



Poranterien loppukiillotusprosessin automatisointi robotiikkaa hyödyntäen

Opinnäytetyö

Lari Leppänen

Opinnäytetyö

Huhtikuu 2022

Tekniikan ala

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Leppänen Lari

Poranterien loppukiillotusprosessin automatisointi robotiikkaa hyödyntäen

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Huhtikuu 2022, 68 sivua

Tekniikan ala. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi JR-Tools Oy. Yritys tarjoaa lastuavia erikoistyökaluja metalliteollisuudelle. Yrityksen palveluihin kuuluu terähuoltopalvelu, jossa työkalu teroitetaan ja pinnoitetaan PVD-menetelmällä. Yrityksen tavoitteena on kehittää terähuoltopalvelun piiriin kuuluvien poranterien loppukiillotusprosessia robotiikan avulla.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda automatisoitu poranterien loppukiillotusprosessi PVD-pinnoitteen pinnan tasoittamiseksi, sekä tutkia kiillotustuloksiin vaikuttavia tekijöitä.

Tutkimuksen alkuvaiheessa perehdyttiin teollisuusrobotiikan, pinnoitteiden ja hionnan ominaisuuksiin. Tietoperusta luotiin näihin liittyvän kirjallisuuden, standardien sekä aikaisempien tutkimusten perusteella. Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena, eli se yhdistelee tietoperustan analysointia konkreettisen prototyypin kanssa.

Tehtäväksi muodostui rakentaa robottisolun prototyyppi. Työ piti sisällään kiillotusjärjestelmän, poranterien telineiden sekä robotti-ohjelman suunnittelun. Tähän sisältyi robotin suorittaman työtehtävän onnistumisen analysointi sekä kiillotustyön mahdollistaminen rakennetulla välineistöllä.

Tuloksena voidaan todeta yhteistoimintarobottin soveltuvan työtehtävään. Tutkimuksen tuloksena saatiin lisäksi kuvallista aineistoa kiillotusjäljen muutoksiin vaikuttavista tekijöistä. Kuva-aineistosta käy ilmi erilaisten medioiden eli kiillotusrakeiden, kiillotettavan materiaalin, kiillotusajan sekä kiillotusastian-nopeuden vaikutus kiillotusjälkeen.

Avainsanat (asiasanat)

Robotiikka, yhteistoimintarobotti, Pinnoitus, Kiillotus

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Leppänen Lari

Automation of the final polishing process of drill bits using robotics

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, April 2022, 68 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The bachelor's thesis was assigned by JR-Tools Oy. JR-Tools offers special metal cutting tools for metal industry. Company offers tool resharpening service with PVD-coating in same premises. Part of the tool resharpening is the final polishing process. The company's goal is to improve final polishing process of drill bits by using robotics.

The aim for the thesis was to create an automated final polishing process for drill bits to smooth the surface of a PVD coating, and to find out which factors influence the polishing results. At the beginning of the research, the basic knowledge of industrial robotics, coatings and grinding were acquired by studying the topics. Based on the relevant literature, standards, and previous research, a theoretical basis for the work was created. The work was carried out as a development study, it combines the analysis of the knowledge base with a concrete prototype.

The task was to build a prototype robot cell. The work included the design of a polishing system, drill bit racks and a robot program. Analyzing the success of the work performed by robot was included. The built equipment enabled the polishing work task to be performed.

The result was that the collaboration robot is suitable for the job. In addition, the study provided the image data on the factors influencing changes in the polishing mark. The image material shows the effect of different media, the material to be polished, the polishing time and the effect of polishing vessel speed on the polishing result.

Keywords/tags (subjects)

Robotics, Collaboration robot, Surfacing, Polishing

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Opinnäytetyön tausta	4
1.2	Toimeksiantaja	4
1.3	Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaus	5
2	Tutkimusasetelma	6
2.1	Tutkimusote	6
2.2	Tietoperusta	6
2.3	Eettisyys.....	7
3	Teollisuusrobotiikka.....	8
3.1	Robottien yleistyneisyys.....	8
3.2	Turvavaatimukset.....	10
3.3	Nivelet ja vapausasteet	11
3.4	Koordinaatistot.....	12
3.4.1	Työkalukeskipiste (TCP)	14
3.4.2	Työskentelyalue	14
3.4.3	Toistettavuus ja luotettavuus	15
3.4.4	Kinematiikka	16
3.5	Teollisuusrobotit	17
3.5.1	Suorakulmainen robotti.....	17
3.5.2	Sylinterirobotti.....	19
3.5.3	Napakoordinaatistorobotti.....	19
3.5.4	Kiertyvänivelinen robotti	20
3.5.5	SCARA-robotti	21
3.5.6	Rinnakkaisrakenteinen robotti	22
3.5.7	Yhteistyörobotti.....	23
3.6	Teollisuusrobotin ja yhteistoimintarobotin ero	25
3.7	Ohjausjärjestelmä	26
3.8	Työkalut ja tarttujat.....	26
3.9	Anturit	27
3.10	Ohjelmointi.....	29
4	Metallien pinnoitus	32
4.1	Kaasufaasipinnoitus	32
4.1.1	Fysikaalinen kaasufaasipinnoitus.....	32

5	Hionta	33
6	Poranterien loppukiillotusprosessin robotisointi	34
6.1	Robotin valinta	35
6.2	Työkalusuunnittelu.....	36
6.3	Kokonaisuuden rakentaminen	37
6.3.1	Kiillotusastia	37
6.3.2	Poranterätelineet.....	39
6.3.3	Robotin asema ja ohjelmointi.....	41
6.4	Kuvausympäristön rakentaminen	43
7	Tulokset.....	45
7.1	Johtopäätökset.....	50
8	Pohdinta.....	52
8.1	Tavoitteiden saavuttaminen	53
8.2	Jatkokehitys.....	55
	Lähteet	57
	Liitteet	61
	Liite 1. Robotin ohjelmointikoodi.....	61
	Liite 2. Kiillotusaika- ja nopeustaulukko.....	62
	Liite 3. Kiillotustulokset	63
 Kuviot		
	Kuvio 1. Käytössä olevat teollisuusrobotit vuosittain.....	9
	Kuvio 2. Teollisuusrobottien asennukset vuosittain.....	10
	Kuvio 3. Yhteistyörobottien suhde teollisuusrobotteihin.....	10
	Kuvio 4. Robotin 6 vapausastetta	12
	Kuvio 5. Työkalukeskipiste, TCP	14
	Kuvio 6. Nivelvarsirobotin työskentelyalue sivusta	15
	Kuvio 7. Robotin ajopisteen toistettavuuden ja tarkkuuden ero	16
	Kuvio 8. Avoin ja suljettu kinemaattinen ketju.....	17
	Kuvio 9. Karteesian robotti	18
	Kuvio 10. GANTRY-robotti.....	18
	Kuvio 11. Sylinterirobotti	19
	Kuvio 12. Napakoordinaatistorobotti	20
	Kuvio 13. Kiertyvänivelinen robotti	21

Kuvio 14. SCARA-robotti	22
Kuvio 15. Rinnakkaisrakenteinen robotti.....	23
Kuvio 16. Yhteistoimintarobotti UR 5, Universal robots.....	24
Kuvio 17. Tarttuja, Robotiq	26
Kuvio 18. Etäisyysanturi metallikohteille	28
Kuvio 19. Esimerkki teachpendantista, ABB Flexpendant IRC5	30
Kuvio 20. ABB 3D-ohjelmointiympäristö, Robotstudio.....	31
Kuvio 21. Puoliksi pinnoitettu testitanko 1.....	35
Kuvio 22. Robotiq 2F-85 tarttuja.....	37
Kuvio 23. Kiillotusastiakokonaisuus	38
Kuvio 24. Tehdasvalmisteinen poranteräteline.....	39
Kuvio 25. Teline kiinteäreunaisilla rei'illä.....	40
Kuvio 26. Kalteva poranteräteline	41
Kuvio 27. Robottisolukokonaisuus.....	42
Kuvio 28. Kuvausympäristö, Baslerin kamera sekä Moritexin objektiivi	45

Taulukot

Taulukko 1. Poranterätelineiden onnistumisten keskiarvot.....	46
Taulukko 2. Kiillotustulokset hienolla medialla ja tankotyypillä yksi.....	49
Taulukko 3. Yhteenveto eri tangoista samalla ajalla sekä nopeudella	50

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön tausta

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin robotiikan soveltuvuutta osaksi lastuavien koneterien huoltotoimenpiteitä. Teollisuudessa työvälineiden huoltamiselle on selkeä tarve sen ollessa yleensä kustannustehokkaampaa yrityksille (Uusitalo 2021). Koronapandemian vaikutuksista opinnäytetyön kirjoittamishetkellä oli viitteitä globaalisti. On todennäköistä että koronapandemia vaikutti raaka-aineiden hintoihin ja saatavuuteen. Vaikutukset näkyvät teollisuuden tuotantomäärissä hidastuneena kasvuna (Hakola 2021).

Opinnäytetyön toimeksiantajan julkaisemassa tiedotteessa todetaan: ”Pahimpana korona-aikana huoltopalvelun merkitys korostui, sillä monet asiakkaat halusivat mieluummin huoltaa olemassa olevia työkalujaan kuin ostaa uusia.” (Uusitalo 2021.) Raaka-aineiden saatavuuden haasteet sekä niistä johtuvat hinnankorotukset ovat omiaan lisäämään jo käytössä olevien lastuavien koneterien huoltamista. Lastuavien koneterien huoltamisessa laadun täytyy olla korkealla tasolla, sillä muutoin terä ei kestä tai tylsyy huomattavasti liian nopeasti.

1.2 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii JR-Tools Oy Tikkakoskella. Se on perustettu vuonna 1973 Muuramessa. Yritys valmistaa lastuavia erikoistyökaluja metalliteollisuudelle ja työllistää 16 henkilöä. Yrityksen verkkosivujen mukaan se on tällä hetkellä suurin ja monipuolisin alan yritys Suomessa. (JR-Tools n.d.)

Yrityksen monipuolinen konekanta mahdollistaa sekä HSS- että kovametallisten erikoistyökalujen valmistuksen, huollon sekä PVD-pinnoituksen. Lisäksi JR-tools Oy maahantuo erilaisia hammastyökaluja ja tarvikkeita. (JR-Tools n.d.) Yrityksen julkaisemassa tiedotteessa mainitaan huoltopalvelun jatkuvan kehittämisen olevan yksi JR-Toolsin toiminnan kulmakivistä. Kysyntä palveluille on yrityksen mukaan ollut kasvussa. (Uusitalo 2021.)

1.3 Opinnäytetyön tavoitteet ja rajaus

Tämä tutkimus keskittyy poranterien loppukiillotusprosessin automatisointiin robotiikan avulla. Loppukiillotusprosessi on olennainen osa poranterien huoltoa, sen vaikuttaessa poranterien kestävyyskykyyn. Kiillottamaton terä tylsyy liian nopeasti sen ulkopinnalla olevien karbidipiikkien aiheuttaman kitkan johdosta. Yrityksellä on käytössään välineistö lyhyiden, alle 100 millimetrin pituisten poranterien loppukiillotusprosessin suorittamiseen. Pidempien, 100–500 millimetrin pituisten poranterien kohdalla ongelmaksi muodostuu, etteivät ne mahdu kiillotuslaitteeseen.

Tavoitteena oli luoda automatisoitu poranterien loppukiillotusprosessi, yhteistoimintarobottia hyödyntäen. Yhteistoimintarobotti hakisi poranterän telineestä, veisi sen hiontaraetta sisältävään pyörivään kiillotusastiaan, pitäisi poranterää astiassa ja nostaisi poranterän pois sopivan ajan kuluttua. Lopuksi yhteistoimintarobotti siirtäisi poranterän teroitettujen telineeseen ja hakisi uuden poranterän. Tämä ratkaisu poistaisi työntekijältä paljon fyysistä työkuormaa ja mahdollistaisi työntekijän työpanoksen käytön johonkin vähemmän fyysistä rasitusta vaativaan tehtävään.

Työ rajattiin keskittymään toimivan prototyypin rakentamiseen. Pää tavoitteena oli selvittää robotiikan hyödyntämistä ja erityisesti yhteistoimintarobottia prototyypin kehittämisessä. Lisäksi tavoitteeksi asetettiin loppukiillotustuloksen ja siihen vaikuttavien tekijöiden arviointi.

Robotin turvallistamiseen liittyvät seikat rajattiin pois prototyypin osalta, sillä ne olisivat kasvattaneet merkittävästi opinnäytetyön laajuutta. Loppukiillotuksen arvioinnin osalta tulosten tarkastelu rajattiin pinnan oletetun heijastuksen muutoksien vertailuihin. Tähän päädyttiin pinnanlaadun tarkastelun aihealueen laajuuden vuoksi, mikä myös olisi kasvattanut työtä kohtuuttoman suureksi.

Keskeiset tutkimuskysymykset tässä opinnäytetyössä ovat:

- Soveltuuko tehtävään yhteistoimintarobotti?
- Mitkä tekijät vaikuttavat poranterän nostotyön onnistumiseen.
- Nopeuden ja ajan vaikutus loppukiillotukseen ja sen tulokseen.
- Kiillotusmedian ja kiillotettavan materiaalin vaikutukset lopputulokseen.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tutkimusote

Työ toteutettiin kehittämistutkimuksena, sillä lopputuloksena oli prototyyppi loppukiillotusprosessin automatisoimiseksi. Kananen (2010) toteaa kehittämistutkimuksessa pyrkimyksen olevan saavuttaa parempi lopputulos jonkin asian suhteen. Tähän liittyy arvoväittämiä kuten, mikä on kehitystä, mikä on parempaa ja kenen kannalta. (Kananen 2010, 159.) Tämä tutkimustapaan viittaa myös opinnäytetyön haluttu lopputulos, pyritään korvaamaan ihmisen tekemä työvaihe robotiikan ja automaation avulla, jolloin väistämättä ollaan uusien kehitysaskelien äärellä.

Kananen (2015) on tuonut selkeästi esille kehittämistutkimuksen syklit ja niiden vaiheet. Sykli on jaettu kahteen osaan, tutkimussykliin ja muutossykliin. Tutkimussykli on ensimmäisenä ja se pitää sisällään nykytilan kartoituksen, ongelman havaitsemisen, ongelman määrittelyn, vaihtoehtojen etsinnän sekä ratkaisun arvioinnin. Tätä seuraa muutossykli missä toteutetaan kyseinen valinta ja arvioidaan sekä seurataan sen vaikutusta lopputulokseen.

Sykli etenee yllä mainitussa järjestyksessä ja siirtyy seuraavaan sykliin, kun haluttu lopputulos syklin sisällä on saavutettu. Seuraavassa syklissä nämä asiat tehdään tarpeen mukaan uudelleen. (Kananen 2015, 41–42.) Tässä työssä kehittämistä jaettiin sykleihin, jolloin pystyttiin tarkastella mekaanisten ratkaisujen toimivuutta omina osa-alueinaan ja verrata niitä lopulliseen kokoonpanoon.

2.2 Tietoperusta

Opinnäytetyön aineistona käytettiin saatavilla olevia internetjulkaisuja, artikkeleita, ammattikirjallisuus- sekä tutkimuslähteitä. Tietoperustan aineiston suhteen noudatettiin lähdekritiikkiä ja pyrittiin viittaamaan alkuperäiseen lähteeseen, sekä vertailemaan samankaltaisia lähteitä toisiinsa.

Tutkimusaineiston paikkansapitävyyttä sekä oikeellisuutta tarkastellessa pyrittiin vertailemaan aikasemmin aihepiiriin tehtyjen tutkimusten ja niiden tulosten kesken. Tämä osoittautui

haasteelliseksi, sillä vastaavanlaisesta sovellutuksesta löytyi vain vähän tutkimustietoa, vaikka robotiikkaa sisältävistä hiontasovellutuksista on tehty aikaisemminkin opinnäyte- sekä gradutöitä.

Robottihionnan toteutustapoja on erilaisia. Heikkilä (2017) tutki opinnäytetyössään robottihiontaa robottiin kiinnitetyn hiontatyövälineen avulla. Robotin tehtävänä oli liikuttaa hiontatyövälinettä kappaleen pinnalla. Toisin kuin Heikkilän tutkimuksessa, tässä opinnäytetyössä hiontatyön suorittaa ulkopuolinen työkalu. Robotin tehtävä on toimittaa kappale hiontatyövälineen toiminta-alueelle. Myös Billing (2012) sekä Vienonen (2017) nostivat esille ulkopuolisen työkalun suorittaman hiontatyön mahdollisuuden robottihionnassa.

Vienosen tutkimuksen ollessa robottisolun toimintaperiaatteeltaan lähellä tämän opinnäytetyön toteutusta, todettiin kuitenkin, ettei siihen vertaaminen toisi tutkimukselle lisäarvoa hiontalaitteesta johtuen.

Kiillotusjäljen tulosten tarkastelua varten käytiin keskusteluja Jamkin pinnoitusmenetelmistä vastaavien edustajien sekä teollisuustekniikan lehtorin kanssa. Haastattelujen tiedoilla ja niiden perusteella tehtiin päätös tulosten tarkastelutapaa varten.

2.3 Eettisyys

Opinnäytetyötä tehdessä noudatettiin hyviä tieteellisiä käytänteitä. Helinin, Spoofin, Jäppisen ja Launisen (2012) mukaan hyvän tieteellisen käytännön toimintatapoja ovat rehellisyys, tarkkuus ja huolellisuus tutkimustyössä. Muiden tutkijoiden työtä ja saavutuksia kunnioitetaan asianmukaisilla viittauksilla ja lähdemerkinnöillä. Tutkimuksessa käytetyt tiedonhankinta- ja arviointimenetelmät ovat eettisesti kestäviä ja tutkimusta tehdessä säilytetään avoimuus tuloksia tarkastellessa.

Luotettavuutta tarkastellaan käsitteiden reliabiliteetin sekä validiteetin avulla. Kananen (2015) mukaan tutkimustulosten pitää olla luotettavia siinä suhteessa, että tulokset ovat pysyviä eivätkä johdu sattumasta. Pysyvyydellä tarkoitetaan sitä, että mikäli tutkimus uusittaisiin, olisivat tulokset samoja. Tässä on kyse reliabiliteetista ja puhuttaessa validiteetista tarkoitetaan sitä, että tutkitaan oikeita asioita. (Kananen 2015, 112.)

Reliabiliteettiä kehittämistutkimuksessa ilmennetään dokumentoimalla työvaiheet ja käytetyt järjestelmät. Validiteettia puolestaan ilmennetään tarkastelemalla tuloksia kriittisesti työvaiheiden välissä, jolloin voidaan varmistua siitä, että tehdyt valinnat ovat oikeita. Näitä luotettavuusmittareita voidaan pitää eräänlaisina varmennusvälineinä tutkimuksen kriittisissä pisteissä. (Kananen 2015, 112.)

3 Teollisuusrobotiikka

Teollisuusrobotiikka määritellään tässä opinnäytetyössä SFS- ISO 10218 standardin mukaisesti. Standardin mukainen määritelmä on ”teollisuuden automaatiosovelluksissa käytettäväksi tarkoitettu automaattisesti ohjattu, uudelleen ohjelmoitavissa oleva monikäyttöinen käsittelylaite, jonka akseleista vähintään kolme on ohjelmoitavissa ja joka voi olla kiinteästi asennettu tai liikkuva” (SFS-EN ISO 10218-1:2011, 12).

