtäväalueisiin kuuluu yleensä tuotteiden siirtäminen paikasta toiseen, tuotteiden kokoonpano ja laadunvalvonta. Robottien työtehtävät painottuvat tavallisesti ihmisille vaarallisiin, pitkäväteisiin tai muuten vaan epäinhimillisiin

oloihin. Niiden tehtäväalueet ovat juuri tällaisia, jotta tuotannon automaatio saadaan tehokkaammaksi. Esimerkiksi tuotannon kokoonpanotehtävät ovat usein yksitoikkoista työtä, joka ei ole ihmiselle mielekkäintä ja helpointa työtä tehdä monta tuntia putkeen. Kuvassa 5 havainnollistetaan konenäöllä varustetun robotin toimintaperiaatetta yksinkertaisimmillaan.



Kuva 5 Robotin toimiminen konenäöllä mukailtu lähteestä (Waszkevitz 2017 s.784)

Valmistavan teollisuuden robotit vaativat usein myös ihmisen ohjausta tai avustusta tehtävässään, mikä aiheuttaa mahdollisuuden ihmisen ja robotin törmäykselle. Tämä on yksi robottien käytön riskitekijöistä, joka täytyy huomioida robottien suunnittelussa ja sijoittelussa. 3D-konenäön ansiosta nykyiset robotit käyttävät syvyysnäköä näiden törmäyksien ja vaaratilanteiden estämiseksi.

Valmistavan teollisuuden tuotannon materiaalien käsittelyssä hyödynnetään useasti robotin kykyä 3D-konenäköön. Pick-and-place-tekniikan kehitys erityisesti on johtanut kokoonpanorobottien suorituskyvyn nykyiselle tasolle (Steger et al. 2018 s.451). Robotit toimivat hyvin usein myös materiaalien siirtämisessä paikasta toiseen, mikä on ihmiselle hyvin yksitoikkoista työtä. Myös kokoonpanon automaattinen käsittely 3D-konenäkörobotilla on tehostanut tuotannon prosessia ja helpottanut ihmisten tekemää osuutta tuotantoprosessissa.

Robotin kalibrointi on välttämätön osa prosessia, jotta virheellisten koordinaattien esiintymistä saadaan vähennettyä. Zhang et al. (2017) esittelevät stereonäön avulla tehtävän robotin automaattisen kalibrointimenetelmän. Sen avulla robotti voi toimia ilman manuaalista kalibrointia, mikä vähentää ihmistyövoiman tarpeellisuutta.

3D-konenäköä hyödyntävän robotin mahdolliseksi liikkumaympäristöksi määritellään yleensä tietynlainen kartta tai CAD-malli. Sen on mahdollista määrittää oma sijaintinsa ja asentonsa sekä huomata esteet käyttäen jotakin 3D-konenäkötekniikkaa. Mikäli robotin liikkumaympäristönä on ennestään tuntematon ympäristö, täytyy robotin luoda samanaikaisesti malli sen ympäristöstä sekä sen omasta sijainnista ja asennosta. (Waszkevitz 2017 s.768) Täysin autonomisesti liikkuvat robotit käyttävät juuri edellä mainittua

menetelmää toimintaansa. Edellä oleva esimerkki on käytössä monessa teollisuuden tehtaassa, jonka ympäristö on ennestään tuntematon robotille.

Jokaiselle teollisuusrobotille täytyy määrittää oma ohjausjärjestelmä, jota se noudattaa työtehtäviä tehdessään. 3D-konenäön ansiosta nykyiset robotit kykenevät käsittelemään kappaleita sattumanvaraisessa järjestyksessä ennalta määritetyn järjestyksen sijaan. Tämä on tuonut huomattavasti säästöjä, kun aiemmat kömpelöt ja hitaat järjestelmät ovat väistyneet. ABB:n kehittämä uudentyyppinen robottien ohjausjärjestelmä on esimerkki tällaisesta järjestelmästä, joka mahdollistaa sattumanvaraisen kappaleiden käsittelyn. Robotti muodostaa toiminta-alueestaan ja halutusta kappaleesta kuvan automaattisesti ja laskee turvallisen etäisyyden ihmisille, jotka ovat sen kanssa tekemisissä. Se onkin käytössä useiden japanilaisten ja yhdysvaltalaisen autonvalmistajien autojen moottorien automaattisessa kokoonpanossa. (Connolly 2009) Moottorin kokoonpanossa robotti tunnistaa 3D-näöllään moottorin osien orientaation automaattisesti ja liittää moottorin osat yhteen virheettömästi.

