



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# OHUTLEVYKAPPALEIDEN HIONTATYÖN ROBOTISOINTI

Santeri Vienonen

Opinnäytetyö  
Syyskuu 2017  
Kone – ja tuotantotekniikka  
Koneautomaatio



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Koneautomaatio

VIENONEN, SANTERI:  
Ohutlevy kappaleiden hiontatyön robotisointi

Opinnäytetyö 65 sivua, joista liitteitä 0 sivua  
Syyskuu 2017

---

Tämä insinööri työ on tehty Elektrorakenne Oy -nimiselle konepajateollisuuden yritykselle. Työn tarkoituksena oli selvittää, miten yritys voisi robotisoida hitsattujen ohutlevy kappaleiden hiontatyöt. Haasteena olivat erityisesti kappaleen ja robotin välisen hionta-voiman hallinta, hiomalaikan kulumisen sekä aineenpoiston määrän vaihtelu. Robotin osalta haasteita loivat robotin kantokyky ja jäykkyys. Myös pienet tuote-erät ja erikoiset työkappaleet toivat haasteita itse hiontaprosessin suunnitteluun.

Yrityksen hiontatyö koostuu kolmesta työvaiheesta, jotka ovat työkappaleen hitsaus-  
sauman puhdistus, nurkkakulmien pyöritys sekä pintojen kiillotus. Tämä työ rajattiin  
koskemaan vain kahta ensimmäistä, koska suurin osa hiottavista tuotteista menee maa-  
laukseen. Kappaleiden materiaaleina olivat teräs ja ruostumaton teräs sekä hitsausmene-  
telminä olivat pääasiassa TIG -ja MIG -hitsaus.

Pääasiassa robotti voi hioa kappaletta joko omalla hiomatyökalullaan tai painamalla sitä  
tarraimessaan ulkoisen hiomakoneen terää vasten. Robotilta puuttuvat ihmiselle luon-  
tainen joustavuus ja voimanhallinta, joita pyritään matkimaan robotin voimaohjauksen,  
ulkoisten joustoyksiköiden ja joustavien hiomatyövälineiden avulla. Hitsattujen työkapp-  
paleiden aineenpoiston määrän vaihtelu on pyrittävä minimoimaan, jolloin hiontalaatu  
paranee sekä robotin hiontavoima voidaan pitää vakiona. Antureita ja konenäkökame-  
roita käyttämällä saadaan hiontaprosessista ja kappaleista tietoa, mikä helpottaa robotin  
ohjelmointia.

Kuten edellä mainituista asioista voidaan päätellä, on hiontatyön robotisointiin olemassa  
erilaisia menetelmiä. Yhdessä robotiikka-alan asiantuntijoiden ja yrityksen johdon kans-  
sa päädyttiin lopputuloksissa ratkaisuun, jossa yritykselle suunniteltiin hiomakone, joka  
sopii robotilla hiomiseen. Hiomakoneen kokoonpano, ominaisuudet ja toiminta on  
suunniteltu erityisesti yrityksen työkappaleita varten. Hiomakone toimii yhdessä robotin  
kanssa siten, että robotti painaa kappaletta tarttujassaan hiomakoneen hiomalaikkaa vas-  
ten. Hiomalaikaksi valittiin ominaisuuksiltaan tasaisesti kuluva laikka. Robotin ra-  
danohjaus perustuu hiomalaikan kulumiseen. Lisäksi hiomakoneen ja robotin välille on  
lisätty joustoelementti yhden akselin suuntaan. Yritys aloitti hiomakoneen prototyypin  
valmistuksen kesällä 2017.

---

Asiasanat: hionta, robotti, automaatio, ohutlevy

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Machine Automation

VIENONEN, SANTERI:  
Robot Grinding of Sheet Steel Workpiece

Bachelor's thesis 65 pages, appendices 0 pages  
September 2017

---

This thesis was commissioned by a machine workshop company called Elektrorakenne Oy. The purpose of this work was to find out how the company could robotize their grinding work of welded sheet steel workpieces. Controlling the grinding force between the workpiece and the robot, wear of the grinding wheel and variation in material removal were particularly tough challenges. The stiffness and robustness of the robot created further challenges. Small product batches and different sizes of workpieces made designing of the grinding process more demanding.