Yksinkertaistettuna teollisuusrobotti on mekaaninen kone, joka siirtää työkalun kiinnitysaiippaa halutulla tavalla. Liikerata voidaan määritellä kolmella eri tavalla, etukäteen, toimintaympäristön tapahtumien perusteella tai se voidaan luoda antureiden perusteella liikkeen aikana. Robotti koostuu nivelvarsista, jotka ovat jalustan ja työkalun välissä. Näitä niveliä liikuttavat takaisinkytketyt ohjattavat servotoimilaitteet. (Robotiikka 1999, 13.)

3.1 Robottien yleistyneisyys

Teollisuusrobottien käyttö on vuodesta 2010 noussut reilusti. Kansainvälisen robottiyhdistyksen (International Federation of Robotics) eli IFR:n mukaan tähän ovat syynä kasvava tarve robottisovelluksille sekä uusien robotti-innovaatioiden luomat mahdollisuudet teollisuuden robotiikan parissa. Vuonna 2020 käytössä olevien teollisuusrobottien määrä nousi yli 3 miljoonaan, kasvun ollessa noin 10 % edellisvuoteen verrattuna (ks. Kuvio 1). (IFR n.d.)



Kuvio 1. Käytössä olevat teollisuusrobotit vuosittain (Guerry, Müller, Kraus & Bieller. 2021, muokattu)

IFR:n mukaan globaalista koronapandemiasta huolimatta teollisuusrobottien asennusmäärät nousivat vuonna 2020 noin 0.5 % verrattuna vuoteen 2019. Järjestön mukaan vuosi 2020 oli historian kolmanneksi paras vuosi asennusmäärissä mitattuna (ks. Kuvio 2). (IFR n.d.) Lisäksi yhteistyörobottien määrä suhteessa teollisuusrobotteihin on IFR:n kuvaajan mukaan ollut nousussa vuodesta 2017. Vuonna 2020 yhteistyörobottien määrä vuosittain asennetuista roboteista oli noin 6 % (ks. kuvio 3).

Yhteistyörobottien suhteen kasvu tavanomaisiin teollisuusrobotteihin voidaan IFR:n mukaan selittää niiden valmistajamäärän kasvulla sekä monipuolisemmilla sovellutuksilla teollisuuteen. (IFR Press room 2020.) Osaltaan yhteistoimintarobottien kasvua voi selittää muutokset standardeihin ISO 10218-1:2011 sekä ISO/TS 15066:2016, jotka ovat mahdollistaneet entistä monipuolisemman käyttötavan yhteistoiminnalle, niiden ottaessa kantaa robottien turvallisuuteen. Nämä eivät vielä itsessään riitä robottien turvalliseen käyttöön vaan siihen vaikuttavat muutkin tekijät.



Kuvio 2. Teollisuusrobottien asennukset vuosittain (Guerry ym. 2021, muokattu)



Kuvio 3. Yhteistyörobottien suhde teollisuusrobotteihin (Guerry ym. 2021, muokattu)

3.2 Turvavaatimukset

Suomessa teollisuusrobotiikan, kuten myös yhteistörobotiikan turvallisuutta ohjaa työturvallisuuslaki 23.8.2002/738. Työturvallisuuslain 41 § mukaan koneiden käyttö ei saa olla vaaraksi tai aiheuttaa haittaa niitä käyttäville työntekijöille tai muille työntekijöille. Laki velvoittaa myös varautumaan poikkeustilanteisiin, jotta koneen häiriötilanteessa aiheudu vaaraa

työntekijöille. (L 23.8.2002/738.) Lisäksi robotit täyttävät EU:n konedirektiivin 2006/42/EY mukaisen määritelmän koneista, joten niihin sovelletaan konedirektiiviä (2006/42/EY, 27).

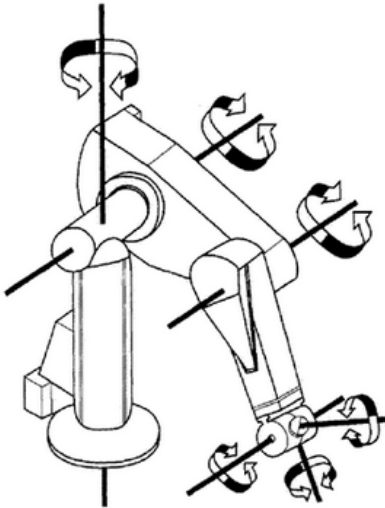
Robottien turvallisuuteen kuten moneen muuhunkin asiaan on kehitetty standardeja. Standardisoinnilla laaditaan yhteisiä toimintatapoja, vaatimuksia sekä hyviä käytäntöjä. Standardit voivat olla kansallisia, eurooppalaisia tai kansainvälisiä. Standardit eivät kuitenkaan ole pakollisia ja niiden käyttö on vapaaehtoista. Yleensä ne kuitenkin luovat selkeitä toimintatapoja, jotka vähentävät yllätyksiä sekä riskejä. (SFS n.d.) Robottien turvallisuuteen liittyviä standardeja ovat aikaisemmin mainitut ISO 10218-1:2011 ja siihen pohjautuva yhteistörobotiikan turvallisuuteen keskittyvä ISO/TS 15066:2016 (SFS-EN ISO/TS 15066:2016, 1).

3.3 Nivelet ja vapausasteet

Robotin nivel on liikkeen mahdollistava mekanismi, joka yhdistää kaksi tukivartta toisiinsa. Vaaditut nivelen liikkeet useimmille teollisuusroboteille ovat kiertoliike, säteittäinen liike ja pystysuora liike. Kiertoliike mahdollistaa robotin nivelvarren liikkeen vaakasuoralla tasolla, säteittäinen liike nivelen säteen mukaisesti ja pystysuora liike vie robotin työkalun eri korkeustasoille. (Gupta, Arora, Westcott ja Riescher 2017, 413).

Vapausasteet

Vapausaste on numeerinen arvo, jolla kuvastetaan mekanismin lineaaristen tai pyöriäisten liikemahdollisuuksien lukumäärää. Robotin jokainen nivel edustaa yhtä uutta vapausastetta. (Robotiikka 1999, 185.) Teollisuusroboteilla on yleensä viisi tai kuusi vapausastetta. Kolme vapausastetta siirtävät robotin työkalua 3D- avaruudessa, muut vapausasteet työkalun asentoa suhteessa sen kohteeseen (Ks. Kuvio 4). Kuuden vapausasteen robotti pystyy ylettymään kaikkialle sen työskentelyalueella useammasta eri kulmasta. (Gupta ym. 2017,408.)



Kuvio 4. Robotin 6 vapausastetta (Gupta ym. 2017,409)

3.4 Koordinaatistot

Määritelmän mukaan tavallisella robotilla koordinaatiston XY-taso yhtyy lattiaan ja X-akseli osoittaa ensimmäisen nivelen työalueen keskikohtaa. Z-akseli yhtyy ensimmäisen vapausasteen akseliin. Teollisuusrobottien koordinaatistoja on kolme, peruskoordinaatisto, maailmakoordinaatisto ja työkalukoordinaatisto. Peruskoordinaatisto on sidottu robotin jalustaan ja maailmakoordinaatisto robotin ympäristöön. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi, kuljettimeen, robotin oheislaitteisiin tai rakennukseen sidottua ulkopuolista koordinaatistoa. Työkalukoordinaatisto on sidottu työkalumäärittelyllä kiinni haluttuun kohtaan robotin työkalua. Työkalukoordinaatistolla voidaan siirtää työkalua tarkasti suhteessa johonkin muuhun pintaan. Näin voidaan pitää työkalun kärkeä tarkasti esimerkiksi 10 millimetrin etäisyydellä pinnasta ja samalla liikuttaa työkalua suoraviivaisesti. (Robotiikka 1999, 21.)

Miller ja Miller (2017) toteavat erilaisten robottien liikkuvan eri tavalla koordinaatistossa, johtuen niiden mekaanisesta suunnittelusta, kuten kiertyvien akselien määrästä. Näin ollen voidaan määritellä tarkennettuja koordinaatistoja erityyppisille roboteille. Näitä koordinaatistoja on neljä ja ne ovat nimeltään: karteesian koordinaatisto, sylinterikoordinaatisto, polaarinen koordinaatisto sekä nivelvarsikoordinaatisto. (Miller & Miller 2017, 31.) Näiden koordinaatistojen avulla on helpompi hahmottaa erilaisten robottien toimintaperiaatteet ja liikeradat.

Kartesinen koordinaatisto

Kartesian koordinaatit kuvataan X-, Y-, Z-akseleilla tai tasoilla. Referenssipisteenä toimii näiden kolmen tason tai akselin risteyskohta. Robotin keskilinja on referenssipisteenä näille kaikille akseleille. Robotti käyttää X, Y ja Z tasoja saavuttaakseen halutun pisteen sen koordinaatistossa. Karteesisessa koordinaatistossa voi liikkua vain X, Y ja Z akselin suuntaisesti. Työskentelyalue karteesisella koordinaatistolla on suorakulmion muotoinen. (Miller & Miller 2017, 32.)

Sylinterikoordinaatisto

Sylinterikoordinaatistossa on käytössä myös kolme akselia, mutta ne ovat osittain eri tavalla nimettyjä kuin karteesian koordinaatistossa. Akselit ovat nimeltään R-akseli, Z-akseli ja Theta. R-akseli tarkoittaa ulottuvuutta (eng. reach) eli sisään- ja ulostyöntyvää liikettä. Z-akseli indikoi ylös ja alas tapahtuvaa liikettä. Theta-akseli kuvaa pyörivää liikettä origon ympärillä.

Sylinterikoordinaatisto muodostaa nimensä mukaisesti sylinterin muotoisen työskentelyalueen. (Miller & Miller 2017, 34.)

Polaarinen koordinaatisto

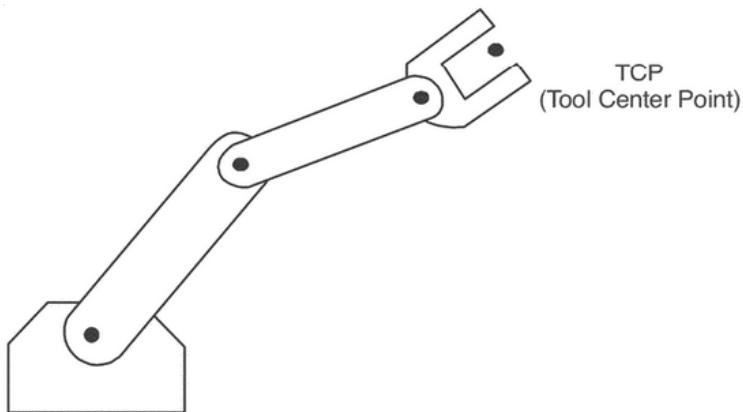
Polaarinen koordinaatisto kuvaa pallonmuotoista liikerataa. Sen kolme akselia ovat Theta, R(reach) ja Beta. Polaarinen koordinaatisto onkin hyvin samankaltainen sylinterikoordinaatistoon nähden ja niiden R sekä theta akselit ovatkin samanlaisia. Erona on polaarisen koordinaatiston viimeinen akseli Beta, mikä mahdollistaa koko nivelvarren ylös-alas liikkeen kaarevana. (Miller & Miller 2017, 36.)

Nivelvarsikoordinaatisto

Nivelvarsikoordinaatistossa Theta-akseli on sama kuin polaarisessa- sekä sylinterikoordinaatistossa. Kaksi muuta akselia ovat nimeltään W- ja U-akseli. W-akseli kuvastaa ylemmän nivelvarren "olkapäättä" ja sen liikerata on kiertyvästi ylös-alas suuntainen. U-akseli liikkuu samansuuntaisesti ja sillä kuvataan kyynärvarren liikettä. (Miller & Miller 2017, 36.)

3.4.1 Työkalukeskipiste (TCP)

Työkalukeskipiste (TCP) on työkalun oma uniikki piste, mikä kertoo koordinaatistolle työkalun keskeisen sijainnin (Gupta, Arora, Westcott & Riescher 2017,410; Gurgul 2018, 124). Työkalupiste voidaan määrittellä robotista riippuen eri koordinaatistoille. Työkalun vaihdon yhteydessä robotti uudelleenohjelmoidaan tunnistamaan uusi työkalukeskipiste. (Gupta ym. 2017,410.)



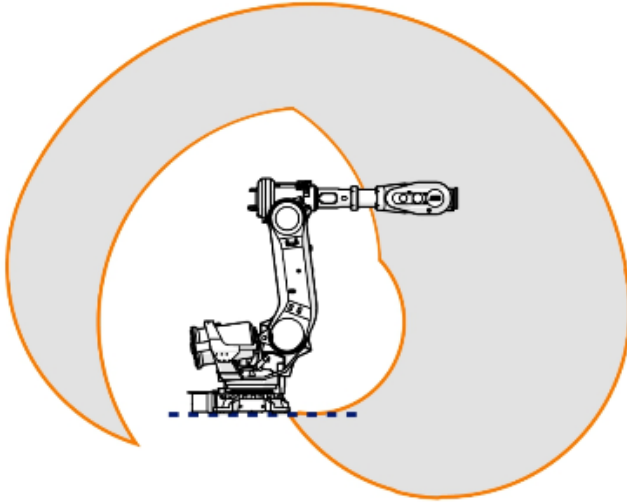
Kuvio 5. Työkalukeskipiste, TCP (Gupta ym. 2017, 410)

3.4.2 Työskentelyalue

Robotin työskentelyalue määrittyy robotin liikkeiden ja ulottuvuuden mukaan. Työskentelyaluetta kuvataan myös vaikutuksen alaisena olevana pallomaisena alueena (Sphere of influence). Robotti tarvitsee kolme erilaista nivelen liikerataa, jotta se pystyy ulottumaan kaikkialle sen työskentelyalueella. Näistä ensimmäinen on kiertyminen, eli nivelvarren liike vasemmalle ja oikealle. Toinen vaadittava liikerata on nivelvarren ulottuminen ja vetäytyminen. Kolmantena vaaditaan nivelvarren noston ja laskun mahdollistaminen. (Miller & Miller 2017, 29–30.)

Erilaisilla robottityypeillä on luonnollisesti omanlaisensa työskentelyalueet. Karteesiselle konfiguraatiolle ulottuvuus on suorakulmion muotoinen alue. Sylinterikonfiguraatiolle ulottuvuus on ontton sylinterin muotoinen alue. Polaarisen konfiguraation ulottuvuus on osa-alue pallomaisen muotoisesta alueesta. Nivelvarsikonfiguraatiolla ei ole yhtä ainoaa ulottuvuusaluetta vaan useampia. (Gupta ym. 2017,411.) Kuviossa 6 on kuvattu nivelvarsirobotin työskentelyalue sivusuunnasta, sen avulla pystyy hahmottamaan työskentelyalueen ja sen rajat. Vaikka

nivelvarsirobotin työskentelyalue on laaja ja se voi ulottua monella eri tavalla samaan pisteeseen, jää varsinkin lähelle robottia alueita mihin ei kyetä ulottumaan (Ks. Kuvio 6).



Kuvio 6. Nivelvarsirobotin työskentelyalue sivusta (Gurgul 2018, 61, muokattu)

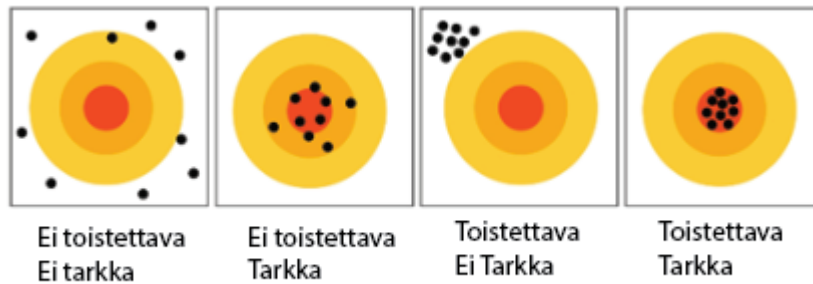
3.4.3 Toistettavuus ja luotettavuus

Robotiikassa tärkeää on robotin tarkkuus ja toistokyky, muutoin robotin olisi mahdoton suorittaa toistettavia tehtäviä luotettavasti. Robotti ei kykenisi asettamaan esimerkiksi kappaletta oikeaan kohtaan, sillä poikkeamaa olisi liikaa. Tämä tekisi robotin käyttämisestä hyvin haastavaa ja monessa tapauksessa robotista hyödyttömän apuvälineen.

Robotin liikkeen toistoon ja tarkkuuteen voivat vaikuttaa useat eri tekijät. Gurgulin (2018) mukaan syitä voi olla esimerkiksi robotin kuluneisuus, valmistusmateriaali ja sen reagointi lämpötilan muutoksiin. Näiden muuttujien vaikutukset vaihtelevat robotin elinkaaren aikana. Tällöin voidaan olettaa, ettei robotti pysty osumaan tarkasti määriteltyyn kohtaan, vaikka se olisi matemaattisesti laskettu. (Gurgul 2018, 93–94.)

Gupta, Arora, Westcott ja Riescher (2017) ovatkin todenneet tähän ongelmaan olevan ratkaisuna sopivan mittaustavan käyttö. Tarkkuutta ja toistettavuutta voidaan mitata robotin toistuvasta ajamisesta samaan pisteeseen. Useiden ajojen jälkeen tarkastellaan osumakohtien hajontaa ja

määritellään sen avulla, onko tarkkuus riittävä. (Gupta ym. 2017, 411.) Tätä havainnollistaa sekä Gurgulin (2018) että Guptan ja muiden (2017) käyttämä esitystapa toistettavuuden ja tarkkuuden erolle (ks. Kuvio 7). Tarkkuuttakin tärkeämpi ominaisuus on toistettavuus, sillä tarkkuuden voi ohjelmallisesti korjata, mikäli toistettavuus on riittävä. (Gupta ym. 2017, 411.)

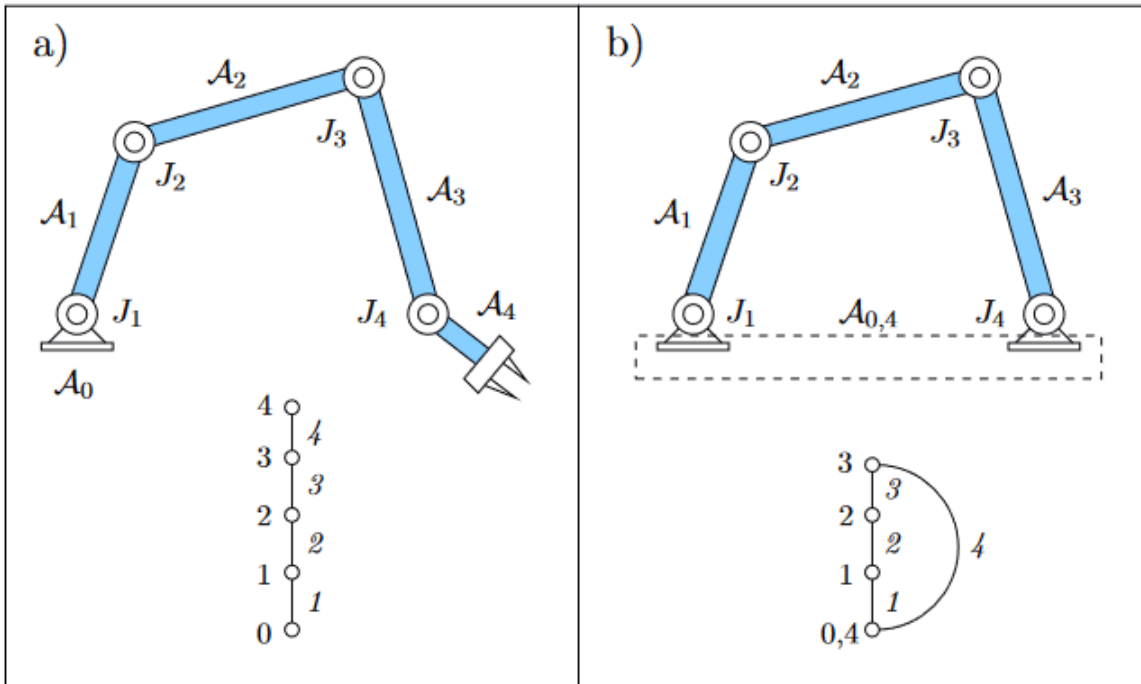


Kuvio 7. Robotin ajopisteiden toistettavuuden ja tarkkuuden ero (Gurgul. 2018, 94, muokattu)

3.4.4 Kinematiikka

Billing (2012) toteaa tarkastelun kohteena robottikinematiikassa olevan robotin nivelpisteiden asemat, nopeudet sekä kiihtyvyydet. Nivelpisteet liitettynä toisiinsa muodostavat kinemaattisen ketjun, joka yhdistää eri koordinaatit toisiinsa. Tällöin on mahdollista ratkaista ketjun viimeisen koordinaatiston asento ja paikka, ketjun ensimmäisenä olevassa peruskoordinaatistossa. (Billing 2012, 11 - 13.)