Robotteja voidaan käyttää myös kappaleiden hitsauksessa. Robotti erottaa stereonäön avulla hitsausauaman 3D-kuvasta. Vaihtelevista olosuhteista johtuen, hitsausrobotin tarkkuus saadaan yleensä noin yhden millimetrin kohdalle. Suurimmassa osassa valmistavan teollisuuden tehtäviä tämä ei tuota merkittävää virhettä hitsaukseen. Ihmistyövoimalla tehtävä hitsaus on pienen kokoluokan tehtaissa vielä käytössä, mutta massatuotannossa robotin avulla tehtävä hitsaus tuottaa enemmän säästöjä ihmiseen verrattessa. Tämä johtuu robotin konfigurointiin jokaisen tehtävän alussa kuluneesta ajasta. (Dinham & Fang 2013)

Osien kokoonpanossa robotiikkaa käytetään esimerkiksi muovisten kansien asettamiseen metallikoteloiden päälle. Tehtävässä käytettävien kokoonpanorobottien toiminnassa 3D-konenäkö tulee esille, kun muovisten kansien positio ja koordinaatit määritetään. Prosessissa 3D-konenäkö ottaa ensimmäisenä kolmiulotteisen kuvan kappaleesta, jonka jälkeen 3D-konenäkösystemi välittää tiedon kappaleen koordinaateista robotin omaan koordinaatistoon, jotta robotti voi tarttua kappaleeseen. Koordinaattien määrittäminen täytyy tehdä eri kokoisille kansille, mikäli suoritettavassa tehtävässä käsitellään useita erikokoisia kansia. (Waszkevitz 2017 s.782) Tämä on hyvin tyypillinen sovelluskohde, joka ei ratkea kaksikulotteisena konenäköongelmana. Kokoonpanojen asettaminen on myös hyvin yksitoikkoista työtä, mikä on ihmistyövoimalla paljon epätarkempaa tehdä valmistavassa teollisuudessa.

Ilmailualalla robotiikan käyttö tuotannossa on suuressa osassa, sillä lentokoneen osien laadunvalvonnan tarkkuudelta on vaadittava täydellisyyttä. Lentokoneen osien tuotannossa käytetään tekoälyä hyödyntäviä robotteja, jotka kalibroivat ja opettavat itseään tehtävän tarkkuuden varmistamiseksi ja parantamiseksi. 3D-konenäköröbottien näön avulla lentokoneiden metallilevyjen vikojen tutkiminen suoriutuu automaattisesti. (Golnabi & Asadpour 2007) Tuotanto on erittäin automaattista, jotta valmistuksen virheellisyys saadaan mahdollisimman vähäiseksi. Tämän vuoksi automatisoidut ja tekoälyllä oppivat robotit ovat välttämättömyys laadukkaiden osien kannalta.

3.3 Laadunvalvonta

Laadunvalvonta on tärkeä osa valmistavan teollisuuden tuotannon prosessia. Sillä varmistetaan, että tuotteiden vaatimukset täyttyvät eikä markkinoille pääse virheellisiä tuotteita. Pahimmillaan laadunvalvonnassa syntyneet virheet voivat johtaa ihmishenkien menetykseen, mikäli valmistettavan tuotteen vikaantuminen vaarantaa sitä käyttävän ihmisen turvallisuuden. Virheellisten tuotteiden pääsy markkinoille tuottaa myös ylimääräisiä kustannuksia valmistuksessa, joten tehokkaammalla laadunvalvonnalla voidaan merkittävästi vaikuttaa valmistavan teollisuuden yrityksen kilpailukykyyn.

Valmistavassa teollisuudessa 3D-konenäkö on muuttanut merkittävästi laadunvalvonnan tehokkuutta. Ihmistyövoiman suorittama laadunvalvonta tuottaa aina virheitä. Ihmisten suorittamana laadunvalvonnan tarkkuus on yleensä noin 90 %, joka tulee kalliiksi pidemmällä seurantajaksolla. 3D-konenäön kehityksen johdosta tuotteiden laadun luotettavuus on nykyään saatu lähes 100 %:n tasolle, mikä on käytännössä mahdotonta saavuttaa ihmisenäön avulla.