The company's grinding work consist of three stages of work: cleaning the welded seam, rounding corner angles and polishing the surfaces. This study was limited to the first two, as most of the ground workpieces were painted. The workpieces were made of steel and stainless steel and the welding method was mainly TIG welding.

The robot can grind the workpiece with either its own grinding tool or press the workpiece against the blade of the external grinder. The robot lacks human intuitive flexibility and force adjustment, but robot force control, external flexible units and flexible abrasive tools are used to imitate these as well as possible. It is desirable to minimize the variation in the material removal, as this improves the grinding quality and grinding force of the robot can be kept constant. By using sensors and machine vision cameras, information is obtained about the grinding process and the work pieces, which eases programming of the robot.

As can be seen from above, there are various methods that can be used to robotize grinding work. Together with experts of robotics and management of the company, a decision was made to design a grinder for the company. The grinder's assembly features and functions were designed especially for the workpieces ground at the company. The grinder works together with robot so that the robot presses the piece in its gripper against the grinder. A disc that wears out evenly was selected to be used as the grinding wheel. The control of the robot's end effector is based on the abrasion of the grinding wheel. Moreover, flexible unit was inserted with one axis movement between the grinder and the robot. The company made a prototype of the grinder at summer 2017.

---

Key words: grinding, robot, automation, sheet steel

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	ELEKTORAKENNE OY .....	8
3	HIONTA.....	9
3.1	Hiomakoneet .....	9
3.2	Hiomalaikkatyypit .....	12
3.3	Hiomalaikka ja sen rakenne .....	12
3.3.1	Hioma-aine .....	13
3.3.2	Raekoko.....	14
3.3.3	Hiomalaikan kovuus.....	14
3.3.4	Hiomalaikan sideaineet .....	15
3.3.5	Hiomalaikan kuluminen sekä sen teroitus ja oikaisu .....	16
3.4	Hiontamenetelmät .....	16
3.5	Lastuamistapahtuma .....	17
3.5.1	Lastun paksuus .....	18
3.5.2	Hiontaleikkauskulma.....	19
3.5.3	Hiontavoimat.....	19
3.6	Hionnan työstöarvot.....	19
3.7	Lastuamisneste .....	21
3.8	Hionnan ongelmat .....	21
3.9	Hionnan tulokset .....	23
4	TEOLLISUUSROBOTIIKKA .....	24
4.1	Robottien rakenteet .....	25
4.2	Robottityypit ja käyttösovellukset .....	27
4.2.1	Suorakulmaiset robotit .....	29
4.2.2	Sylinterirobotit .....	29
4.2.3	Napakoordinaatistorobotit.....	30
4.2.4	SCARA -robotit .....	30
4.2.5	Kiertyväniveliset robotit.....	31
4.2.6	Rinnakkaisrakenteiset robotit.....	31
4.2.7	Yhteistoiminta robotit .....	32
4.3	Geometriset muuttajat ja kinematiikka.....	33
4.3.1	Kinematiikka .....	35
4.4	Robotin ohjausjärjestelmä ja aistinjärjestelmät .....	36
4.5	Työkalut ja tarttujat.....	37
4.6	Robottien ohjelmointi .....	39
4.7	Johdattamalla ohjelmointi .....	39

4.8	Opettamalla ohjelmointi .....	39
4.9	Etäohjelmointi.....	40
5	HIONNAN AUTOMATISOINTI.....	42
5.1	Hionnan robotisointi .....	43
5.2	Robotilla hiomisen toteutus .....	44
5.3	Joustavuus ja radanohjaus.....	45
5.4	Hionnan etäisyyden mittaus ja hallinta.....	46
5.5	Voimanohjaus hionnassa .....	47
5.5.1	Integroitu voimanohjaus.....	49
5.5.2	Ulkoiset voimaohjatut joustoyksiköt.....	50
5.6	Hiontarobotin ohjelmointi.....	51
6	TYÖN TOTEUTUS .....	53
6.1	Kappaleen valmistuksen työvaiheet.....	53
6.2	Hiontaprosessin ominaisuudet .....	54
6.3	Hiontatyön automatisoinnin haasteet.....	56
6.3.1	Aineenpoiston vaihtelun hallinta.....	57
6.3.2	Hiomavälineen kulumisen kompensointi.....	58
6.4	Lopullisen hiontamenetelmän valinta .....	61
7	POHDINTA.....	63
	LÄHTEET.....	65