Sciavico ja Siciliano (2000) tarkentavat kinemaattisen ketjun koostuvan nivelakseleista, jotka on kiinnitetty toisiinsa. Ketjuja voi olla avoimia sekä suljettuja (ks. Kuvio 8). Avoimella ketjulla viitataan ketjun olevan kiinni vain yhdellä nivelellä sen aloituspisteeseen. Kuvion 8 vasemmalla puolella on esitetty avoin ketju visuaalisesti. Suljettu ketju muodostaa lenkin, ketjun nivelien kiinnittyessä toisiinsa. (Sciavico & Siciliano 2000, 39.) Kuvion 8 oikealla puolella on suljetun ketjun visuaalinen esitys. Avoimia ja suljettuja kinemaattisia ketjuja esiintyy erilaisissa teollisuusroboteissa, joiden toimintaperiaatteita avataan myöhemmin tässä opinnäytetyössä.



Kuvio 8. Avoin ja suljettu kinemaattinen ketju (Cortés 2003, 15)

Kinematiikan avulla robotti pystyy selvittämään eri sijainteja, kuten sen rungon sijainnin suhteessa työkaluun. Robotti kykenee muuttamaan työkalun paikkatiedon vapausasteiden ohjearvoiksi laskemalla sen kinemaattisesti. Suoraksi kinemaattiseksi tehtäväksi kutsutaan robotin työkalun aseman määrittämistä paikka-arvojen perusteella. Käänteisellä kinemaattisella tehtävällä taas tarkoitetaan robotin vapausasteiden määrittämistä robotin työkalun aseman avulla. (Robotiikka 1999, 20.)

3.5 Teollisuusrobotit

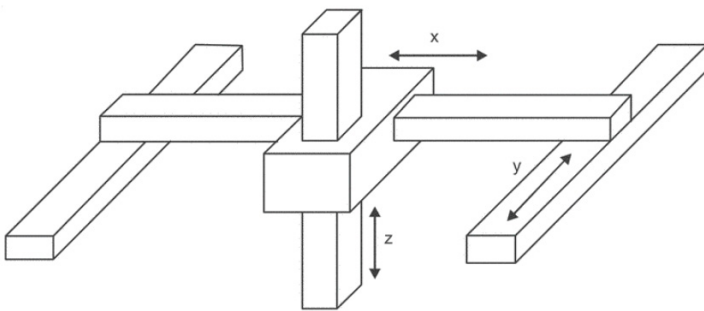
Teollisuusrobotteja on paljon ja ne eroavat hieman toisistaan riippuen valmistajasta. Vaikka roboteissa olisikin eroja, kuuluvat ne pääasiassa johonkin seuraavista alaluokista. Robotit jaetaan näihin alaluokkiin niiden rakenteeseen perustuen, kuten kuinka moni nivel kiertyy tai liikkuvatko nivelet pelkästään lineaarisesti.

3.5.1 Suorakulmainen robotti

Yhteinen tunnusomainen ominaisuus suorakulmaisilla roboteilla on niiden kolme ensimmäistä vapausastetta, jotka ovat lineaarisia (Robotiikka 1999, 16). Näistä roboteista käytetään myös

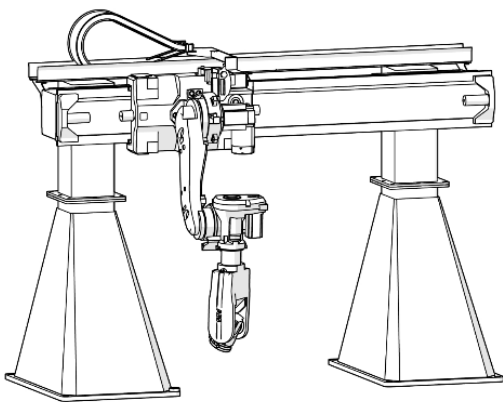
nimitystä karteesian robotti. Nimitys tulee sen liikkeiden käyttämästä karteesian koordinaatistosta X-Y-Z. Robotti liikkuu X-akselin suunnassa sivuttain, Y-akselin suunnassa pitkittäin ja Z-akselin suunnassa vertikaalisesti (Ks. Kuvio 9). (Gupta ym. 2017, 415.)

Karteesian robotteja käytetään erilaisissa yksinkertaisissa kokoonpanotehtävissä, tai kappaleiden nosto- ja siirtotyötehtävissä. Niiden etu on yksinkertainen ohjelmointi karteesian koordinaatiston ansiosta, mutta samalla se rajoittaa robotin toimintaa. Robotti pystyy ulottumaan vain suoraan sen edessä olevalle alueelle. (Gupta ym. 2017, 415–416.)



Kuvio 9. Karteesian robotti (Gupta ym. 2017, 415)

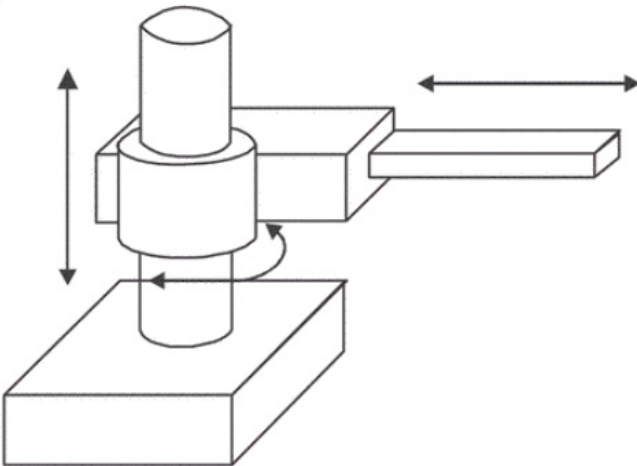
Tyypillisesti tämän robottityypin edustajaa kutsutaan nimellä portaalirobotti, vakiintuneelta nimitykseltään myös GANTRY (ks. Kuvio 10). Sen rakenne on tuettu työalueen nurkista palkeilla. (Robotiikka 1999, 16.)



Kuvio 10. GANTRY-robotti (Gurgul 2018, 62)

3.5.2 Sylinterirobotti

Sylinteriroboteilla on yksi kiertyvä vapausaste ja kaksi lineaarista vapausastetta (Ks. Kuvio 11). Tämä rakenne mahdollistaa sylinterirobotille suuren toimintaympäristön ja kyvyn raskaiden painojen nostamisen ja siirtämisen. Robotin vaaka-akseli on kiinnitetty pystyakseliin, jotka molemmat liikkuvat lineaarisesti. Kombinaatio on yhdistetty kiertyvään tukijalkaan, mikä mahdollistaa pyörimisliikkeen robotin oman tukijalan ympäri. (Gupta ym. 2017,416.)



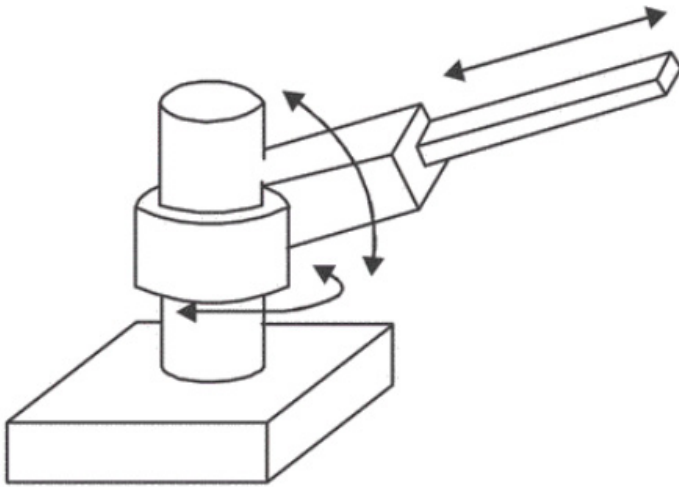
Kuvio 11. Sylinterirobotti (Gupta ym. 2017, 416)

Sylinterirobotin nivelvarret muodostavat sylinterikoordinaatiston (Robotiikka 1999, 184). Sylinterirobotteja käytetään pistehitsauksessa tai kokoonpanotehtävissä. Niiden hyötyjä ovat ulottuvuus itsensä ympäri, helppo ohjelmointi sekä hyvä kantokyky. Haittapuolena on sylinteriakseliston tuoma rajallisuus: ulottuvuus esteiden ympäri tai robotin itsensä yläpuolelle ei ole mahdollista. (Gupta ym. 2017,417.)

3.5.3 Napakoordinaatistorobotti

Napakoordinaatistoroboteilla on kaksi kiertyvää niveltä sekä yksi lineaarinivel (Gupta ym. 2017, 417; Robotiikka 1999, 181). Robotin lineaarinivel säätelee käsivarren etäisyyttä robotin origon suhteen. Tämä yhdessä kahden kiertyvän nivelen kanssa mahdollistavat robotille laajan työskentelyetäisyyden. Robotin työskentelyalue on pallomainen sen ulottuvuuden ansiosta (Ks. Kuvio 12). Napakoordinaatistorobotteja käytetään esimerkiksi hitsaustehtävissä tai sovelluksissa, jotka vaativat työkaluhallintaa. Robotin nivelet kuitenkin rajoittavat sen vertikaaliliikettä ja lisäksi

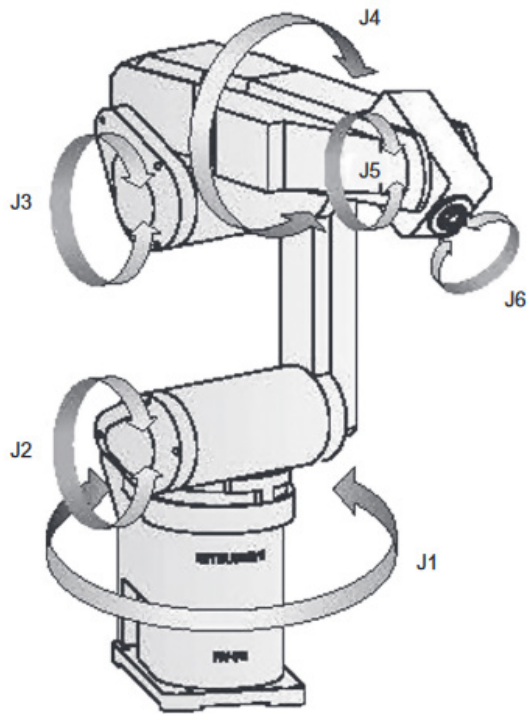
pallomainen koordinaatisto luo haasteita ohjelmoinnin kannalta sen ollessa kompleksinen ja vaikeasti hahmotettavissa. (Gupta ym. 2017,417.)



Kuvio 12. Napakoordinaatistorobotti (Gupta ym. 2017, 417)

3.5.4 Kiertyvänivelinen robotti

Kiertyvänivelinen robotti koostuu tukivarsista, jotka ovat peräkkäin kiinni toisissaan kiertyvillä nivelillä. Nykyään kiertyvänivelisissä roboteissa on kuusi tai seitsemän kiertyvää niveltä. Tämä mahdollistaa robotin ulottuvuuden useammasta eri kulmasta tai työkalun asennon vaihtelut sen lähestyessä kohti haluttua pistettä työskentelyalueella (Ks. Kuvio 13). Liikeradat tällaisella robotilla ovat monimutkaiset ja rakenteen takia jokainen tukivarsi joutuu kannattelemaan seuraavien tukivarsien painoa. Tällä on vaikutuksia robotin kantokykyyn, tarkkuuteen ja toistettavuuteen. (Wilson 2015, 24.)

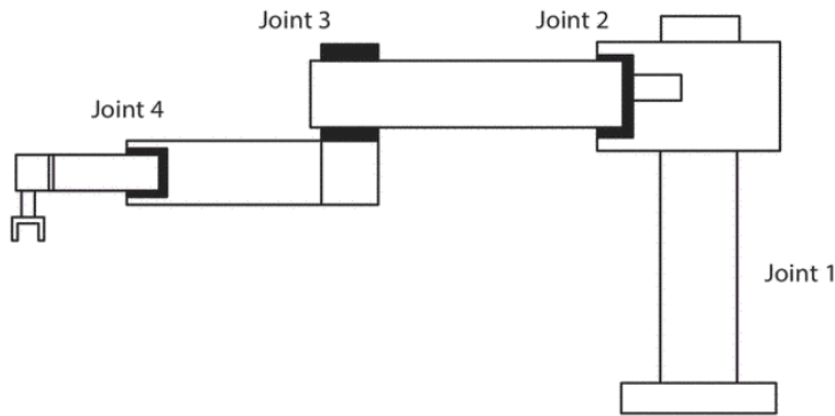


Kuvio 13. Kiertyvänivelinen robotti (Wilson, 2015, 23)

3.5.5 SCARA-robotti

SCARA-robottia (Selective Compliant Assembly Robot Arm) kuvataan tiettyyn suuntiin joustavana kokoonpanorobottina (Ks. Kuvio 14). Se pystyy viisteidensä avulla joustamaan vain sivusuunnissa (Robotiikka 1999, 183.) Guptan ja muiden (2017) mukaan SCARA-robotti on yhdistelmä kiertyvänivelistä- ja sylinterirobottia. Sen kiertyvät nivelet ovat pystysuunnassa ja akselien lukumäärä täytyy olla yli kolme, jotta SCARA-robotin määritelmä täyttyy. (Gupta ym. 2017, 419.)

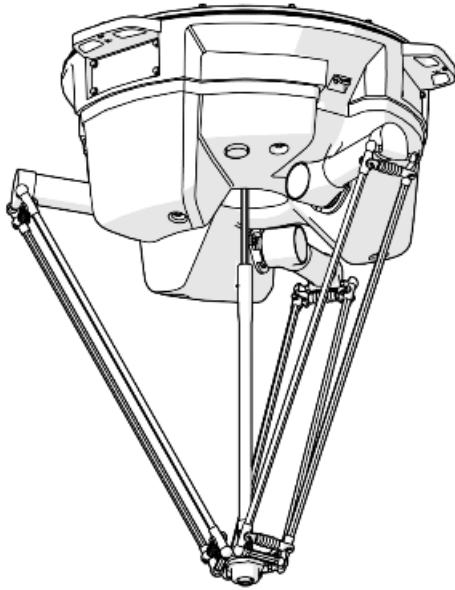
Gurgul (2018) täydentää, että tyypillisen varsirakenteen johdosta SCARA-robotit ovat jossain määrin alttiina niihin X- ja Y-tasoissa vaikuttaville voimille ja tarjoavat samalla korkean jäykkyyden Z akselille. Tämä tekee niistä erinomaisia kokoonpanorobotteja. SCARA-robotti pystyy korjaamaan sen positioon liittyviä virheasentoja, taivuttamalla hieman sen käsivartta. (Gurgul 2018, 77.)



Kuvio 14. SCARA-robotti (Gupta ym 2017, 419)

3.5.6 Rinnakkaisrakenteinen robotti

Rinnakkaisrakenteisen robotin toimilaitteet on kytketty rinnakkain vaikuttamaan yhtä aikaa yhteisen tukirakenteen paikkaan ja asentoon (Ks. Kuvio 15). Täten päästään suuriin voimiin ja jäykkyyteen tai kevyisiin rakenteisiin. (Robotiikka 1999, 183.) Gurgul (2018) toteaa rinnakkaisrakenteisissa roboteissa kyseistä mekaniikkaa kutsuttavan myös suljetun kinematiikan ketjuksi, joka luo edellytykset erittäin korkean tason tarkkuudelle. Siihen pääseminen on mahdollista, kun yksittäisten akselien virheasennot eivät kertaannu toistensa kanssa, kuten sarjassa olevien akselien kanssa käy. Haittapuolena rinnakkaisrakenteisessa robotissa on sen monimutkainen mekaaninen rakenne, mikä vaatii kehittyneen ohjausjärjestelmän. (Gurgul 2018, 74.)



Kuvio 15. Rinnakkaisrakenteinen robotti (Gurgul 2018, 75)

3.5.7 Yhteistyörobotti

Yhteistyö- tai yhteistoimintarobotit (Collaborative robots) myös vakiintuneelta nimeltään cobotit ovat uuden sukupolven robotiikkatuote, jonka kehittämisen mahdollisti ISO standardin (ISO 10218, 2006) turvallisuuspäivitys vuonna 2011. Tällaisten yhteistoimintarobottien haluttiin olevan turvallisia, nopeasti ja helposti asennettavia, joustavia työtehtävien suhteen sekä hankintakustannuksiltaan edullisia. Tämän lisäksi niiden haluttiin olevan sarjaliitynnöiltään monipuolisia, jotta ne voitaisiin helposti yhdistää asiakkaan järjestelmiin ja tietokoneisiin. Yhteistoimintarobotit eroavat teollisuusroboteista, sillä ne voivat toimia ihmisen läheisyydessä ilman turva-aitoja, mikä ei olisi mahdollista teollisuusrobottien kanssa. (Gurgul 2018, 84.)

Standardissa ISO 10218-2 määritellään yhteistoiminta erityislaatuiseksi tilanteeksi, jossa robotti jakaa ihmisen kanssa työtilan. Yhteistoiminta on mahdollista vain, kun kaikki vaadittavat turvatoimenpiteet ovat aktiivisia. Yhteistoimintaan osallistuvan robotin täytyy olla erityisesti suunniteltu siihen, standardin ISO 10218-1 mukaisesti. (SFS-EN ISO 10218-2:2011, 38.)

Kuviossa 16 on Universal Robotsin valmistama UR5 malli, jonka muotoilusta voi päätellä, että teräviä kulmia sekä reunoja on pyritty välttämään. Tällä tavoin pyritään vaikuttamaan robotin

turvallisuuteen. Turvallista yhteistoimintarobottia ei kuitenkaan luoda pelkästään ulkomuotojen avulla vaan siihen vaikuttavat useat eri tekijät (Ks. Kuvio 16).