Teräksen valmistuksessa 3D-konenäöstä on myös suurta apua, kun valmiin tuotteen pintaa tutkitaan. Teräksen valmistus koostuu monimutkaisesta prosessista ja kilpailu alalla on kovaa. Tämän vuoksi 3D-konenäkö on otettu avuksi teräslevyjen pinnan laadun varmistuksessa, missä tarkkailu tehdään stereonäön avulla (Zhao et al. 2014). Automaatioitu laaduntarkkailu 3D-konenäöllä tuo säästöjä ja antaa kilpailuedun muihin teräsvalmistajiin nähden, jotka luottavat vanhanaikaisempiin menetelmiin. Tavallisen teräksen lisäksi ruostumattoman teräksen valmistuksessa pinnan virheettömyys tarkastetaan 3D-lasermittauksella. Pinta tarkastetaan mahdollisten säröjen ja vikojen varalta, jotka voivat vaikuttaa teräslevyjen ominaisuuksiin käytössä. Tällä menetelmällä saavutetaan hyvä tarkkuus korkean valointensiteetin ansiosta. Sen haittapuolena on kuitenkin korkea hinta ja suuri tiedon prosessointimäärä. (Fang et al. 2020)

Kokoonpanojen tarkistus on myös merkittävä 3D-konenäön sovelluskohde. Erityisen relevantiksi se tulee, kun kokoonpanon oikeellisuudella on vaikutusta ihmishenkiin. Auto-teollisuudessa autojen osien oikea asennus ja sijainti kokoonpanossa tarkastetaan 3D-konenäön avulla. Virheellisen kokoonpanon seurauksena voi olla esimerkiksi auton jarrujen toimimattomuus, joka voi maksaa ihmishenkiä. Sen avulla virheelliset johtojen asennukset saadaan aina havaittua, mikä on tuonut merkittävän vaikutuksen autojen valmistuksen luotettavuuteen. Autojen renkaiden asennuksessa tarkastetaan 3D-tekniikalla myös oikea asennustapa. Erityisesti auton eturenkaiden asennuksessa oikea sijainti on äärimmäisen tärkeää. Renkaiden tapauksessa asennuksen virheet voivat johtaa huonoon ohjattavuuteen, joka vaikuttaa auton turvallisuuteen merkittävästi. (Furferi et al. 2013)

Kokoonpanojen tarkistus on ollut aiemminkin konenäön sovelluskohteena valmistavassa teollisuudessa. Aiemmin siinä on saattanut olla ongelmana huono kontrasti suurta tarkkuutta vaativassa tehtävässä, kuten liimaliitoksen tarkastaminen virheiden varalta. 3D-konenäöllä tämä ongelma on poistunut, kun kappaleita on ollut mahdollista tarkastella myös syvyysuunnassa (Waszkevitz 2017 s.766). Kokoonpanon tarkistamisessa esimerkiksi johtojen oikean asennuksen varmistaminen lasertekniikoilla tai stereonäkötekniikalla on tehostanut laadunvalvontaa ja parantanut turvallisuutta virheellisten asennusten vähentyessä. Erityisesti stereonäkötekniikka on tuonut merkittävän vaikutuksen kokoonpanojen varmuuteen. (Waszkevitz 2017 s.766)

Yksi kokoonpanojen tarkistuksen sovellus löytyy matkapuhelimien valmistuksesta. Kokoonpano vaatii suurta tarkkuutta ja yksityiskohtaisuutta, mikä olisi ihmisnäöllä erittäin vaativa tehtävä. Norjalaisessa tehtaassa lähellä Osloa onkin käytössä laaduntarkkailuun erikoistunut 3D-konenäköohjelma. Tämä *Scorpion Vision*-niminen ohjelma tarkastaa, että matkapuhelimen kaiuttimet, diodit ja ikkunalasit asennetaan oikealla tavalla ja oikealle paikalle. Ohjelman suurimmat tehokkuutta lisäävät ominaisuudet ovat ympäri vuorokauden oleva toiminta-aste ja asennusvirheistä tehtävät raportit. (Connolly 2009) Sen toiminta perustuu useamman kameran 3D-näköön, jolla saadaan erittäin tarkka resoluutio. Jatkuvalle statistiikan keräämisellä saadaan myöskin tietoa, jonka avulla tuotannon prosessia voidaan kehittää tarkemmaksi.