**ERITYISSANASTO**

MIG

Metal Inert Gas

TIG

Tungsten Inert Gas

CMT

Cold Metal Transfer

CNC

Computer Numerical Control

## 1 JOHDANTO

Nykyaikana on yhä vaikeampi löytää osaavia työntekijöitä tekemään konepajateollisuuden hiontatöitä. Hiontatyö on raskasta, likaista ja yksitoikkoista työtä. Tämän vuoksi Elektrorakenne Oy:llä syntyi tarve selvittää, miten hitsattujen teräslevykappaleiden hiontatyötä voitaisiin tehdä robotilla. Tämän työn tarkoituksena onkin selvittää ne robotilla hiomisen menetelmät ja tekniikat, joita yritys voi käyttää, suunnitelleessaan hiontasovellusta robotille. Aihe on rajattu siten, että yritykselle suunniteltu robotin hiontasovellus kerrotaan vain pääpiirteittäin. Työssä syvennytään yleisesti robotilla tehtävään hiontatyöhön konepajateollisuudessa, ja samalla verrataan sen ratkaisuja yrityksen haasteisiin.

Aluksi esitellään työn tilaaja Tuusulassa sijaitseva konepaja Elektrorakenne Oy sekä perehdytään hieman yrityksen historiaan ja sen toimintaan. Työn alussa kerrotaan konepajateollisuuden hiontatyöstä yleisesti ja siinä perehdytään hionnan työvälineisiin, koneisiin ja menetelmiin.

Tämän jälkeen kerrotaan robotiikasta teoriaa, jonka jälkeen syvennytään hionnan automatisoinnin vaihtoehtoihin. Tässä osiossa verrataan esimerkiksi CNC -koneen ja robotin välisiä eroja hiontatöiden suorittamiseksi. Osion lopussa kerrotaan ne yleisimmät menetelmät, miten robotilla hiominen saadaan onnistumaan. Viimeiseksi kerrotaan itse työn suorittamisesta sekä perustellaan lopullinen ratkaisu yrityksen hiontaprosessin automatisoimiseksi.

## 2 ELEKTORAKENNE OY

Työn tilaaja Elektrorakenne Oy on pääasiassa alumiini - ja teräslevytuotteiden valmistaja ja suunnittelija. Yrityksen tuotantotilat sijaitsevat Tuusulassa Ristikiven teollisuusalueella. Yrityksen historia alkaa 1960-luvulta, kun Veikko Pennanen ja Mika Warski perustivat sorvaamon nimeltään Pennanen & Warski. 1972 -luvulla sorvaamon nimeksi vaihdettiin Elektrorakenne Oy ja mukaan toimintaan tuli myös Juhani Bremer. Tuohon aikaan oli jo nähtävissä elektroniikkateollisuuden kasvua Suomessa, joka lisäsi kysyntää levyosille. (Elektrorakenne Oy.)

1972 -luvun lopulla Veikko Pennanen poika Olli Pennanen aloitti työt Elektrorakenteessa ensimmäisenä virallisena työntekijänä sekä Ollista tuli myös yksi Elektrorakenteen osakkaista. Vuonna 1976 Elektrorakenteen konekantaan kuului kaksi epäkeskoa, leikkuri, käsikanttikone, hitsaus – ja hiontalaitteita, sorvi, pistohöylä sekä hydraulinen särmäpuristin. 1977 -luvulla Olli aloitti opiskelut Helsingin Teknillisessä oppilaitoksessa ja valmistui vuonna 1980. Tuona aikana Elektrorakenteen tiloja laajennettiin ja tiloihin siirtyi myös toinen yritys nimeltään Levymetalli Oy. Yrityksen kanssa suoritettiin muo- dollinen fuusio ja yhdessä ne työllistivät noin 20 henkeä. 1980 -luvun lopulla asiakaspieri laajeni ja työt lisääntyivät sekä konekantaan lisättiin. Tuohon aikaan Elektrorakenne osti myös ensimmäisen teollisuusrobotinsa. (Elektrorakenne Oy.)