Kuvio 16. Yhteistoimintarobotti UR 5, Universal robots (Universal Robot UR5e. 2022)

VTT:n (Valtion teknillinen tutkimuskeskus) raportissa Malm (2017) toteaa yhteistyörobottien henkilövahingoilta suojautumisen keinoina olevan kontrolloidut liikealue, voima ja nopeus sekä robotin valvonta eri tilanteissa (Malm 2017, 14). Standardin SFS-EN ISO 10218-2:2011 mukaan robotin nopeus, teho, voima, ergonomia sekä pienin välietäisyys seinään määritellään riskien arvioinnin perusteella (SFS-EN ISO 10218-1:2011, 41). Jokaisen robottisovelluksen kohdalla on siis tarve tehdä riskien arviointi vähentääkseen henkilövahinkojen riskiä.

Toisin kuin muissa teollisuusroboteissa, yhteistoimintaroboteilla on yleisesti seitsemän niveltä, mikä tekee niistä monipuolisempia ulottuvuuden suhteen. Tämä seitsemäs vapausaste mahdollistaa esimerkiksi robotin siirtymisen pois ihmisen edestä, muuttamatta silti työkalun sen hetkistä asentoa ja sijaintia. (Gurgul 2018, 85.)

Jotta toiminta yhteistyörobottien läheisyydessä olisi turvallista ihmisille, on määritelty voimarat, jotka rajoittavat robottia sen ollessa yhteistoimintatilassa. Voimarat vaihtelevat riippuen siitä,

mihin ihmisen kehonosaan törmäys kohdistuu. Puristuminen robotin ja esteen väliin tai niinsanottuna läpilyöntinä, jolloin robotti osuu liikeradan aikana ihmiseen ilman, että toisella puolella olisi estettä minkä väliin puristua. Esimerkiksi kasvoihin kohdistuvaan iskuun on määritelty maksimivoimaksi 65 Newtonia, mutta polviin voi kohdistua 220 Newtonin voima. Muiden kehonosien osalta maksimivoimat ovat jotain näiden arvojen väliltä. Voiman lisäksi on määritelty maksimipaine iskun osuessa. Maksimipainetta mitataan asteikolla newton per neliösenttimetri (N/cm^2), tällöin törmäyksen voima voi olla pienempi, mikäli ihmiseen osuva törmäyspinta on terävä tai muuten pinta-alaltaan pieni. (SFS-EN ISO/TS 15066:2016, 25.)

3.6 Teollisuusrobotin ja yhteistoimintarobotin ero

Teollisuusrobotin ja yhteistoimintarobotin vertailu ei ole yksiselitteistä, sillä molemmille on omat käyttötarkoituksensa. Kuitenkin selkeimpinä erottavina tekijöinä voidaan pitää työskentelyaluetta, ohjelmoitavuutta sekä työkuormaa. Yhteistoimintarobotti on tarkoitettu avustamaan ihmisen työskentelyä hänen lähetyvillään ilman turva-alueita. Teollisuusrobotti taas on tarkoitettu korvaamaan ihmisen tekemä työvaihe kokonaisuudessaan. Teollisuusrobotit ovatkin turvallisuuden takaamiseksi suojattu turva-alueilla, kuten aidoilla. Pienen kokonsa sekä ihmisten lähellä työskentelyn takia yhteistoimintarobotit eivät voi nostaa suuria kuormia, toisin kuin monet teollisuusrobotit. (Roehl 2017.) Yhteistyörobotin työskentely ihmisen lähellä ei ole itsestäänselvyys, vaan sen käyttöä täytyy arvioida turvallisuuden kautta kuten myös teollisuusrobotin käyttöä. Standardin SFS-EN ISO 10218-2:2011 mukaisesti suoritettu riskien arviointi pitää sisällään:

- Rajojen määrittämisen robotille
- Vaarojen tunnistamisen
- Riskin suuruuden arvioinnin
- Riskin merkityksen arvioinnin (SFS-EN ISO 10218-2:2011, 12).

Ohjelmoinnin osalta yhteistoimintarobotit on suunniteltu mahdollisimman yksinkertaisiksi, jotta niiden ohjelmointiin ei tarvittaisi erillistä asiaan syvällisesti perehtynyttä henkilöä vaan ohjelmoinnin voisi suorittaa esimerkiksi robotin kanssa työskentelevä työntekijä. Yhteistoimintarobottien ohjelmoinnin voi suorittaa johdattamalla, jolloin erillistä ohjelmakoodia ei tarvitse käsin kirjoittaa. (Roehl 2017.)

3.7 Ohjausjärjestelmä

Robotin ohjausjärjestelmän voidaan kuvailla olevan robotin aivot. Se prosessoi ulkoisia signaaleja ja välittää eteenpäin käskyjä robotin toimilaitteille. (Gupta ym. 2017, 404) Robotin ohjausjärjestelmä on reaaliajassa toimiva prosessitietokone. Tietojen lukeminen ja lähettäminen tapahtuu alle millisekunteissa eli toimilaitteille voidaan antaa käskyjä tuhansia kertoja sekunnin aikana. (Robotiikka 1999, 34.)

3.8 Työkalut ja tarttujat

Työkaluja on olemassa useita erilaisia kuten tarttujat, hitsaustyökalut tai maalausruiskut. Niiden avulla robotti pystyy suorittamaan sille annetun tehtävän (SFS-EN ISO 10218-1:2011, 12; Robotiikka 1999, 184; Miller & Miller 2017, 62). Nämä edellä mainitut työkalut on jaoteltu toimintansa perusteella kahteen ryhmään: tarttujiin sekä päätetyövälineisiin (End effector), joita kutsutaan myös prosessityökaluksi. Tarttujaa voidaan ajatella yksinkertaisena työkaluna, jonka tehtävänä on vain tarttua kappaleeseen ja pitää siitä kiinni, kunnes se saa käskyn vapauttaa kappaleen (ks. Kuvio 17). Päätetyöväline eroaa tarttujasta siinä mielessä, että sen tehtävänä on olla osa prosessia, kuten aikaisemmin mainittu maalausruisku. Työkalu tai prosessointilaitte kiinnitetään robotin työkalulaippaan eli mekaaniseen liitospintaan. (Robotiikka 1999, 60; Miller & Miller 2017, 62.)



Kuvio 17. Tarttuja, Robotiq (Robotiq 2020)

Dinwiddie (2019) nostaa esille erilaisten tarttujen tarpeen. Robottien korvatesa ihmisten suorittamia monipuolisia työtehtäviä, tarvitaan yhtä lailla erilaisia tarttuvia. Kappaleiden muodot ja

painot vaihtelevat sekä tavat, joilla niihin tartutaan, tartutaan voivat olla hyvinkin erilaisia. Tästä syystä tarttujat ovatkin monipuolinen osa-alue robotin työkaluina. (Dinwiddie 2019,79.)

Tarttujien toimintaperiaatteen ollessa sama, on niiden mekaanisissa toiminnoissa kuitenkin eroavaisuuksia. Robotiikka (1999) -teoksen mukaan ne voidaan jaotella ryhmiin seuraavankaltaisesti:

- avautuvat ja sulkeutuvat tarttujat
- kiertyväsormisilla ja rinnakkain suoraviivaisesti liikkuvilla sormilla varustetut tarttujat
- pneumatiikalla, hydraulikalla tai sähköllä toimivat tarttujat
- tarttujan liikkuvien sormien lukumäärän mukaan
- jäykät ja joustavat tarttujat
- kappalekohtaiset tai yleistarttujat
- keskittävät tarttujat
- magneettiset tarttujat
- alipainetarttujat
- sisäisesti laajenevat tarttujat
- älykkäät anturoidut tarttujat
- erikoistarttujat. (Robotiikka 1999, 60).

Työvaiheeseen osallistuvia tavallisimpia päätetyövälineitä ovat:

- kaari- ja pistehitsauspäät
- ruiskumaalaus-, liimaus ja saumasuutin
- jyrsin tai hiomalaite
- polttoleikkain
- valukauha
- ruuvaustyökalu tai niittauslaite. (Robotiikka 1999, 77).

3.9 Anturit

Anturin tehtävä on muuntaa sähkötön signaali sähköenergiaksi. Kun signaali saadaan muutettua ymmärrettävään muotoon, pystyy ohjainjärjestelmä lukemaan signaalin sisältämän tiedon sekä tekemään määrätyt toimenpiteet. (Miller & Miller 2017, 86.)

Robotiikassa sensoreiden merkitys on aivan yhtä tärkeä kuin muuallakin teollisuudessa. Ilman antureita olisi mahdotonta tietää robotin itsensä asentoa, saati ympäristössä tapahtuvia muutoksia. Tällöin turvallisen ja toimintavarman robottisolun rakentaminen olisi erittäin vaikeaa

tai mahdotonta. (Dinwiddie 2019, 127.) Gupta ja muut (2017) kiteyttävät antureiden toimivan robotin aisteina, aivan kuten ihmisen näkö-, kuulo-, haju- sekä makuaisti. Ilman aisteja eli antureita, robotti olisi vain kone. (Gupta ym. 2017, 441.)

Anturit ovat tärkeä tekijä robotin tarkan toisto- sekä tarkkuuskyvyn saavuttamisessa. Robotiikassa anturit voidaan jakaa kahteen ryhmään. Robotin sisäisten toimintojen tilamuutoksia mittaaviin antureihin eli sisäisiin antureihin (proprioceptive sensors) ja ulkoisia muutoksia robotin ympäristössä mittaaviin antureihin, eli ulkoisiin antureihin (Exteroceptive sensors). Robotin sisäisiin tilamuutoksiin lukeutuu mm. nivelen asento, nopeus sekä vääntö (torque). Ulkoisten muutosten mittauksissa antureiden täytyy pystyä reagoimaan esimerkiksi voiman, etäisyyden, kosketuksen tai visuaalisen tiedon muutokseen (Sciavicco & Siciliano 2000, 307; Gupta ym. 2017, 441.)

Kuviossa 18 on etäisyysantureita, jotka tunnistavat metallisen kohteen etäisyyden (Ks. kuvio 18). Kyseisen valmistajan anturin tunnistamisetäisyys vaihtelee mallin mukaan yhdestä millimetristä aina 38 millimetriin asti. Anturi muuttaa signaalin tilaa, kun kohde on sen mittausalueen sisällä. (SICK 2022) Tällaisia antureita voidaan käyttää robotiikassa tunnistamaan esimerkiksi tarrattava kohde, kiinnittämällä se robotin tarttujaan. Kun tarttuja on tarpeeksi lähellä kohdetta, anturi tunnistaa kohteen ja antaa tarttujalle tiedon tarttua kiinni. Näin on varmennettu, että kappale todella on halutussa kohdassa suhteessa tarttujaan.



Kuvio 18. Etäisyysanturi metallikohteille (SICK 2022)

3.10 Ohjelmointi

Robotin ohjelmoinnissa tulee esille samat lainalaisuudet kuin perinteisessä ohjelmoinnissa. Niin kutsuttujen tehtävien suorittaminen tapahtuu reaaliajassa ja ne suoritetaan ilman viivästyksiä tai katkoksia ohjelmassa. Robotin suorittamaa ohjelmaa voi ajatella pisteinä avaruudessa, joihin sen nivelvarret pyrkivät yhteistoimin työkalua taivuttamaan. Näitä pisteitä on peräkkäin paljon ja työkalua ohjataan niiden sisältämiin koordinaatteihin ohjelmakierrossa olevilla käskyillä (Gupta ym. 2017, 478.)

Ohjelmoinnin tehtävänä on saada robotin toiminnot tapahtumaan sulavasti, ympäristön signaalien avustuksella. Jo ohjelmointivaiheessa on tärkeää määritellä robotin toiminta virhetilanteissa. (Robotiikka 1999, 78.) Robotti saadaan toteuttamaan ohjelmaa syöttämällä komennot sen ohjainyksikön muistiin. Nykyaikana robotin ohjelmointiin on useampia eri keinoja, joista yleisimmät ovat:

- johdattamalla ohjelmointi
- Opettamalla ohjelmointi (online)
- etäohjelmointi (offline). (Gupta ym. 2017, 478; Gurgul 2018, 158–159.)

Johdattamalla ohjelmointi

Ohjelmoinnin aikana robotin työkalua liikutetaan fyysisesti siihen tarttumalla. Tarttumalla työkaluun ja liikuttamalla se haluttuun sijaintiin, tallentaa robotti asentoantureidensa tilan, joiden avulla se kykenee laskemaan kyseisen siirtymän liikeradat. Tätä tallennettua liikerataa voidaan kutsua ohjelmassa, jonka avulla robottia käskytetään. Robotin liikeratojen opettamisvaiheessa käytetyllä nopeudella ei ole merkitystä vaan se voidaan määritellä erikseen ohjelmassa. (Gupta ym. 2017, 483; Miller 2017, 124–125.)

Opettamalla ohjelmointi (online)

Online-ohjelmoinnissa käyttäjä on robotin välittömässä läheisyydessä ja ohjelmoi robotin toimintoja käyttäen robotin omaa ohjainta, jota kutsutaan nimellä teach pendant (Ks. kuvio 19). Teach pendantilla ohjelmointi on selkeää sen helppokäyttöisen ohjelmointitavan ansiota. Robottia

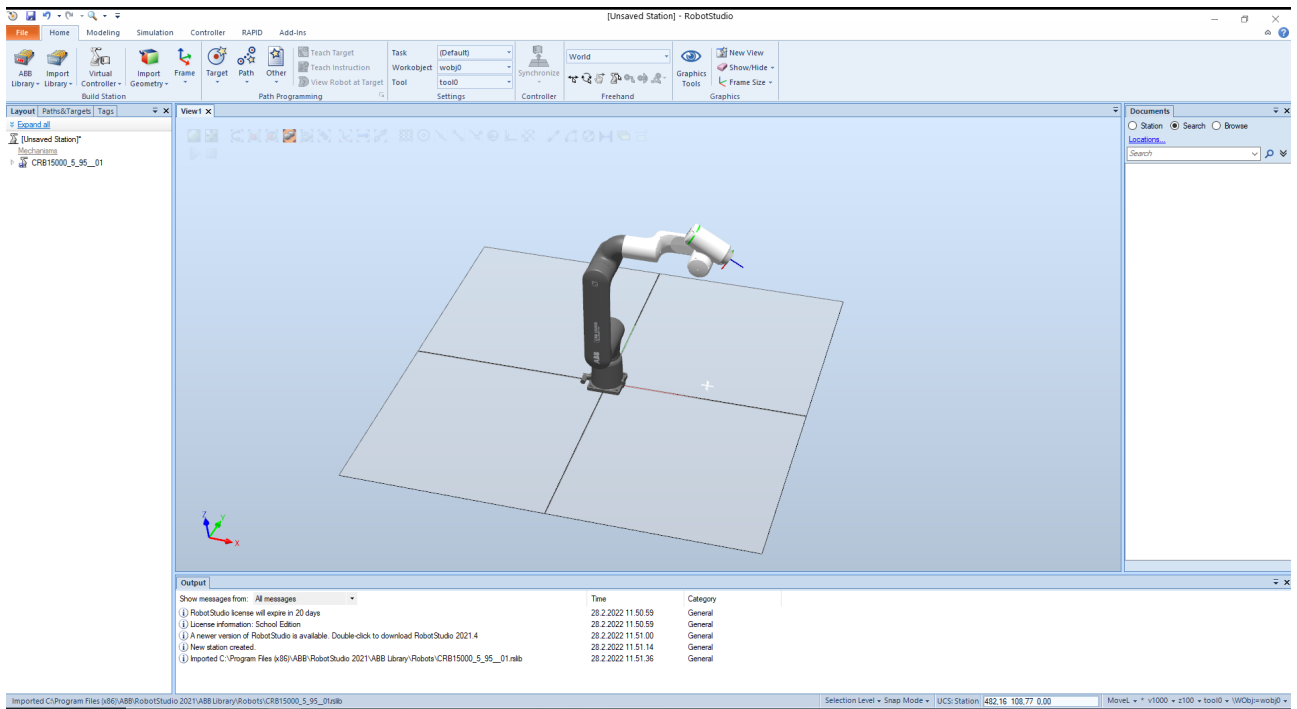
”kävelytetään” haluttuun sijaintiin painamalla painiketta teach pendatissa. Tämän jälkeen sijainti tallennetaan eli ”opetetaan” robotille, jolloin se generoi valmiin koodin siirtymiseen edellisestä opetetusta pisteestä uuteen pisteeseen. (Gupta ym. 2017, 479; Gurgul 2018 162; Miller 2017, 123.)



Kuvio 19. Esimerkki teachpendantista, ABB Flexpendant IRC5 (ABB, 2019)

Etäohjelmointi (offline)

Etäohjelmoinnilla tarkoitetaan robotin ohjelmointia mallipohjaiseen tietoon perustuen. Tämä tarkoittaa ohjelmointia ilman fyysistä robottia ja täysin tuotannon ulkopuolella olevalla erillisellä tietokoneella. Robotin ohjelmointi suoritetaan graafisessa 3D -ohjelmointiympäristössä (Ks. Kuvio 20). (Robotiikka 1999, 81). Ympäristö mahdollistaa robotin simuloinnin perustuen mallipohjaiseen dataan. Mallipohjaisen datan avulla saadaan simulointimallista täysin oikeaa robottia vastaava. Tällä tavoin ohjelma voidaan testata simuloimalla, ennen kuin se syötetään oikean robotin ohjausjärjestelmään. Simulointimallia testaamalla voidaan hyvissä ajoin selvittää mahdolliset ongelmakohdat ja säätää robotin liikenopeudet kohdilleen. Tämän vuoksi etäohjelmoinnilla voidaan lyhentää merkittävästi robotin tuotantokatkoksia. (Gurgul 2018, 163; Gupta ym. 2017, 485.)



Kuvio 20. ABB 3D-ohjelmointiympäristö, Robotstudio

4 Metallien pinnoitus

Metallien pinnoitusta voidaan perustella pinnoitteiden tuomilla lisäominaisuuksilla. Pinnoitteilla voidaan lisätä metallien käyttöikä, keventää rakennetta, parantaa ulkonäköä sekä saavuttaa sellaisia ominaisuuksia, joita metallilla ei olisi muutoin mahdollista olla. Pinnoitettu metalli käyttäytyy kuten siinä oleva pinnoite, kunnes pinnoitteeseen tulee vaurio tai sen pinta halkeaa jostain kohdasta. Tällöin materiaalin käyttäytyminen muuttuu, esimerkiksi korroosion suhteen. (Tunturi & Tunturi 1999, 8.) Työstökoneiden terille haluttuja ominaisuuksia voisi esimerkiksi olla Tunturin ja Tunturin (Tunturi & Tunturi 1999) ryhmittelemät syyt, kuten:

- Pintakovuuden lisääminen
- Kulutuksen ja repeilyn kesto
- Korjaus-, huolto-, ja kunnossapitokysymykset (Tunturi & Tunturi. 1999, 8).

4.1 Kaasufaasipinnoitus

Nimityksellä kaasufaasipinnoitus viitataan suureen joukkoon erilaisia pinnoitusmenetelmiä. Yhteistä näille menetelmille on se, että materiaali siirretään kappaleen pinnalle atomaarisilla tai molekylaarisilla prosesseilla kaasufaasista. Muodostustavan mukaan pinnoitteet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: kemialliset kaasufaasimenetelmät (CVD = Chemical Vapour Deposition) ja fysikaaliset kaasufaasimenetelmät (PVD = Physical Vapour Deposition). Näiden menetelmien erona on niiden tapa muodostaa pinnoite. CVD-menetelmä hyödyntää kemiallista reaktiota pinnoitemateriaalin siirrossa, kun taas PVD-menetelmässä käytetään ulkoista energian lähdettä siirtämään materiaali sellaisenaan kappaleen pinnalle. (Tunturi & Tunturi. 1999, 127)

Opinnäytetyössä käsiteltävien poranterien pinnoite on muodostettu fysikaalisella kaasufaasipinnoitusmenetelmällä. Tunturi ja Tunturi toteavatkin (Tunturi & Tunturi. 1999) fysikaalisten kaasufaasipinnoitteiden sopivan parhaiten pikaterästyökaluihin sekä muihin erilaisiin työkaluihin ja koneiden kulutusosiin. (Tunturi & Tunturi. 1999, 132.)