Laadunvalvonta on myös tärkeä osa aurinkopaneelien valmistuksessa, sillä virheet voivat estää aurinkopaneelien koko toiminnan. Aurinkokennoista koostuva paneeli on todella herkkä epäpuhtauksille ja naarmuille sen pinnassa, mikä vaatii suurta tarkkuutta valmistuksessa. Paneelin pinnanlaadun varmistaminen ennen pakkaamista voidaan

tehdä myös edellä mainitulla *Scorpion Vision*-ohjelmalla. Kyseisessä sovelluksessa resoluutio saadaan mittaamisessa jopa mikrometrin tasolla, mitä ei ole käytännössä mahdollista ihmishäöllä saada aikaan. (Connolly 2009)

4. POHDINNAT JA YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tuoda esille 3D-konenäön merkitystä ja sovelluksia valmistavassa teollisuudessa sekä selventää sen toimintaperiaatteita. Tavoitteen saavuttamiseksi työn teoriaosuudessa esiteltiin 3D-konenäön keskeisimmät tekniikat. Tämän avulla tutkielman kolmannessa luvussa pystyttiin käsittelemään ja ymmärtämään niiden sovelluksia valmistavassa teollisuudessa. Samassa luvussa vastattiin esitettyihin tutkimuskysymyksiin selkeällä tavalla.

3D-konenäön avulla saadaan havaitsemisesta ja robotiikan ohjauksesta tehokkaampaa. Sen avulla ihmisen työtehtävät tuotannossa vähenevät merkittävästi, sillä sen toimintavarmuus on parempi kuin ihmistyövoiman. Ihmisen ei tarvitse työskennellä enää epämiellyttävissä olosuhteissa, joissa 3D-konenäkösovellukset voivat toimia. Toisin sanottuna se on uudenlainen työkalu tehostamaan tuotantoa korvaamalla ihmisen luotettavammalla toimijalla.

Tutkielman luvussa 3 tuotiin esille valmistavan teollisuuden 3D-konenäkösovelluksia, millä päästiin vastaamaan alkuperäiseen tutkimuskysymykseen. Esimerkeissä esiteltiin tuotannossa esiintyviä valmistusta ja kokoonpanoa hoitavia sovelluksia sekä laatua tarkkailevia 3D-järjestelmiä.

Valmistavassa teollisuudessa 3D-konenäön sovelluksia on autoteollisuuden kokoonpanossa, piirilevyjen laadun varmistuksessa, materiaalin siirtämisessä paikasta toiseen sekä kappaleiden pintojen tutkimisessa. Kaikissa tehtävissä tulokset prosessoidaan tietokoneella kullekin tehtävälle sopivaan muotoon. Tehtävissä käytettävät tekniikat vaihtelevat yleensä halutun tarkkuuden, hinnan ja prosessointinopeuden mukaan.

Valmistavan teollisuuden yritykset haluavat useasti pitää suurimmat kilpailuetua tuovat 3D-konenäkömenetelmänsä suurelta yleisöltä piilossa. Tuotannossa esimerkkejä löytyy todennäköisesti huomattavasti enemmän, sillä kaikista sovelluksista ei julkaista tieteellistä materiaalia. Tämä on selvä haaste sovellusten tutkimisessa ja selventämisessä. Aiheen teoriaosuudesta löytyy huomattavasti enemmän informaatiota kuin sovelluksista, joiden tiedon saatavuus oli tutkielmaa tehdessä hyvin vähäistä. Kirjallisuusselvitys ei näin ollen ollut välttämättä paras vaihtoehto tutkia 3D-konenäön käyttöä ja sovelluksia. Teollisuuden sovellusten yksityiskohtien selventäminen olisi voinut olla parempaa, mikäli omakohtaista kokemusta tuotannon prosesseista olisi ollut. Epävarmuustekijöitä tutkielman teossa olivat myös artikkelien ja julkaisujen julkaisuajankohta. Jotkin esitellyt

sovellukset ovat mahdollisesti jo poistuneet käytöstä teknologian kehityksen ollessa hyvin nopeaa.

Teollisuuden yritykset voivat siis näin ollen 3D-teknologiaa käyttämällä saavuttaa luotettavampaa laatua, säästää kustannuksia ja lisätä tuotannon automaatiota. Tämä tarkoittaa myös ihmistyövoiman tarpeen vähenemistä laadunvalvonnan ja kokoonpanon tehtävissä. Teknologian haittapuoliin kuuluu sen korkea käyttöönoton hinta, johon ei välttämättä kaikilla yrityksillä ole kannattavaa investoida. Tämän vuoksi 3D-teknologia voi tuoda merkittävää kilpailuetua, mikäli sen käyttöönottoon on varaa ja tuodut edut nostavat tuottavuutta.