1990 -luvun lopulla Elektrorakenne muutti nykyiseen toimitilaansa Tuusulan Ristikivelle sekä sinne hankittiin myös uusi levytyökeskus. 2000 -luvulla Ollin pojat Martti ja Pekka Pennanen aloittivat työnteon yrityksessä. Vuodesta 2006 Martti on toiminut Elektrorakenteen tuotantopäällikkönä ja vuonna 2009 Pekka aloitti myyntipäällikkönä. 2000 -luvulla yritys on lisännyt automatisointia ja käsityöstä on siirrytty roboteilla ja koneilla tehtäviin töihin. Tällä hetkellä Elektrorakenne valmistaa levytuotteita esimerkiksi trukkeihin, rakennus – ja ilmailualan sekä lääketieteen ja maatalouden tarpeisiin. (Elektrorakenne Oy.)



### 3 HIONTA

Hionta on lastuava työstömenetelmä, jossa epätasaisuudet poistetaan työkappaleen pinnalta. Hiontaa on käytetty kappaleiden viimeistelyyn jo antiikin aikoina. Vasta viimeisen sadan vuoden aikana, hionta on tullut osaksi teollisuustuotantoa, mikä on johtanut hiontatekniikan kehittymiseen. Tänä päivänä hionta on osatekijänä lähes jokaisen tuotteen viimeistelyssä. Varsinkin sellaiset tuotteet hiotaan, joilla on suuret ulkonäkö, tarkkuus -ja pinnankarheusvaatimukset. (Ihalainen, Aaltonen, Aromäki & Sihvonen 2011, 197.)

Hionnan käyttöalueet voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin, jotka ovat:

- Koneenosien mittatarkkuuden ja pinnanlaadun parantaminen
- Työkalujen teroitushionta
- Levy- ja teräsrakenteiden sekä valukappaleiden sovitus – ja puhdistushionta sekä jäysteenpoisto. (Ansaharju, Ilomäki & Maaranen 1989, 91.)

#### 3.1 Hiomakoneet

Hiomista voidaan tehdä käsin ja koneella. Yleisin hiomaväline on hiomalaikka, mutta varsinkin tuotteiden viimeistelyssä, käytetään erilaisia hiomanauhoja, -kiviä ja -harjoja. Konepajateollisuudessa käytetään paljon hiomakivellä – ja -harjalla varustettuja penkkihiomakoneita (kuva 1) sekä hiomanauhalla varustettuja nauhahiomakoneita (kuva 2). Liikkuvuutta vaativaan hiontatyöhön käytetään käsin liikutettavaa kulmahiomakonetta (kuva 3). (Ansaharju ym. 1989, 102; Pennanen 2017.)



KUVA 1. Penkkihiomakone (Kuva: Santeri Vienonen 2017)

Penkkihiomakonetta käytetään konepajojen yksinkertaisiin hiontatöihin. Työkappaletta ohjataan käsin hioma-alustaa pitkin sekä sitä painetaan hiomalaikkaa vasten. Hioma-alusta on usein säädettävä, jolla saavutetaan haluttu hiomakulma työkappaleen ja hiomalaikan välille. Penkkihiomakoneissa on yleensä kaksi hiomalaikkaa eri karkeuksilla, jolloin varsinainen aineenpoisto voidaan tehdä karkeammalla laikalla ja toisella laikalla tehdään viimeistelyhionta. Viimeistelyhionnalla saavutetaan parempi kappaleen pinnanlaatu ja ulkonäkö. (Ansaharju ym. 1989, 102; Pennanen 2017.)



KUVA 2. Nauhahiomakone (Kuva: Santeri Vienonen 2017)

Nauhahionta on pääasiassa viimeistelyhionnan menetelmä. Hiomanauha kiertää koneessa olevien rullien ympäri. Hionta suoritetaan yleensä painamalla työkappaletta hiomanauhaa ja joustavaa kontaktipyörää vasten, mutta kappale voidaan hioa vapaata nauhaa tai erillistä tasolaattaa vasten. Kontaktipyöriä on saatavilla eri joustavuuksilla, kuten myös hiomanauhoja on saatavilla eri karkeuksilla. (Ansaharju ym. 1989, 127; Pennanen 2017.)