4.1.1 Fysikaalinen kaasufaasipinnoitus

Fysikaalisessa kaasufaasipinnoituksessa kappaleen pinnalle siirretään höyrytyksen avulla materiaalia atomien tai molekyylien muodossa. Siirto tapahtuu tyhjiön tai matalapaineisen

kaasumaisen ympäristön läpi. Fysikaalisella kaasufaasipinnoitteella saadaan luotua kappaleen pinnalle kalvo, jonka paksuus voi olla muutamasta nanometristä (nm) muutamiin mikrometreihin (μm). (Mattox 2010, 3.)

Fysikaalisissa pinnoitusmenetelmissä toimitaan alennetussa paineessa ja niitä nimitetään usein myös tyhjiöpinnoitusmenetelmiksi. Pinnoitteita voidaan muodostaa kaikista metalleista, niiden seoksista sekä muistakin materiaaleista, kuten keraameista tai muoveista. Alustamateriaaliksi eli pinnoitettavaksi materiaaliksi sopii mikä tahansa kiinteä materiaali kuten jo mainitut metalli, keraami, muovi tai vaikka paperi. Suurena etuna pidetään myös puhtaita käsittelyprosesseja, joka tarkoittaa, ettei pinnoitusprosessissa synny ympäristölle vaarallisia sivutuotteita. Tällöin ei ole tarvetta reaktiotuotteiden asianmukaiseen jälkikäsittelyyn tai hävittämiselle. (Tunturi & Tunturi. 1999, 128.)

Alustamateriaaleille voidaan muodostaa erilaisia yhdistepinnoitteita niitä lainkaan tai vähän kuumentaen. Tämän ollessa suotuisaa monille alustamateriaaleille aiheuttaa se kuitenkin poikkeavuutta pinnoitteissa, johtuen niiden muodostuksessa käytetyistä eri lämpötiloista. Matalissa lämpötiloissa muodostetut yhdistepinnoitteet sisältävät mikrohuokosia sekä suuria sisäisiä jännityksiä, mitkä vaikuttavat lopullisen pinnan laatuun. (Tunturi & Tunturi. 1999, 128.)

5 Hionta

Maaranen (2012) määrittelee hionnan olevan työstömenetelmä, jossa kappaleen pinnasta poistetaan ainetta lastuamalla. Useasti tällaiseen toimenpiteeseen käytetään pyörivää hiomalaikkaa. Hiomalaikan toiminta perustuu useiden pienien hiomajyvien muodostamaan pintaan. Nämä hiomajyvät kiinnittyvät toisiinsa ja laikkaan sidosaineen avulla. Kun laikka koskettaa kappaleen pintaa syöttöliikkeen johdosta, irrottavat hiomajyvät kappaleen pinnasta pieniä lastuja. (Maaranen 2012, 87.)

Loppukäsittelynä kappaleita voidaan myös rummuttaa tai ne voidaan laittaa täryttimeen. Rummutuksessa kappale laitetaan lieriön muotoiseen säiliöön yhdessä hiontajyvästen eli median kanssa. Lieriötä ei täytetä kokonaan, vaan sen toiminta perustuu pyöriksen aiheuttamaan median liikkumiseen. Kun lieriö pyörii, liikkuu media aina sen matalimpaan kohtaan. Sekaan upotettuun käsiteltävään kappaleeseen kohdistuu jatkuvasti törmäyksiä johtuen liikkuvan median

osumisesta siihen. Nämä törmäykset lastuavat kappaleesta jäysteitä eli pieniä lastuja pois. (Bralla 2007, 127.)

Täryttimen toiminta on lähellä rummutusta, median ollessa jatkuvassa liikkeessä värähtelyn ansiosta. Media sekä kappaleet ovat kulhon muotoisessa astiassa, joka on jousitettu. Astiaan siirretään iskuenergiaa, joka saa sen värähtelemään ja sopivalla taajuusalueella kulhon sisältö on jatkuvassa liikkeessä. (Tunturi 1994, 31.)

Tässä opinnäytetyössä kappaleen kiillotuksessa hyödynnetään samaa peruseriaatetta kuin rummutuksessa ja tärytyksessä, josta Bralla (2007) ja Tunturi (1994) kirjoittivat. Erona on astian avonaisuus ja sen horisontaalinen pyörimisliike.

6 Poranterien loppukiillotusprosessin robotisointi

Työ jaettiin kolmeen osa-alueeseen sen sisältäessä useampia pienempiä kokonaisuuksia. Ensimmäisenä aloitettiin määrittelemällä työhön sopiva robotti. Robotin valintaan liittyi myös tarttujan määrittely ja siihen liittyvän suunnittelun ja sen tarpeen tarkastelu.

Seuraavaksi omana kokonaisuutena rakennettiin kiillotusastia. Määrittelemällä ensiksi sen toimintaperiaate, voitiin aloittaa astian mekaanisen rungon rakentaminen. Suunnittelussa otettiin myös huomioon vaativuus suhteessa toiminnalliseen hyötyyn.

Kolmantena osa-alueena oli poranterätelineiden suunnittelu. Poranterän nostotyön ja siihen vaikuttavien tekijöiden ollessa opinnäytetyön keskeinen tutkittava kohde päädyttiin suunnittelemaan useampi erilainen teline ja näille suoritettiin samanlaiset toistettavat testit ja testitulokset kirjattiin ylös tarkastelua varten.

Osa-alueiden ollessa valmiita yhdistettiin ne yhdeksi isoksi kokonaisuudeksi. Kokonaisuuden vaatimuksina oli robotin riittävä etäisyys kiillotusastiaan sekä poranterätelineeseen. Kun etäisyydet olivat kunnossa, aloitettiin robotin käyttöönotto ja ohjelmointi kiillotustyötä varten.

Kiillotustyövaiheen testaamiseen oli toteutusvaiheessa käytössä toimeksiantajalta saatuja PVD-pinnoitettuja 100 millimetriä pitkiä ja halkaisijaltaan 10 millimetriä olevia kiinteitä tankoja valmiiden poranterien sijaan (Ks. Kuvio 21). Tähän syynä oli niiden saatavuus toimeksiantajalta sekä yhteinen oletus, että kiillotetun pinnan lopputuloksen tarkastelu onnistuisi paremmin, kun kiillotettavaa pintaa olisi enemmän. Tangot oli pinnoitettu noin puoliväliin niiden pituutta, sillä kiillotus suoritettiin noin 50 millimetriä tangon kärjestä kohti keskiosaa. Koko tankoa ei ole tarvetta kiillottaa, vain käytön kannalta oleellinen eli sen kärki. Sama pätee oikeiden poranterien kohdalla.



Kuvio 21. Puoliksi pinnoitettu testitanko 1

Tankoja oli kahdesta eri metalliseoksesta. Tankojen pinnanlaaduissa oletettiin olevan eroja metalliseostyypeistä johtuen, jolloin tuloksissa olisi mahdollisesti eroja. Testitankojen sekä medioiden koostumuksia ja ainesosia ei tässä opinnäytetyössä mainita toimeksiantajan toiveesta. Lisäksi tulosten tarkastelun kannalta ne eivät ole relevantteja muille kuin toimeksiantajalle. Testitankoihin viitataan myöhempänä numeroilla 1 ja 2. Medioiden osalta käytetään merkintää Hieno sekä Karkea, mikä viittaa median raekokoon.

6.1 Robotin valinta

Opinnäytetyön toteutusvaihe aloitettiin kartoittamalla sopivaa robottiratkaisua poranterien siirtotyön tekemiseen. Kyseisen työn pystyisi suorittamaan useammallakin erilaisella robotilla,

mutta päätöksessä otettiin huomioon aikaisemmin ilmi tulleet erot yhteistoimintarobottien ja teollisuusrobottien osalta. Käsiteltävä kappale on painoltaan kevyt eli alle 1 kilogramman painoinen ja robotin olisi tarkoitus työskennellä ihmisten läheisyydessä. Toimeksiantajan kiinnostus yhteistyörobotiikkaa kohtaan voidaan lukea yhdeksi vaikuttavaksi tekijäksi valintaan. Yhteistoimintarobotin helppo ja nopea ohjelmitavuus myös mahdollistavat sen käytön useampaan eri sovellutukseen yrityksessä.

Robottisovellus rakennettiin Jyväskylän ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa.

Yhteistoimintarobotiksi valittiin laboratoriossa sijaitseva Universal Robotsin UR 5 malli. Universal Robotsin valintaan vaikutti sen yleistyneisyys yhteistyörobotiikkasovellutuksissa.

Universal robots perustettiin vuonna 2005 ja sen tarkoituksena on saattaa robottiteknologiaa pienten ja keskisuurten yritysten saataville luomalla järkevän hintaisia, pieniä sekä joustavia yhteistyörobotteja, jotka mahdollistavat turvallisen työskentelyn niiden läheisyydessä. Yrityksen ensimmäinen yhteistyörobotti tuotiin markkinoille vuonna 2008. (Universal Robots history 2022) Universal robotsin STT viestintäpalvelussa (STT Viestintäpalvelut. 2021) julkaisemassa tiedotteessa yritys toteaa sen olevan kasvanut maailman suurimmaksi yhteistyörobottien valmistajaksi. Tämän lisäksi tiedotteessa nostetaan esille yrityksen lanseeraamaa koulutuspakettia, jolla he haluavat vahvistaa opettajien sekä opiskelijoiden robottitaitoja, jolloin opiskelijoille luodaan paremmat valmiudet työelämään. (STT Viestintäpalvelut 2021.) Näiden tietojen pohjalta voidaan todeta Universal robotsin valinnalle olleen selkeät perusteet, sen yleistyneisyyden vuoksi.

Universal robotsin UR 5 mallissa on 6 vapausakselia ja sen kantokyky on 5 kg. Ulottuvuudeksi valmistaja ilmoittaa 850 mm ja toistotarkkuuden ollessa +/- 0.1 mm (Universal Robots 2016.) Näiden tietojen perusteella pystyttiin toteamaan UR 5 robotin olevan riittävä kyseiseen sovellutukseen myös teknisten ominaisuuksiensa puolesta.

6.2 Työkalusuunnittelu

Poranterien mittojen vaihtelu pituuden ja paksuuden osalta otettiin huomioon työkalun suunnittelussa ja valinnassa. Tarvittiin työkalu, joka pystyy tarttumaan luotettavasti sylinterimäisen muotoisiin poranteriin. Muita vaatimuksia työkalulle oli kappaleesta tarttumisen varmentaminen sekä tarttujan sormenpäiden muokattavuus.

Tarttumisen varmentamiseen tarvitaan tilatieto, onko tarttuja kokonaan kiinni vai onko sen sormenpäiden välissä kappale. Tätä voitaisiin indikoida esimerkiksi tarttujassa olevalla voima-anturilla, joka tunnistaisi voiman avulla onko tarttujan sormien välissä kappale. Sormenpäitä muokkaamalla pystytään testaamalla selvittämään, minkä muotoiset sormenpäät olisivat sopivimmat, kun otetaan huomioon poranterien vaihteleva halkaisija.

UR 5 robotissa valmiiksi kiinnitettynä olleen Robotiq 2F-85 (Ks. Kuvio 22) tarttujan sormenpäiden malli osoittautui testausvaiheessa sopivaksi niiden pinnassa olleen pehmeän kumipinnan ansiosta. Tarttujan puristusvoiman ollessa maksimissa, paksummistakin poranteristä saatiin tartuttua tiukasti kiinni. Tästä syystä ei koettu tarvetta suunnitella uusia sormenpäitä tarttujaan.



Kuvio 22. Robotiq 2F-85 tarttuja

6.3 Kokonaisuuden rakentaminen

6.3.1 Kiillotusastia

Testausympäristön rakentaminen edellytti kiillotusastian suunnittelun. Suunnitteluvaiheessa mietittiin useita eri vaihtoehtoja, kuten värähtelyyn perustuvaa tärymaljaa. Tämä kyseinen kiillotusperiaate olisi vaatinut syvempää perehtymistä tärymaljan rakentamisen perusedellytyksiin,

kuten värähtelyyn ja sen riittävään kompensointiin. Todettiin, että tämän opinnäytetyön kannalta on järkevämpi rajata kiillotus-astian toiminta yksinkertaisempaan toteutukseen, sillä opinnäytetyön pääaiheena on robotin soveltuvuuden selvitys itse siirto-operaatioon, ei kiillotusmenetelmän optimointi. Näistä syistä päädyttiin rakentamaan oikosulkumoottorilla pyöritettävä kiillotus-astia. Tällä tavoin mediaastian sisällä saadaan liikkumaan sekä kiillottamaan siellä pidettävää kappaletta.

Kiillotusastian rakentaminen aloitettiin valitsemalla oikosulkumoottori ja siihen sopiva taajuusmuuttaja. Astialle rakennettiin taso käyttäen alumiiniprofiileja sekä 3D-tulostamalla laakeripesä. Moottori kiinnitettiin akselistaan astian pohjaan kiinni. Astian paino jaettiin laakerin avulla keuhkon rungolle, jolloin se ei kohdistunut moottorin akselin päähän. Tällä tavoin vähennettiin moottorin akseliin kohdistuvaa rasitusta. Kehikkoon asennettiin median ohjausrauta, jonka tehtävänä oli tasoittaa testitangon syrjäyttämää ja sen johdosta astian reunoille siirtynyttä mediaa. (Ks. Kuvio 23).

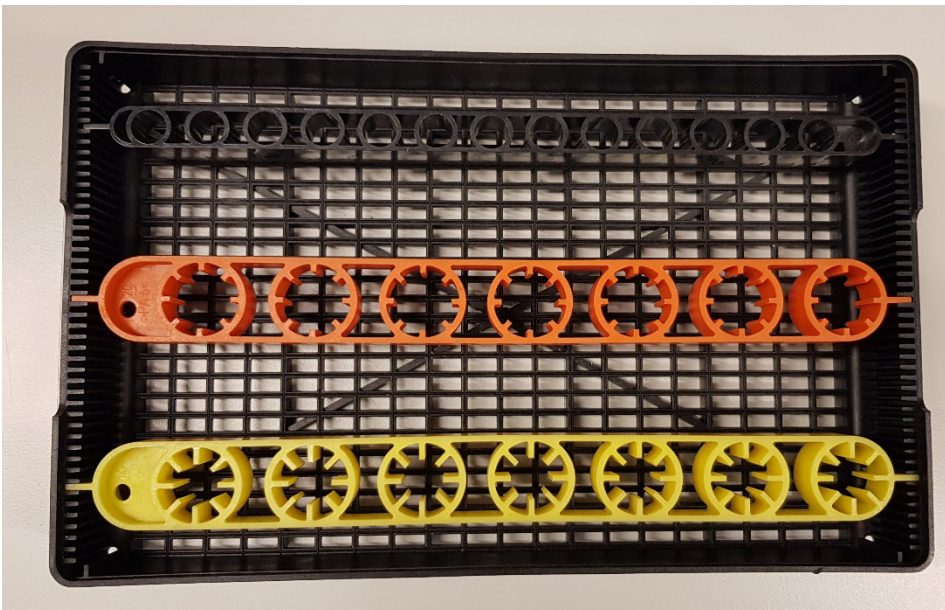


Kuvio 23. Kiillotusastiakokonaisuus

6.3.2 Poranterätelineet

Poranterien nostaminen robotin tarttujalla oli ensimmäinen haastava työvaihe robotin toiminnassa. Vääränlaisessa telineessä olevat poranterät saattoivat nostovaiheessa tarttua telineeseen kiinni ja johtaa joko telineen siirtymiseen tai robotin ilmoitukseen häiriöstä, sen voima-anturin havaitessa liiallista vastustusta. Tätä varten suunniteltiin ja testattiin erilaisia telineitä, joihin poranterät olisi laitettu ennen niiden siirtämistä seuraavaan vaiheeseen eli kiillotukseen. Telineitä tehtiin kolme erilaista, joista yksi oli valmiina oleva tavallinen teollisuustyyppinen poranteräteline. Kaksi muuta telinettä suunniteltiin itse ja niissä pyrittiin erilaisiin lähestymistapoihin verrattuna ensimmäiseen telineeseen.

Ensimmäisessä telineessä ei ollut mahdollista vaikuttaa poranterien upotussyvyyteen sen ollessa valmiiksi muotoiltu yleiskäyttöiseksi. Telineessä oli irrotettavia reikäkiskoja, jotka sisälsivät aina yhdellä halkaisijalla olevia uritettuja reikiä (Ks. Kuvio 24).



Kuvio 24. Tehdasvalmisteinen poranteräteline

Seuraavassa prototyyppissä lähdettiin testaamaan poranterän nostoa kiinteäreunaisesta reiästä. Testitelineeseen tehtiin myös erilaisilla halkaisijoilla olevia reikiä (Ks. Kuvio 25). Tällä testattiin miten erilaiset välykset poranterän ympärillä vaikuttivat nostettavuuteen. Esimerkiksi kuvion 25 kolme suurinta reikää ovat halkisijaltaan noin 20.3, 21.0 ja 21.5 millimetriä, johtuen 3D-

tulostamisen tarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Näiden reikien tarkoitus oli osoittaa testissä, miten halkaisijaltaan 20 mm poranterä käyttäytyi nostettaessa niistä.



Kuvio 25. Teline kiinteäreunaisilla rei'illä

Kolmas poranterätelineen prototyyppi sisälsi erilaisen lähestymistavan poranterän nostamiseen. Tässä telineessä poranterät olivat kaltevalla pinnalla, jonka kulma oli noin 30 asteen suhteessa pöytälevyyn (Ks. Kuvio 26). Pintalevyssä oli kaarevia muotoja, joiden tarkoituksena oli pitää yksittäiset poranterät irti toisistaan. Poranterä asettui kaarevan muodon pohjalle, riippumatta poranterän paksuudesta. Kaltevan pinnan alaosaan leikattiin aukko, jotta robotin tarttuja pystyi tarttumaan poranterästä kiinni.



Kuvio 26. Kalteva poranteräteline

6.3.3 Robotin asema ja ohjelmointi

Yhteistyörobotti asemoitiin pöytätasolle siten, että sen ulottuvuus riitti noutamaan poranterän ja asettamaan sen kiillotusastiaan. Asemoinnissa pyrittiin mahdollisimman yksinkertaisiin liikeratoihin, mikä osoittautui helpoksi kiillotusastian sijainnin ollessa matalammalla kuin pöytätasolla oleva robotti (Ks. Kuvio 27). Robotti pystyi nostamaan testitangon telineestä ja hieman sivuttaissuuntaisella kiertoliikkeellä laskemaan sen kiillotusastiaan.