LÄHTEET

- Anand, S. & Priya, L. (2020). *A Guide for Machine Vision in Quality Control*. Chapman and Hall/CRC.
- Batchelor, B. G. (2012). *Machine Vision Handbook*. 1st ed. [Online]. London: Springer London.
- Connolly, C. (2009). *Machine vision advances and applications*. *Assembly automation*. [Online] 29 (2), s. 106–111.
- Dinham, M. & Fang, G. (2013). *Autonomous weld seam identification and localization using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding*. *Robotics and computer-integrated manufacturing*. [Online] 29 (5), s. 288–301.
- Fang, X., Luo, Q., Zhou, B., Li, C. & Lu, T. (2020). *Research Progress of Automated Visual Surface Defect Detection for Industrial Metal Planar Materials*. *Sensors*. 20, (18), pp. 5136.
- Francis, X., Anavatti, S. G., Garratt, M., Shim, H. (2015). 'A ToF-Camera as a 3D Vision Sensor for Autonomous Mobile Robotics', *International Journal of Advanced Robotic Systems*. doi: [10.5772/61348](https://doi.org/10.5772/61348).
- Furferi, R., Governi, L., Volpe, Y., Carfagni, M. (2013). Design and Assessment of a Machine Vision System for Automatic Vehicle Wheel Alignment. *International journal of advanced robotic systems*. [Online] 10 (5), s. 242–253.
- Geng, H. (2016). *Manufacturing engineering handbook*. Second edition. New York [New York: McGraw-Hill. Viitattu 9.3.2022. Saatavissa <https://www.accessengineer-inqlibrary.com/content/book/9780071839778/chapter/chapter32>
- Golnabi, H. & Asadpour, A. (2007). *Design and application of industrial machine vision systems*. *Robotics and computer-integrated manufacturing*. Viitattu 3.3.2022. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584507000233>
- Hornberg, A. (2017). *Handbook of Machine and Computer Vision: The Guide for Developers and Users*. Somerset: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Ilyas, I. P. (2013). *3D Machine Vision and Additive Manufacturing: Concurrent Product and Process Development*. IOP conference series. Materials Science and Engineering. Viitattu 3.3.2022. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584507000233>
- Liu, Ding, H., Shahroudy, A., Duan, L.-Y., Jiang, X., Wang, G., Kot, A. C. (2020). *Feature Boosting Network For 3D Pose Estimation*. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. [Online] 42 (2), s. 494–501. Viitattu 1.4.2022 Saatavissa <https://ieeexplore.ieee.org/document/8621059>

Răileanu, S., Borangiu, T., Anton, F. (2021). *An Open-Source Machine Vision Framework for Smart Manufacturing Control*. In: Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Cardin, O., Lamouri, S. (eds) *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*. SOHOMA 2020. Studies in Computational Intelligence, vol 952. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69373-2_3

Steger, C., Ulrich, M., Wiedemann, C., (2018). *Machine vision algorithms and applications*. 2 edn. Weinheim: Wiley-VCH.

Struckmeier, F., Zhao, J., León, F. P. (2020). *Measuring the supporting slats of laser cutting machines using laser triangulation*. International journal of advanced manufacturing technology. [Online] 108 (11-12), pp. 3819–3833.

Waszkewitz, P. (2017). *Machine Vision in Manufacturing* in Hornberg, A Handbook of Machine and Computer Vision: The Guide for Developers and Users, John Wiley & Sons, Incorporate

Zhang, S. (2013). *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*. Vol. 16. [Online]. Baton Rouge: CRC Press.

Zhang, X., Song, Y., Yang, Y., Pan, H. (2017). *Stereo vision based autonomous robot calibration*. *Robotics and autonomous systems*. [Online], s. 43–51.

Zhao, Q.J., Cao, P., Tu, D.W. (2014). *Toward intelligent manufacturing : label characters marking and recognition method for steel products with machine vision*. *Advances in manufacturing*. [Online] 2 (1), s. 3–12.

Zhongxu H., Marshall C., Bicker R., Taylor P. (2007). *Automatic surface roughing with 3D machine vision and cooperative robot control*, *Robotics and Autonomous Systems*, 55 (7), s. 552-560.