KUVA 3. Kulmahiomakone (Kuva: Santeri Vienonen 2017)


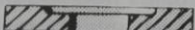

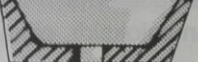

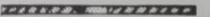


Kulmahiomakone sopii parhaiten hiontatyöhön, joka vaatii liikkuvuutta ja monipuolisuutta. Niitä käytetään usein asennustöissä tai hiontatyössä, joissa kappaletta ei voida siirtää hiontatyöpisteeseen. Niissä usein käytetään hiomalaikkaa, mutta varsinkin viimeistelyhionnassa niissä käytetään erilaisia kiillotuslaikkoja sekä hiomaharjoja. (Ansa-harju ym. 1989, 105; Pennanen 2017.)

Elektrorakenne Oy käyttää ohuiden koteloiden hitsaussauman puhdistukseen nauhahiomakonetta. Nauhahiomakoneella saadaan koteloiden epätasaisesta hitsaussaumasta siisti pyöreä reuna. Koteloiden terävät nurkkakulmat pyöristetään penkkihioakoneella, johon on asennettu hiomaharja. Penkkihioakoneelle on asennettu myös hiomakivi, jolla esikäsitellään paksumpien koteloiden hitsaussaumat. Hiomakivellä saavutetaan parempi aineenpoisto kuin hiomanauhalla, mutta kivellä ei saada yhtä hyvää pinnanlaatua. Tämän takia myös paksumpien koteloiden reunat viimeistellään hiomanauhalla ja hiomaharjalla.

Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen koteloiden pinnat kiillotetaan varsinaisen hionnan jälkeen. Kooltaan pienet kotelot voidaan kiillottaa nauhahiomakoneella, mutta suuremmat kiillotetaan kulmahiomakoneella, johon on asennettu kiillotuslaikka. Normaalisti teräksestä valmistetut kotelot tullaan maalaamaan, joten niiden pintoja ei ole tarpeen kiillottaa.

### 3.2 Hiomalaikkatyypit

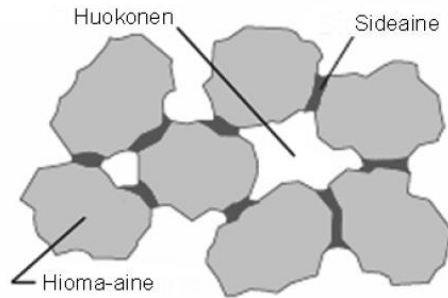
Hiontatyö asettaa hiomalaikalle omat vaatimuksensa, joten ei ole yhtä laikkaa, jolla kaikki erilaiset hiontatyöt voitaisiin suorittaa. Hiomalaikkoja on tyypiltään, reunamuodoltaan ja ominaisuuksiltaan erilaisia. Reunamuodoista yleisin on muodoltaan suorakulmainen eli niin sanottu suora reunamuoto. Muita hiontatyössä käytettyjä laikkojen reunamuotoja on esitetty kuvassa 4. (Ansaharju ym. 1989, 91).

	Suora laikka	Penkkihiomakoneet Suorat käsihiomakoneet	Työkaluhiomakoneet Tasohiomakoneet
	Syvennetty suora laikka	Penkkihiomakoneet Työkaluhiomakoneet	
	Suora kuppilaikka	Penkkihiomakoneet Työkaluhiomakoneet Tasohiomakoneet	
	Kartiomainen kuppilaikka	Työkaluhiomakoneet Tasohiomakoneet Kulmahiomakoneet	
	Lautaslaikka	Työkaluhiomakoneet	
	Katkaisulaikka	Kulmahiomakoneet	
	Napalaikka	Kulmahiomakoneet	
	Karalaikka	Karahiomakoneet	

KUVA 4. Hiomalaikan reunatyypit (Ansaharju ym. 1989, 91.)