Kuvio 27. Robottisolukokonaisuus

Yhteistyörobotti UR5:n liikeradat ohjelmoitiin pääasiassa johdattamalla. Ohjelman tekovaiheessa erityistä huomiota kiinnitettiin nostovaiheen lähestymiseen ja tarttumisen jälkeiseen nostotyöhön, jotta poranterä saatiin poranterätelineestä pois. Nämä liikkeet tehtiin lineaarisella liikeradalla,

mikä pakottaa robotin liikkumaan lineaariliikkeen mukaisesti (Move L) (Ks. Liite 1). Useimpien siirtymäliikkeiden osalta käytettiin robotin nivelien liikeratoja (Move J), jotka puolestaan eivät ota kantaa siihen, miten robotti liikuttaa työkalua asetettuun pisteeseen. Lineaarinen robotin liike mahdollisti tarkan lähestymisen kohti poranterää sekä nostotyön suoraan ylöspäin, jotta poranterä nousi kokonaan pois telineestä.

Ohjelmassa tarkasteltiin lisäksi, onko testitangosta saatu kiinni. Tarkastelu löytyy riviltä 11 (Ks. Liite 1), jossa varmistetaan tarttujan voima-anturin avulla, onko sen sormien välissä kohdetta. Mikäli kohdetta ei ole, palataan takaisin aloituspisteeseen.

Yhteistyörobotti UR5 ohjelmoitiin tarttumaan testitangosta noin 50 millimetriä kärjestä keskikohdan suuntaan, laskemaan tangon kiillotusastiaan ja kääntelemään 3 eri kulman välillä. Tämä suoritetaan itsenäisenä ohjelmakiertona (Loop), käyttäjän syöttämän määrän verran (Ks. Liite 1). Tangon kääntelevä eri kulmiin pyrki estämään median pakkautumisen tangon etuosaan, vasten pyörivää mediaa. Puolessa välissä määritettyä aikaa, vaihdettiin moottorin pyörimissuuntaa, jolloin poranterän toinenkin puoli vastustaisi median liikettä ja näin sen pinta kiillottuisi.

6.4 Kuvausympäristön rakentaminen

Kiillotusosuuden tuloksien määrittelemistä varten selvitettiin olisiko pinnoitteen pinnanlaatua mahdollista tutkia mittalaitteella. Yleensä vastaavanlaisten kappaleiden pinnanlaatua mitataan kvantitatiivisesti optisilla profilometreillä. Tällaista mittaria ei Jyväskylän ammattikorkeakoululla kuitenkaan ollut. (Sundelin 2022). Lisäksi ongelmana pinnanlaadun tarkastelussa on referenssiarvojen puute. Ei ole tiedossa, millainen pinnanlaatuarvo olisi sopiva, koska sitä ei aikaisemmin ole mitattu.

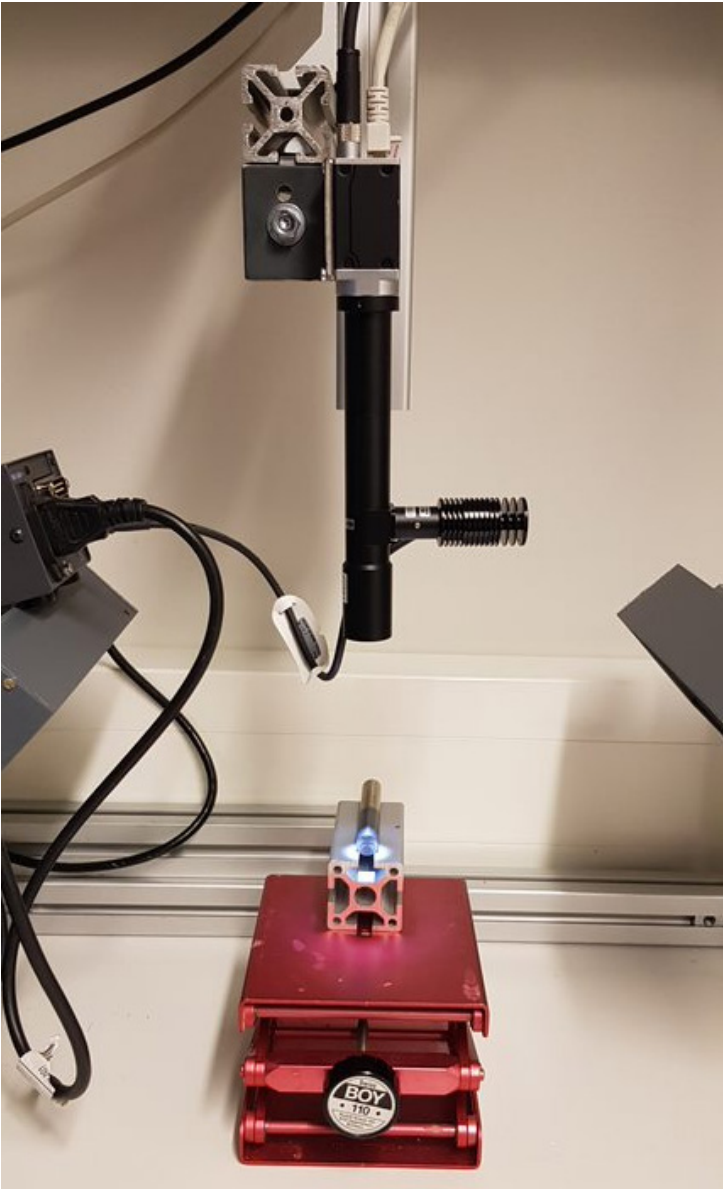
Aiheesta löytyi hyvin vähän teoretietoa siitä millaisella mittarilla pintaa pystyisi mittamaan. Ottaen huomioon vähäisen teoretiedon ja yllä mainitun laitteistokannan puutteen, päädyttiin miettimään muita tapoja tulosten todentamiseen. Erilaisten mittalaitteiden testaus ja selvitystyö sopivan tavan löytämiseksi kyseiseen mittaukseen olisi ollut liian työlästä ja suurentanut opinnäytetyötä kohtuuttoman suureksi.

Lopulliseksi kiillotusjäljen todentamistavaksi valittiin tankojen kuvaaminen. Tarkoituksena oli tarkastella testitangon pinnan heijastuvuutta. Heijastuvuuden oletettiin ilmenevän kuvissa vaaleampana pintana kuin vähemmän heijastava pinta.

Tähän käytettiin JAMKilla ollutta Basler Ace 2 kameraa ja Moritexin valmistamaa tarkkuusobjektiivia MML6-HR110D. Objektiivin ansiosta kameran syväterävyysalueeksi (Depth of field) saatiin 0.08 millimetriä. (Basler 2022; Moritex 2022.) Syvyysterävyysalue on syvyysuuntainen alue, jossa kohteet ovat tarkentuneita (Reikkinen n.d). Objektiivin avulla kamera pystyy tarkentamaan 0.08 millimetrien eroavaisuudet pinnan muodossa. Toisin sanoen tällä tarkkuudella pyrittiin samaan esille kappaleen pinnan heijastuksiin liittyviä eroja.

Objektiivissa oli lisäksi integroituna LED valonlähde, mikä näkyy objektiivissa oikealle suuntautuneena ulokkeena (Ks. Kuvio 28). Valonlähteen ollessa objektiivin sisällä, valonsäteet korostivat kohtia jotka sirottavat valoa useaan suuntaan, tätä kutsutaan dark field valaistusgeometriaksi (Reikkinen n.d). Tämä valaistusgeometria sopi kaarevan pinnan tarkasteluun sen heijastaessa valoa aina molemmille puolille. Lisäksi valittu geometria helpotti kappaleiden asettelua, kun kuvaus tapahtui aina suoraan ylhäältäpäin.

Kuvausympäristön rakentamisessa otettiin huomioon toistettavuus, jotta jokaisen kuvauksen lähtökohdat olisivat samat. Pöytään asennettiin hienosäädettävä nostotaso, jonka päällä oli alumiiniprofiili jonka hahlot osoittautuivat juuri sopiviksi tankojen istuvuuden kannalta. Kun tarvittavat säädöt kameran tarkentamiseksi oli tehty, ei niihin enää koskettu. Valaistus pidettiin samana kaikkien testien ajan. Näillä tavoin pyrittiin vähentämään kuvaustuloksiin liittyviä epätarkkuuksia valaistukseen ja kuvanlaatuun liittyen. Kuvausympäristössä kuvattiin (Ks. Kuvio 28) testitankoja ennen ja jälkeen hionnan.



Kuvio 28. Kuvausympäristö, Baslerin kamera sekä Moritexin objektiivi

7 Tulokset

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella yhteistoimintarobotin soveltuvuutta poranterien kiillotustyövaiheeseen. Tätä arvioitiin robotin kyvykkyydellä nostaa poranterä telineestä. Tässä osiossa tarkastellaan nostotyövaiheen testausta ja tuloksia sekä opinnäytetyön toisena tavoitteena olleen kiillotuksen lopputulokseen vaikuttavia tekijöitä. Ensiksi tutustutaan robotin nostotyön tuloksiin, jonka jälkeen tarkastellaan erilaisten medioiden, tankomateriaalien, ajan sekä pyörimisnopeuden vaikutuksia kiillotukseen ja lopputuloksena olevan testitangon pinnan oletetun heijastuvuuden muutoksiin.

Nostotyö

Poranterätelineiden toiminnallisuuden kannalta arviointiin poranterän nostotyön onnistumista (Ks. Taulukko 1). Lisäksi suoritettiin aistinvaraista arviointia, kuten kuuluiko terää nostaessa ääntä tai oliko nostovaiheessa havaittavissa muita poikkeavia tilanteita. Jotta tämä testivaihe olisi käytännöllinen käytettiin nostotyössä oikeaa poranterää. Arvioitavana poranteränä oli halkaisijaltaan 20 mm poranterä, sen ollessa suurin saatavilla ollut poranterä ja näin ollen myös painavin. Sen nostaminen robotin tarttujalla oli siis haasteellisinta.

Onnistumiseksi laskettiin, kun yhteistyörobotti UR5 sai nostettua tarttujan avulla poranterän telineestä ilman poranterän tarrautumista telineen reiän reunoihin siten, että se aiheuttaisi robotin joutumisen virhetilaan. Onnistumiset kirjattiin ylös kunkin telineen kohdalla taulukkoon, jossa laskettiin 10 toiston keskiarvo (Ks. Taulukko 1). Tulokset kirjattiin seuraavasti: Nostotyön onnistuminen merkattiin numerolla 1 ja epäonnistuminen numerolla 0. Nostotyön onnistumisten keskiarvon perusteella voitiin tarkastella telineiden sopivuutta poranterien pidikkeiksi. Taulukosta 1 huomataan, että nostotyöt onnistuivat verrattain hyvin jokaisella telineellä.

Taulukko 1. Poranterätelineiden onnistumisten keskiarvot

Poranterätelineet	tehdasmalli	3D-tulostettu			Kaltevapeti
		20.3 mm	21.0 mm	21.5 mm	
Nosto 1	1	1	1	1	1
Nosto 2	1	1	1	1	1
Nosto 3	1	1	1	1	1
Nosto 4	1	1	1	1	1
Nosto 5	1	1	1	1	1
Nosto 6	1	1	1	1	1
Nosto 7	1	1	1	1	1
Nosto 8	1	1	1	1	1
Nosto 9	1	1	1	1	1
Nosto 10	1	0	1	1	1
Onnistumisten keskiarvo	100,00 %	90,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

Jokaisen telineen kohdalla huomattiin poikkeuksia. Ensimmäisessä eli tehdasmallisessa telineessä poranterät raapivat uria vasten sekä kääntyivät eri asentoihin, johtuen todennäköisesti uritetun

reiän väljyydestä verrattuna poranterän halkaisijaan. Huomioitiin myös, että valmiin terätelineen poranterille tarkoitetut reiät ovat liian lähellä toisiaan, jotta poranteriä voitaisiin nostaa robotin tarttujalla, olettaen kaikissa olevan poranterä odottamassa nostoa. Poranterien kääntyileminen ja raapiminen eivät kuitenkaan vaikuttaneet niin suuresti, että yksikään nosto olisi epäonnistunut.

Toisen telineen ensimmäisen reiän (20.3 mm) ollessa hyvin lähellä testattavan poranterän halkaisijaa huomattiin, että terä tarrautui samaan tapaan kiinni kuin edellisessä testitelineessä tapahtui. Tämä aiheutti raapimista reiän reunoja vasten jopa niin paljon, että viimeinen nosto epäonnistui robotin voima-anturin ilmoittaessa liiallisesta väännöstä. Seuraavan reiän (21.0 mm) kohdalla tulokset olivat jo lupaavampia. Tämän reiän kohdalla poranterän nostovaiheen testaus toimi jokaisella kerralla, kuitenkin ajoittaista lievää tarrautumista oli havaittavissa (Ks. Taulukko 1).

21.5 millimetrin halkaisijaltaan olleen reiän väljyys taas alkoi vaikuttamaan robotin tartuntatyöhön. Poranterästä saatiin kiinni, mutta reiän väljyydestä johtuen tartunta ei ollut optimaalinen, vaikka poranterä saatiinkin nostettua. Reiän väljyys antoi poranterälle paljon liikkumavaraa, mahdollistaen kallistumisen mihin vain. Keskimmäisen, 21.0 millimetriä halkaisijaltaan olleen reiän tulokset aiheuttivat vähiten hankausta ja ääntä 3D-tulostetun porantelineen reikien kohdalla.

Kaltevapintaisen poranterätelineen kanssa oli eniten asemointiin liittyviä haasteita. Tämä johtui telineen suunnittelusta ja telineessä käytetyistä materiaaleista. Telineen pintana käytetty muovi antoi periksi ja taipui alhaalta, mikä vaikutti poranterän kulmaan suhteessa pöytälevyyn. Positiivisena merkinä oli kuitenkin se, että poranterien nostot onnistuivat huolimatta telineen joustavasta rakenteesta. Ääntä ei juurikaan telineestä noston yhteydessä syntynyt.

Poranterien nostotyövaiheen onnistumisprosentteista voidaan päätellä yhteistyörobotin sopivan kyseisen tehtävän suorittamiseen. Lisäksi huomattiin, että poranterän nostaminen onnistuu monenlaisista telineistä. Tämä tuo vapauksia lopullisen poranterätelineen suunnitteluun.

Loppukiillotus

Kiillotuksessa käytettiin kahta erilaista opinnäytetyön toimeksiantajan toimittamaa mediaa. Näiden medioiden koostumukset erosivat toisistaan niissä käytettyjen raaka-aineiden osalta. Kahden erityyppisen median avulla pyrittiin selvittämään median vaikutusta loppukiillotus tulokseen. Testeissä oli lisäksi käytössä kahta erilaista metalliseosta olevaa pinnoitettua pyörötankoa. Pyörötankoja testattiin eri ajanjaksoilla ja nopeuksilla molemmilla medioilla, jotta saatiin kerättyä kattava testiaineisto.

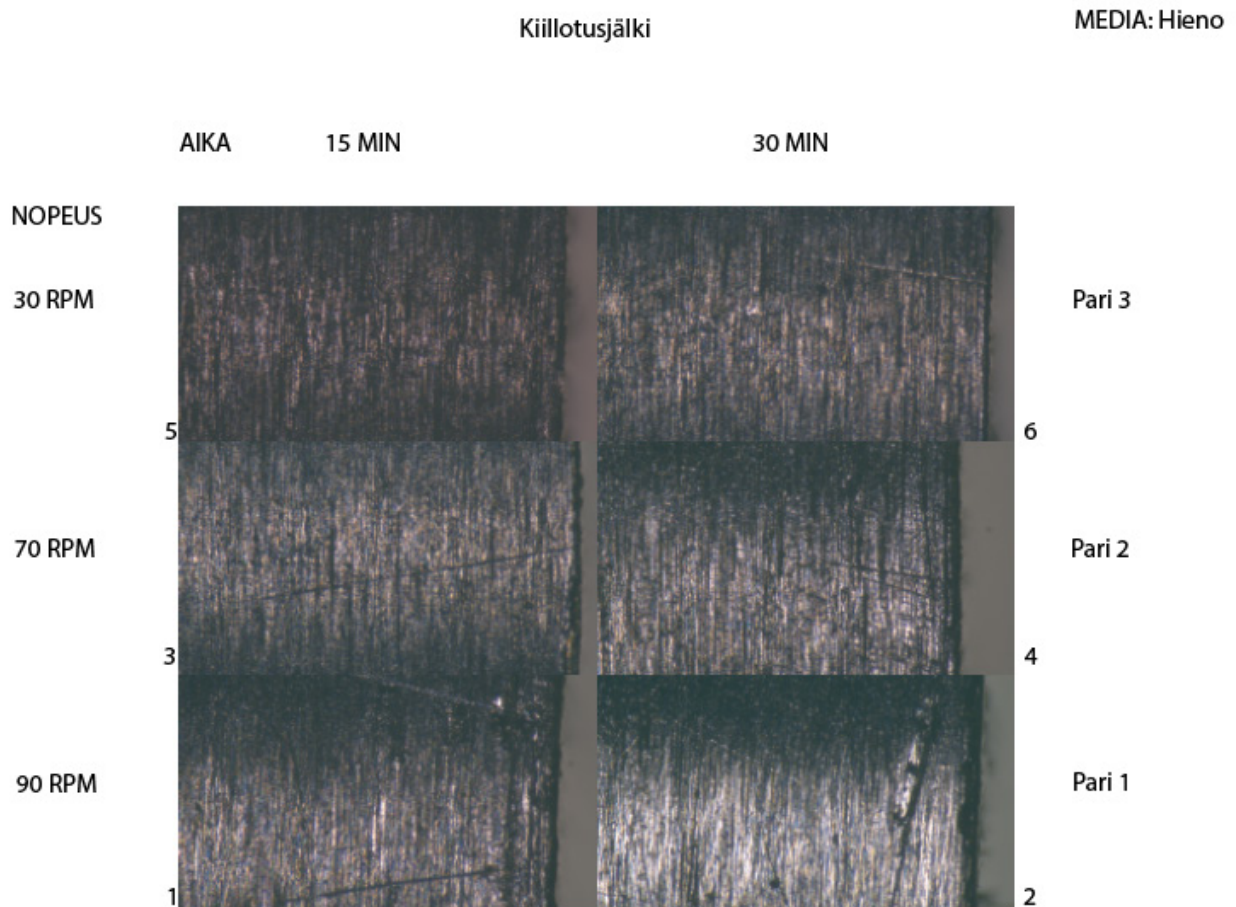
Testejä suoritettiin yhteensä 24 kertaa. Kiillotusastian nopeuksina käytettiin 90, 70 ja 30 kierrosta minuutissa. Nämä nopeudet valikoituivat sen vuoksi, että 70 kierrosta minuutissa arveltiin vastaavan lähelle toimeksiantajan nykyisen laitteen pyörimisnopeutta. 90 ja 30 kierroksella minuutissa pyrittiin saavuttamaan eroavaisuuksia verrattuna 70 kierrosta minuutissa olevaan nopeuteen.

Jokaisella nopeudella tehtiin kahden eri ajan pituinen kiillotus. Joka ajalla ja nopeudella oli käytössä oma testitanko, joka kuvattiin ennen ja jälkeen kiillotuksen. Testitangot jaettiin pareiksi selkeyttämään niiden raportointia ja analysointia. Parin molemmilla testitangoilla oli sama media sekä nopeus, vain aika oli eri. Parien testiajat olivat 15 minuuttia ja 30 minuuttia. (Ks. Liite 2)

Jotta tuloksesta saataisiin mahdollisimman tasainen, käännettiin kiillotusastian pyörimissuunta puolivälissä testiaikaa. Tämän lisäksi robotti oli ohjelmoitu kääntelemään testitankoja kolmeen eri kulmaan, jotta median virtaus testitankoa vasten muuttuisi jatkuvasti. Tällä pyrittiin estämään mahdollinen median pakkautuminen keskelle tankoa, joka vaikuttaisi olennaisesti lopputulokseen heikentäessä kiillotustulosta. Kaikki testit suoritettiin samalla robottiohjelmalla, mikä on kirjattu liitteen 2 "Kierto"-sarakeeseen tekstillä "3 asema kulma".

Testaaminen aloitettiin hienolla medialla, testitankotyyppillä 1 ja nopeudella 90 kierrosta minuutissa. Seuraavaksi testattiin eri nopeuksia kuten 70 ja 30 kierrosta minuutissa pyörivän kiillotusastian vaikutusta testitankojen pinnan heijastukseen. Kaikkia nopeuksia käytettiin molemmilla testiajoilla. Testit toistettiin käyttämällä karkeaa mediaa. Samat testit suoritettiin myös testitankotyyppille 2 (Ks. Liite 3). Ensimmäisten testien tulokset kirjattiin havainnollistavaan taulukkoon (Ks. Taulukko 2).

Taulukko 2. Kiillotustulokset hienolla medialla ja tankotyypillä yksi


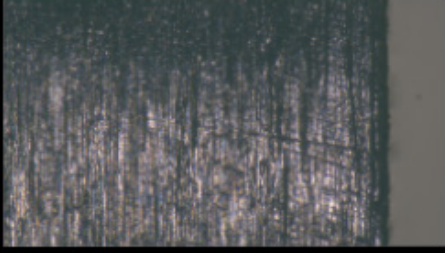



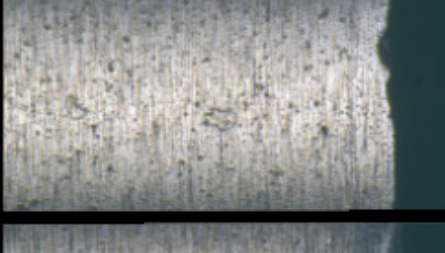




Taulukkoa 2 tarkastelemalla huomataan, että selkeästi vaalein pinta on saavutettu suurimmalla nopeudella ja pisimmällä ajalla. Vähiten vaalein pinta löytyy taas taulukon 2 vasemmasta yläkulmasta nopeuden ja ajan ollessa pienimmät.

Testattavana olleiden eri tankojen ja medioiden vaikutuksista keskenään luotiin liitteen 3 kuvista koonti tarkastelua varten. Tähän otettiin "ennen ja jälkeen"-tulokset molemmilla tangoilla sekä medioilla, kiillotusajan ollessa 30 minuuttia ja nopeuden 70 kierrosta minuutissa (Ks. Taulukko 3). Taulukosta 3 voidaan päätellä karkean median vaikuttavan vähemmän pinnan heijastuvuuteen tankojen pintojen ollessa tummempia riippumatta tankojen materiaalista.

Taulukko 3. Yhteenveto eri tangoista samalla ajalla sekä nopeudella

Tangot kuvattuna ennen ja jälkeen samalla nopeudella ja ajalla sekä molemmilla medioilla.

Tanko	Nopeus 70 kierrosta minuutissa Aika 30 minuuttia		MEDIA
	Ennen	Jälkeen	
1 Tankonumero 4			Hieno
1 Tankonumero 10			Karkea
2 Tankonumero 4			Hieno
2 Tankonumero 10			Karkea

7.1 Johtopäätökset

Opinnäytetyössä arvioitiin kahden erilaisen testin tuloksia. Tavoitteena oli selvittää, soveltuuko yhteistyörobotti kiillotustyövaiheen suorittamiseen. Toisena tavoitteena oli tarkastella kiillotusjälkeä, kun aikaa, nopeutta ja materiaaleja muutettiin. Nostotyön sekä loppukiillotustestien muodostaman kokonaisuuden tuloksista voidaan tehdä seuraavanlaisia johtopäätöksiä:

Poranterätelineiden suunnittelua voi onnistumisten perusteella pitää monipuolisena ja vapaana, sillä melkein jokainen nostotesti onnistui. Ainoastaan telineen reiän liian pienellä välyksellä nähtiin nostotyön estävä vaikutus. Tämä voi tarjota mahdollisuuksia ja joustavuutta robottisolun suunnittelussa ja asemoinnissa, kun poranterien tarttumiseen ei ainakaan testattujen telineiden kohdalla vaadittu erityisen tarkkaa asemointia.

Kiillotuksen osalta kokonaisuus luo mahdollisuuden toistettavalle kiillotusprosessille, mitä voidaan muokata tarpeen mukaan muuttamalla aikaa, nopeutta tai median rakennetta. Lisäksi robotin nopea ja yksinkertainen ohjelmoitavuus ovat omiaan lisäämään uusia kiillotustapoja. Tämä mahdollistaisi tulevaisuudessa robotin yksilöityjen toimintaohjelmien käytön erilaisille poranterille.

Loppukiillotustuloksien ollessa tässä opinnäytetyössä visuaalisia, on niiden arvioiminen haastavaa. Tuloksista voidaan huomata, että ajalla on merkitystä, jos tarkastellaan silmämääräisesti vaaleahkon pinnan määrää ennen ja jälkeen kiillotuksen otetuissa kuvissa. Tästä voidaan päätellä, että todennäköisesti muutosta testitankojen pinnassa on tapahtunut. Se onko muutos pinnassa riittävää tai jopa liian suurta, ei pystytä sanomaan ilman käytännön testejä tai oikeanlaisia testilaitteita.

Kiillotustuloksien perusteella, pienin muutos pinnan heijastuksessa tapahtui yleisesti 30 kierrosta minuutissa pyörivällä nopeudella kaikilla medioilla ja testitangoilla. Monissa tapauksissa nopeuden ollessa 90 kierrosta minuutissa pinnasta tuli hyvin vaalea ja sitä onko pinta tässä tapauksessa kiillottunut tarpeettoman paljon ei pystytty visuaalisella tarkastelulla sanomaan.

Ajan merkitys kiillotetun pinnan oletettuun heijastuvuuteen oli nähtävissä. Monien tankojen kohdalla muutos oli vähäinen, kun testausaika oli 15 minuuttia, varsinkin nopeuden ollessa 90 kierrosta minuutissa eron eri kiillotusaikojen välillä näkee. Tulosten pohjalta voisi arvioida 30 minuutin olevan lähempänä haluttua lopputulosta, tällä kiillotusajalla ainakin saatiin nähtäviä eroja aikaan melkein kaikilla testaustavoilla. Tämä voisi viitata siihen, että pintakin on kiillottunut enemmän.

Kuitenkin täytyy huomioida, että loppukiillotuksen tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, eli ne luovat hyvät lähtökohdat myöhempiä testejä varten. Tulosten toistettavuutta voidaan

kyseenalaistaa kuvausympäristön vaikutuksilla. Vaikka opinnäytetyötä varten rakennetussa kuvausympäristössä pyrittiin pitämään valonlähteet vakioina, pinnan heijastuksiin voivat vaikuttaa ulkoisten valonlähteiden luomat valonsäteet, mitkä mahdollisesti vääristävät tai muuntavat tuloksia. Kuitenkin testiparametreja muuttamalla vaikutukset olivat kuitenkin samansuuntaisia oletettuun kiiltoon tässä opinnäytetyössä. Tämän perusteella voidaan olettaa kuvausympäristön olleen riittävän luotettava.

8 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää yhteistoimintarobotin soveltuvuutta poranterien loppukiillotusprosessin suorittamisessa. Toisena tavoitteena oli tarkastella kiillotusjälkeä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Yhteistoimintarobotin valintaan vaikutti toimeksiantajan kiinnostus kyseisen robotin monikäyttöisyyden tuomat edut. Tietoperustaan sisällytettiin reilusti teollisuusrobotiikkaa ja niihin kuuluvia lainalaisuuksia, sillä yhteistoimintarobottikin on teollisuusrobotti.

Tietoperustassa tuotiin esille yhteistoiminta- ja perinteisen teollisuusrobotiikan erot, jonka avulla voitiin varmistua yhteistoimintarobotin sopivuudesta kyseiseen tehtävään ja sen mahdollisesti muuttuvaan työympäristöön.

Tämän opinnäytetyön ei ollut tarkoitus syvällisemmin verrata yhteistoiminta- ja teollisuusrobottien eroja ja tämän pohjalta etsiä tehokkain robotti kyseiseen työtehtävään. Tehtävän hoitamiseen sopisi todennäköisesti useampi erilainen robotti, mutta yhteistoimintarobotin tuoma mahdollisuus turvalliseen toimintaan ihmisten läheisyydessä ilman suoja-aitauksia sekä mahdollisesti sen käyttö tulevaisuudessa muihin työtehtäviin oli omiaan vahvistamaan sen valintaa tehtävään. Lisäksi tarkastellessa yhteistyörobottien yleistyneisyyttä ja kasvavia tuotantomääriä on nähtävissä selkeä trendi niiden käyttöön liittyen. Tämänkin vuoksi on perusteltua käyttää yhteistoiminta robottia kyseiseen tehtävään.

Turvallisuuteen liittyvät tekijät rajattiin ulos tämän opinnäytetyön aihepiiristä, sillä turvallisuutta arvioitaessa täytyy olla selvillä millaisessa toimintaympäristössä robotti operoi. Opinnäytetyön työtehtävän kaltaisessa työvaiheen suorittamisessa pitäisi miettiä tarkkaan, robotin liikeradat, sillä robotin pidellessä terävää poranterää ja sitä samanaikaisesti liikuttaen ei se todennäköisesti täyttäisi kaikkia turvavaatimuksia.

Opinnäytetyön haasteellisimpana osuutena oli loppukiillotuksen tulosten raportointi ja mittaustavan selvittäminen ja selvitysten pohjalta saatujen tietojen avulla päätöksen tekeminen. Tietämystä pinnoitteiden osalta kasvatettiin opinnäytetyön tekijän osalta suuresti. Kuitenkin kappaleen pyöreä malli ja sen pinnantarkasteluun liittyvä vaillinainen tieto mittaustavasta, saivat etsimään vaihtoehtoisia tuloksien raportointitapoja. Työn aikana tuli selväksi, että pelkästään pinnanlaadun tarkastelu on jo aihealueena niin laaja, että sen tekemiseen vaadittaisiin reilusti työtunteja.

Työtä voidaan pitää laajana sen sisältäessä useamman eri osa-alueen. Kaikkien näiden kehittäminen samaan aikaan vaati omistautumista ja rutkasti työtunteja. Varsinkin kiillotusastian 3D tulostetun laakeripesän kestävyyttä pohdittiin ennen testausvaihetta, mutta se osoittautui oikein toimivaksi. Moottorin aiheuttama värinäkkään ei haitannut toimintaa ja laakeripesä kesti kaikki testit. Työnmäärästä johtuen, päädyttiin tekemään pikaisia ratkaisuja testejä varten, näistä esimerkkinä kaltevapintaisen poranterätelineen rakentaminen. Telineestä olisi toki saanut siistimmän 3D-mallintamalla ja tulostamalla. Kuitenkin telineen käytettävyys ei olisi oleellisesti muuttunut, joten päädyttiin pikaisempaan ratkaisuun. Tässä oli lisäksi etuna se, että voitiin tarkastella miten poranteriä saa nostettua, kun teline on tehty pikaisesti ja antaa hieman periksi.

8.1 Tavoitteiden saavuttaminen

Tavoitteisiin päästiin osittain tässä opinnäytetyössä. Oletuksena oli nostotyön vaatimukset tarkkuuden suhteen. Ajateltiin poranterätelineiden toimivuuden olevan tarkkaa työtä ja vaativan useita erilaisia testejä ennen kuin saataisiin edes muutamia onnistumisia. Tämä osoittautui kuitenkin vääräksi oletukseksi ja robotin soveltuvuuden kannalta huomattiin yhteistoimintarobotin kykenevän nostamaan poranteriä erilaisista telineistä vaivattomasti ja näin ollen täyttävän sille asetetut vaatimukset. Sen helppokäyttöisyys ja nopea ohjelmointi helpottivat kiillotustestiä varten suunnitellun ohjelman muokkauksissa.

Kiillotusjäljen tarkastelua voidaan sanoa vaillinaiseksi sen jäädessä vain visuaalisen tarkastelun tasolle. Visuaalisessa tarkastelussa tehdyt havainnot ovat vain olettamuksia ja vaatisivat käytännön testejä. Visuaalisella tarkastelulla löydettiin kuitenkin eroavaisuuksia, kun eri aikoja ja nopeuksia testattiin. Huomattiin pidemmän ajan tuloksien olleen selkeämpiä. Nopeuden osalta

merkittävimmit tulokset saatiin 90 kierrosta minuutissa olevalla nopeudella. Lisäksi karkeamman median käyttäminen näkyi silmämääräisesti vähemmän selkeinä muutoksina. Tältä osin tuloksia siis tavoitteet saavutettiin. Testeissä käytetyt pinnoitetut tangot tekivät mahdolliseksi pinnan heijastusten tarkastelun, mikä ei välttämättä olisi onnistunut oikeilla poranterillä. Tämä johtuen niiden tarkasteltavan pinnan pienemmästä pinta-alasta verrattuna pinnoitettuihin tankoihin.

Mikäli tulosten olettamuksia haluttaisiin vahvistaa, samat testit pitäisi toistaa oikeilla pinnoitetuilla poranterillä, jonka jälkeen niitä testattaisiin jonkinlaisissa rasiustesteissä. Näissä testeissä mitattaisiin esimerkiksi niiden terävyyttä porausten jälkeen ja lämpötilaa porauksen aikana. Mittaustuloksia vertailemalla kuvattuihin tankoihin voitaisiin saada tehtyä johtopäätöksiä, millaiset parametrit olisivat sopivat kiillotusvaiheeseen.

Toisena vaihtoehtona olisi tarkastella kiillotettujen tankojen pinnankarheutta siihen sopivalla mittarilla. Pinnankarheuden mittaukseen löytyy Jankilta mittari, jonka sopivuutta tankojen tarkasteluun täytyisi selvittää. Pinnanlaadun mittauksessa ongelmana on tuo referenssien puute, eli pitäisi ensiksi selvittää millainen pinta on riittävän hyvä ja missä menee raja huonon pinnanlaadun kanssa. Lisäksi kuten aikaisemmin mainittiin, vaatii pinnantarkastelu syvällisempää perehtymistä aihealueeseen.

Opinnäytetyössä saavutettujen tulosten perusteella toimeksiantaja pystyisi ottamaan käyttöön vastaavanlaisen robottikiillotusjärjestelmän tietyin ehdoin. Korrelaatio kuvissa olleiden heijastus muutoksien sekä poranterien poraustestien välillä täytyisi löytää, jotta prosessia voitaisiin alkaa muokata haluttuun suuntaan. Tätä varten täytyisi kuitenkin tehdä reilusti lisää testejä, mikä lisäisi kustannuksia prosessin käyttöönotto- sekä alkuvaiheessa. Sitä varten täytyisi suorittaa tarkat laskelmat takaisinmaksuajasta ja siitä tehtyjen johtopäätösten perusteella miettiä, onko se taloudellisesti järkevää.

Järjestelmä itsessään vähentää fyysistä työkuormaa työntekijältä sekä luo itse kiillotusprosessista toistettavamman. Tällä on suora vaikutus laadunvalvontaa ja hallintaan, lisäksi toistettavuuden avulla kiillotustyötä voidaan alkaa yksilöimään erilaisten terien kohdalla. Tällaisella voisi olla todellista lisäarvoa toimeksiantajalle

Kokonaisuudessaan opinnäytetyön tekeminen oli kehittävä kokemus. Pääsin syventämään osaamistani robotiikan osalta tietoperustaa tehdessä. Pinnoitteisiin perehtyessä avartui niiden moninaisuus ja käytettävyys, samalla selkeyttäen opinnäytetyön tarvetta. Suunnittelun vapaus, esimerkiksi kiillotusastian toiminnan osalta oli omiaan lisäämään työelämässä tarvittavia ongelmanratkaisutaitoja.

8.2 Jatkokehitys

Jatkokehityskohteita opinnäytetyöstä löytyy useampaan eri osa-alueeseen. Tämä opinnäytetyö toimii niille hyvänä pohjana. Kehitystyötä ja sen tarpeellisuutta voisi tarkastella ainakin poranterätelineiden rakenteissa, kiillotustyön tuloksien analysoinnissa, kiillotustapaan liittyen sekä yhteistoimintarobottin toiminnan kehittämiseen liittyvillä komponenteilla kuten konenäkökameralla.

Poranterätelineiden testien tuloksien pohjalta, olisi tarpeellista suunnitella teollisuusympäristöön sopiva ja tarpeet täyttävä teline. Telineen tulisi olla helposti täytettävissä, siten ettei työntekijän tarvitsisi erikseen asetella poranteriä telineeseen tarkasti. Telineen koko pitäisi olla riittävän iso, että siihen mahtuisi useampi erikokoinen terä. Huomioitavaa on myös poranterien reikien etäisyyksillä, että kaikki terät voidaan nostaa, vaikka teline olisi täysi.

Kiillotustyön tuloksien syvempään tarkasteluun ja koko laadunvalvontaa varten voitaisiin selvittää pinnanlaadun tarkasteluun sopivat mittalaitteet ja luoda jonkinlaiset referenssiarvot, minkä avulla yritys pystyisi alkaa kehittämään ja kenties yksilöimään sopivia parametreja riippuen poranterän pituudesta, paksuudesta ja materiaalista.

Kolmantena jatkokehitys aiheena olisi tutkia erilaisten kiillotuslaitteiden vaikutusta kiillotustulokseen. Tässä opinnäytetyössä käytettiin pyörivää kiillotusastiaa, mutta esimerkiksi erilaisten täryttimien kiillotusjälkien tuloksien vertaaminen voisi tuoda lisäarvoa, ajatellen prosessin tehokkuuden ja nopeuden parantamista.

Neljäntenä jatkokehityskohteena olisi yhteistoimintarobottiin konenäkökameran integroiminen. Selkeää lisäarvoa toisi, mikäli robotti pystyisi tunnistamaan poranteriä ja esimerkiksi niissä olevia

merkintöjä, minkä perusteella se tietäsi asettaa poranterän kiillotuksen jälkeen oikeaan paikkaan. Lisäksi samat merkinnät voisivat antaa konenäkökameran kautta järjestelmälle tietoja, minkälaisia parametreja kiillotuksessa käytettäisiin.

Lähteet

ABB. 2019. IRC5. Industrial Robot Controller. Datasheet. Viitattu 17.01.2022.

https://library.e.abb.com/public/d6f68ade0cb24d6aa0fe79220321d187/IRC5_ROB0295EN-Rev.D.pdf

Basler. 2022. Basler a2A3840-13gcBAS - Basler ace 2. Datasheet. Viitattu 07.03.2022.

<https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace2/a2a3840-13gcbas/>

Billing, M. 2012. OPPIMISYMPÄRISTÖ ROBOTIIKAN JA ETÄOHJELMOINNIN OPETUKSEEN.

Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 15.01.2022. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201205211140>.

Bralla, J.G. 2007. Handbook of Manufacturing Processes. How Products, Components and Materials are Made. 3.K3 Barrel Tumbling. Industrial Press. Viitattu 27.01.2022

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt006HS1A6/handbook-manufacturing/barrel-tumbling>

Cortés, J. 2003. Motion Planning Algorithms for General Closed-Chain Mechanisms. THESIS. National Polytechnic Institute of Toulouse Systems Doctoral School. Automatic Systems / Robotics. Viitattu 17.01.2022. https://homepages.laas.fr/jcortes/PhD_thesis.pdf.

Dinwiddie, K. 2019. Industrial robots, first edition, Cengage learning Inc.

Gurgul, M. 2018. Industrial robots and cobots, Everything you need to know about your future co-worker. Monee IL: Michal Gurgul. Viitattu 20.12.2021. <https://read.amazon.com/?asin=B07L7N7JG6&language=en-US>, Amazon Kindle. Michal Gurgul.

Guerry, M., Müller, C., Kraus, W. & Bieller, S. 2021. Press Conference World Robotics 2021 | 28.10.2021. IFR International federation of robotics. Viitattu 09.01.2021

https://ifr.org/downloads/press2018/2021_10_28_WR_PK_Presentation_long_version.pdf.

Gupta, Arora, A., Westcott, S. & Riescher, J. 2017. Industrial Automation and Robotics. Mercury Learning and Information. Viitattu 13.11.2021.

https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0119K421/industrial-automation/robot-classification_

Hakola, E. 2021. Lintilä pitää komponenttipulaa hallitsevana tekijänä talouden elpymisessä – Yrittäjä: Hankkeet menevät jäihin. Uutinen Suomen Yrittäjien www-sivuilla. 1.9.2021. Viitattu 03.02.2022.

<https://www.yrittajat.fi/uutiset/lintila-pitaa-komponenttipulaa-hallitsevana-tekijana-talouden-elpymisessa-yrittaja-hankkeet-menevat-jaihin/>

Helin, M., Spoof, S.K., Jäppinen, S. & Launis, V. 2012, Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. Tutkimuseettinen neuvottelukunta. Viitattu 22.11.2021. https://tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK_ohje_2012.pdf.

Heikkilä, A. 2017. HIONTATYÖVAIHEEN AUTOMATISOINTI TUOTANNOSSA. Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Viitattu 31.01.2022. <https://www.theseus.fi/handle/10024/130514>

IFR. n.d. International federation of robotics. Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots. Viitattu 09.01.2022.

https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf.

IFR Press Room. 2020. IFR presents World Robotics Report 2020. Viitattu 09.01.2022.

<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>.

JR-Tools. N.d. Yrityksen verkkosivut/Esittely. Viitattu 19.11.2021. https://www.jrtools.fi/company_

Kananen, J. 2015. KEHITTÄMISTUTKIMUKSEN KIRJOITTAMISEN KÄYTÄNNÖN OPAS. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2010. Opinnäytetyön kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Konedirektiivi 2006/42/EY. Euroopan unionin neuvosto. Direktiivi. Viitattu 03.01.2022.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0042&from=FI>

L 23.8.2002/738. Työturvallisuuslaki. Finlex. Viitattu 03.01.2022.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2002/20020738#L5P41>.

Maaranen, K. 2012. Koneistus. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Mattox, D. 2010. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Elsevier Science & Technology Books. ProQuest Ebook Central. Viitattu 02.01.2022. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/detail.action?docID=894706>.

Malm, T. 2017. Guidelines to make safe industrial robot systems. Research report. VTT. Viitattu 03.01.2022. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2017/VTT-R-01109-17.pdf>.

Miller, M. & Miller, R. 2017, Robots and Robotics: Principles, Systems, and Industrial Applications. McGraw-Hill Education.

Mobley, R. K. & Mobley, R K. 1999. Vibration Fundamentals. Elsevier Science & Technology. Viitattu 06.01.2022. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.jamk.fi:2443/lib/jypoly-ebooks/detail.action?docID=294437>.

Moritex. 2022. MML6-HR110D - MML-High Resolution Series MML Fixed Magnification Lenses. Datasheet. Viitattu 07.03.2022. <https://moritex.com/model/1-1-1-2-2-3-12.html>

Riekkinen, J. N.d. Konenäkö. Optinen mitoitus ja valaistus. Kurssimateriaali. Viitattu 23.03.2022. https://moodle.jamk.fi/pluginfile.php/495652/mod_resource/content/2/Konen%C3%A4k%C3%B6%20-%203%20-%20optinen%20mitoitus%20ja%20valaistus.pdf

Robotiikka. 1999. Toim. R. Kuivanen. Suomen robotiikkayhdistys RY. Vantaa: Talentum Oyj/Metallitekniikka.

Robotiq. 2020. Adaptive Grippers. Product sheet. Viitattu 26.01.2020. <https://blog.robotiq.com/hubfs/Product-sheets/Adaptive%20Grippers/Product-sheet-Adaptive-Grippers-EN.pdf>.

Roehl, C. 2017. Know Your Machine: Industrial Robots vs. Cobots. Universal Robots. Blog. Viitattu 10.01.2022. <https://www.universal-robots.com/blog/know-your-machine-industrial-robots-vs-cobots/>.

Sciavicco, L. & Siciliano, B. 2000. Modelling and control of robot manipulators, 2nd Edition, Springer -Verlag London Berlin Heidelberg.

SFS. N.d. Mitä standardi tarkoittaa. Viitattu 03.01.2022. <https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/>.

SFS-EN ISO 10218-1:2011. ROBOTIT JA ROBOTIIKKALAITTEET. TURVALLISUUSVAATIMUKSET: OSA 1: TEOLLISUUSROBOTIT. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS. Viitattu 09.11.2021. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN ISO 10218-2:2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS. Viitattu 03.01.2022. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

SFS-EN ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices. Collaborative robots. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Helsinki: SFS. Viitattu 03.01.2022. <https://janet.finna.fi/>, SFS Online.

Sundelin, J. 2022. Pinnanlaadun tarkastelu. Sähköpostiviesti 7.3.2022. Vastaanottaja L. Leppänen. Jyväskylän ammattikorkeakoulun teollisuustekniikan lehtorin opastus pinnanlaadun tarkasteluun.

SICK. 2022. Product family overview. Inductive Proximity sensors. Datasheet. Viitattu 17.01.2022. https://cdn.sick.com/media/familyoverview/1/51/451/familyOverview_IME_g345451_en.pdf

STT Viestintäpalvelut. 2021. Universal Robotsilta cobotti-koulutusohjelma suomalaisille oppilaitoksille. Universal robots. Viitattu 11.01.2022. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/universal-robotsilta-cobotti-koulutusohjelma-suomalaisille-oppilaitoksille?publisherId=69817854&releaseld=69917410>

Tunturi, P. 1994. Metallipinta. Suomen Galvanotekninen Yhdistys. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy

Tunturi, P. & Tunturi, P. 1999. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt. Metalliteollisuuden keskusliitto, MET. 3. painos. Metalliteollisuuden kustannus OY.

Uusitalo, V-M. 2021. JR-Tools Oy vahvistaa lastuavien työkalujen huoltopalveluaan. Tiedote JR tools Oyn www-sivuilla 27.8.2021. Viitattu 19.11.2021 <https://www.jrtools.fi/tiedote-jr-tools-oy-vahvistaa-lastuavien-tyokalujen-huoltopalveluaan>.

Universal Robots history. 2022. About us. Our History. Universal Robots verkkosivu. Viitattu 11.01.2022. <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/our-history/>

Universal Robot UR5e. 2022. Products. Universal Robots verkkosivu Viitattu 17.01.2022. <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/>

Universal Robots. 2016. UR5 Technical specifications. Datasheet. Universal Robots. Viitattu 11.01.2022. https://www.universal-robots.com/media/50588/ur5_en.pdf

Vienonen, S. 2017. Ohutlevy kappaleiden hiontatyön robotisointi. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 31.01.2022 . <https://www.theseus.fi/handle/10024/133926>

Wilson, M. 2015, Implementation of Robot Systems : An Introduction to Robotics, Automation, and Successful Systems Integration in Manufacturing. Butterworth-Heinemann. Viitattu 15.11.2021. <https://search-ebsohost-com.ezproxy.jamk.fi:2443/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=485284&site=ehost-live>.

Liitteet

Liite 1. Robotin ohjelmointikoodi

```
1 Program
2 Robot Program
3 MoveJ
4   Aloituspiste
5 MoveJ
6   Teline_lahi
7 Gripper Open (1)
8 MoveL
9   Tera_nouto
10 Gripper Close (1)
11 Grip Check
12   If object not detected
13     MoveL
14       Aloituspiste
15 MoveL
16   Tera_nosto
17 MoveL
18   Sivusiirto
19 MoveL
20   Hionta_lahi
21 MoveL
22   Hionta_lasku
23 Loop 1000 times
24   Wait: 1.0
25   MoveL
26     keskelle
27   Wait: 1.0
28   MoveL
29     Kulma_oikealle
30   Wait: 1.0
31   MoveL
32     Hionta_lasku
33   Wait: 1.0
34 MoveL
35   Hionta_nosto
36 MoveJ
37   Poyta_siirto
38 MoveJ
39   Poyta_lasku
40 Gripper Open (1)
41 MoveJ
42   Aloituspiste
43
```

Liite 2. Kiillotusaika- ja nopeustaulukko

Media	Tanko	Tankonumero	Nopeus	Aika	Kierto	suunnanvaihto
Hieno	1	1	90 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	1	2	90 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	1	3	70 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	1	4	70 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	1	5	30 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	1	6	30 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	2	1	90 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	2	2	90 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	2	3	70 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	2	4	70 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	2	5	30 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Hieno	2	6	30 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	1	7	90 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	1	8	90 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	1	9	70 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	1	10	70 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	1	11	30 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	1	12	30 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	2	7	90 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	2	8	90 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	2	9	70 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	2	10	70 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	2	11	30 RPM	15 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
Karkea	2	12	30 RPM	30 Minuuttia	3 asema kulma	Puolivälissä
<p>3 asema kulma = Testitangon edestakainen siirto kolmen eri asennon välillä (viisto, suora, viisto) Puolivälissä = määritetty aika jaettuna puoliksi. RPM = Rounds per minute = Kierrosta minuutissa</p>						

Liite 3. Kiillotustulokset

PARI 1

MEDIA: Hieno

Tanko numero 1.



Ennen kiillotusta

TESTITANKO 1

NOPEUS: 90 rpm



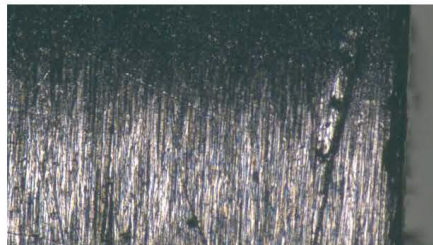
Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15 MIN

Tanko numero 2.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN

PARI 2

MEDIA: Hieno

Tanko numero 3.



Ennen kiillotusta

TESTITANKO 1

NOPEUS: 70 rpm



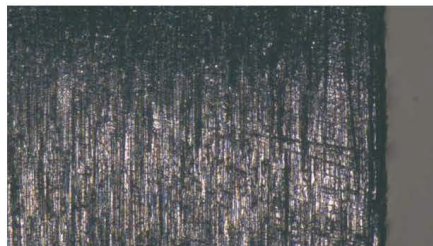
Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 4.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

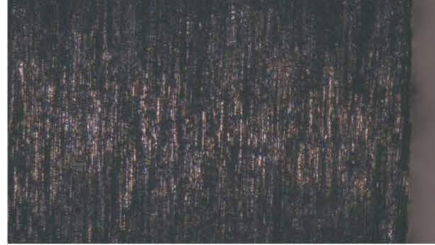
Aika : 30 MIN

PARI 3**MEDIA: Hieno**

Tanko numero 5.



Ennen kiillotusta

TESTITANKO 1**NOPEUS: 30 rpm**

Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 6.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN

PARI 4**MEDIA: Karkea**

Tanko numero 7.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 8.

TESTITANKO 1**NOPEUS: 90 rpm**

Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN

PARI 5**MEDIA: Karkea**

Tanko numero 9.



Ennen kiillotusta

TESTITANKO 1**NOPEUS: 70 rpm**

Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 10.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN

PARI 6**MEDIA: Karkea**

Tanko numero 11.



Ennen kiillotusta

TESTITANKO 1**NOPEUS: 30 rpm**

Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 12.



Ennen kiillotusta

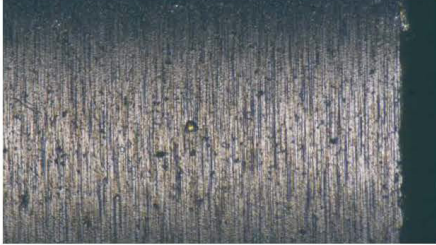


Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN

PARI 7**MEDIA: Hieno**

Tanko numero 1.



Ennen kiillotusta

TESTITANKO 2**NOPEUS: 90 rpm**

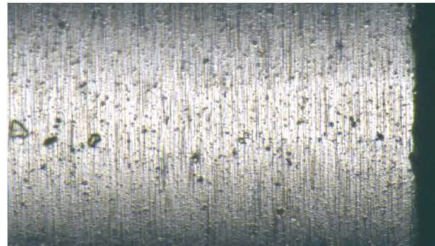
Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 2.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN

PARI 8**MEDIA: Hieno**

Tanko numero 3.



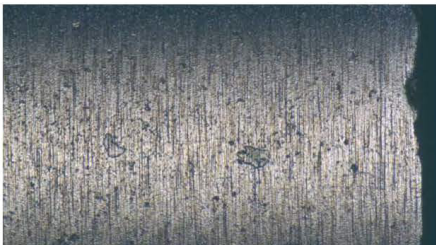
Ennen kiillotusta

TESTITANKO 2**NOPEUS: 70 rpm**

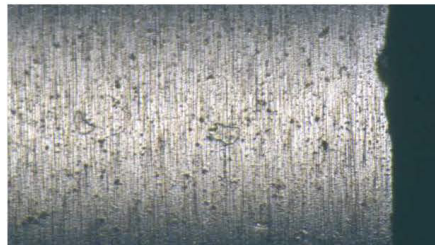
Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 4.



Ennen kiillotusta

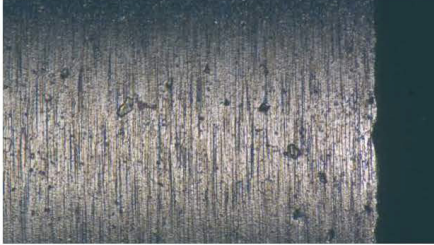


Jälkeen kiillotuksen

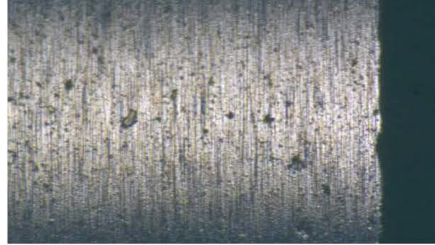
Aika : 30 MIN

PARI 9**MEDIA: Hieno**

Tanko numero 5.



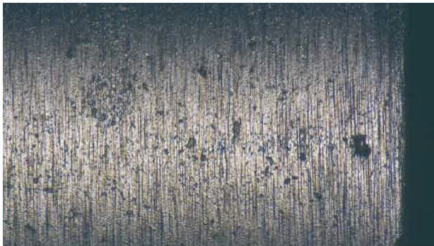
Ennen kiillotusta

TESTITANKO 2**NOPEUS: 30 rpm**

Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 6.



Ennen kiillotusta

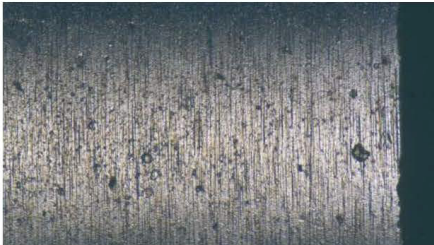


Jälkeen kiillotuksen

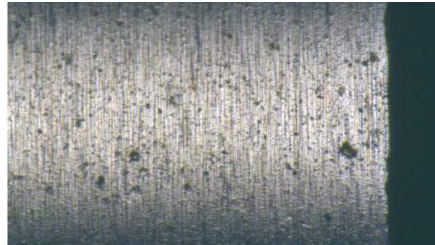
Aika : 30 MIN

PARI 10**MEDIA: Karkea**

Tanko numero 7.



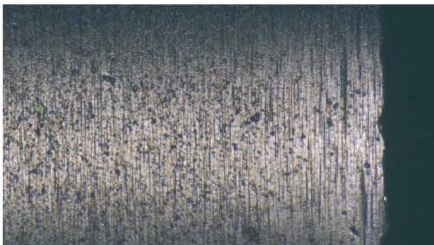
Ennen kiillotusta

TESTITANKO 2**NOPEUS: 90 rpm**

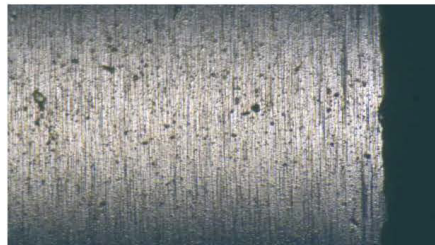
Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 8.



Ennen kiillotusta

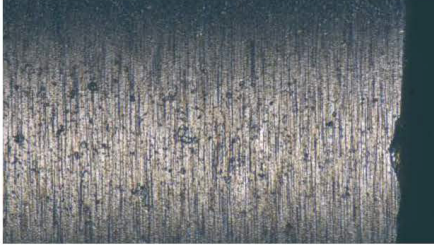


Jälkeen kiillotuksen

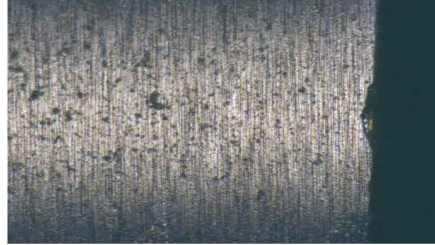
Aika : 30 MIN

PARI 11**MEDIA: Karkea**

Tanko numero 9.



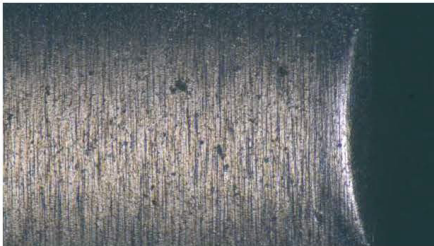
Ennen kiillotusta

TESTITANKO 2**NOPEUS: 70 rpm**

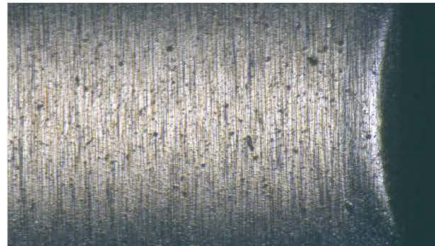
Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 10.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN

PARI 12**MEDIA: Karkea**

Tanko numero 11.



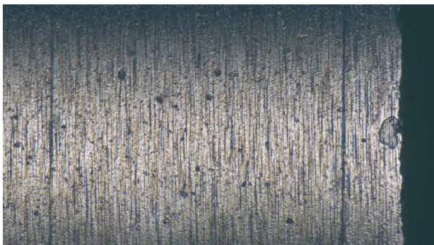
Ennen kiillotusta

TESTITANKO 2**NOPEUS: 30 rpm**

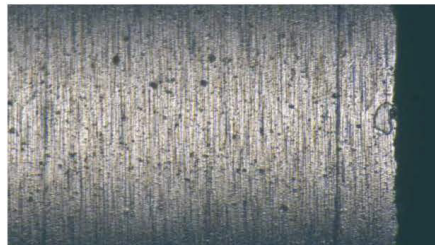
Jälkeen kiillotuksen

Aika : 15MIN

Tanko numero 12.



Ennen kiillotusta



Jälkeen kiillotuksen

Aika : 30 MIN