### 3.3 Hiomalaikka ja sen rakenne

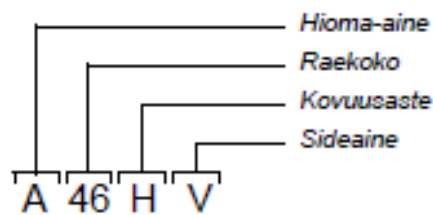
Hiomalaikan rakenne koostuu hioma-aineesta, sideaineesta sekä ilmahuokosista (kuva 5). Hiomalaikan ominaisuudet määräytyvät sen rakenteesta sekä hiomalaikassa olevien aineiden määrästä suhteessa toisiinsa. (Työkaluterästen hionta 2005, 1.) Hioma-aineesta koostuvat hiomarakeet ovat sijoittuneet hiomalaikkaan geometrisesti epäsäännölliseen muotoon, ja sideaine sitoo hiomarakeet kiinni toisiinsa hiomalaikaksi. Ilmahuokosten tehtävänä on toimia lastutilana, jota tarvitaan varsinkin pehmeiden materiaalien hionnassa, jolloin aineenpoisto on suurta. (Ihalainen ym. 2011, 203.)



KUVA 5. Hiomalaikan rakenne (Työkaluterästen hionta 2005, 1.)

Hiomalaikan rakennetta kuvaa tunnusmerkintä, jossa kerrotaan kirjaimin ja numeroin laikan hioma-aine, raekoko, kovuusaste ja sideaine (kuva 6) (Työkaluterästen hionta 2005, 1).

*Esimerkki*



KUVA 6. Tunnusmerkintä (Työkaluterästen hionta 2005, 1.)

### 3.3.1 Hioma-aine

Hioma-aineen tärkeimmät ominaisuudet ovat kovuus, sitkeys, kemiallinen kestävyys sekä lämmönkestävyys. Hioma-aineet jaotellaan neljään ryhmään, joista alumiinioksidi ja piikarbidi ovat eniten käytettyjä. Boorinitridin korkeahinta sekä timantin huono lämmönkestävyys vaikuttavat negatiivisesti niiden yleistymiseen hiontatyössä. (Työkaluterästen hionta 2005, 1–2.)

TAULUKKO 1. Hioma-aineet (Työkaluterästen hionta 2005, 1)

Hioma-aine	Kemiallinen merkintä	Tyypimerkintä
Alumiinioksidi	$Al_2O_3$	A (SG)
Piikarbidi	SiC	C
Boorinitridi	CBN	B
Timantti	PCD	SD

Alumiinioksidia käytetään yleisesti teräksien hiomiseen ja siitä on olemassa useita eri tyyppisiä. Sitä voidaan seostaa muilla oksideilla, jolloin saadaan muutettua sen hiomaominaisuuksia. Piikarbidia käytetään enemmän valuraudan sekä austeniittisen teräksen hiontaan. Siitä on olemassa kaksi muotoa, jotka ovat musta piikarbidi sekä hieman kovempi, mutta hauraampi vihreä piikarbidi. Boorinitridiä käytetään eniten työkaluterästen ja pikaterästen hiontaan. Timanttia käytetään lähinnä kovametallien ja keraamien hionnassa. (Työkaluterästen hionta 2005, 1–2.)

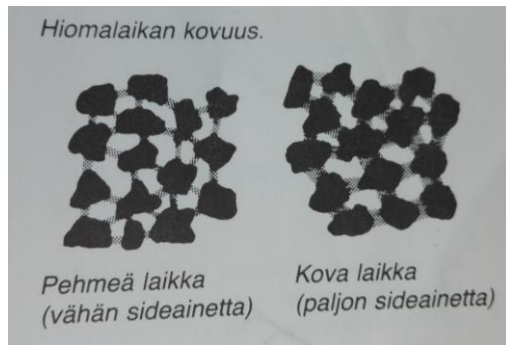
### 3.3.2 Raekoko

Hioma-aineen raekoko on keskeisen pinnankarheuteen ja lastuvirtaan vaikuttava valintakriteeri. Raekoot MESH -jaotellaan kansainvälisesti karkeasta 8:sta erikoishienoon 1200: n. Suurta raekokoa käytetään, kun halutaan parempaa aineenpoistoa suurissa työkappaleissa, pinnanlaadulle ei ole suuria laatuvaatimuksia ja pehmeissä materiaaleissa. Hienoa raekokoa käytetään, kun vaaditaan laadukas pinnanlaatu, hiotaan kovia materiaaleja tai hiottava pinta-ala on pieni. (Työkaluterästen hionta 2005, 2.)

Konepajateollisuudessa teräskappaleiden viimeistelyhiontaan käytetään yleensä hiomalaikkoja ja -nauhoja, joiden karheus on 60, 80 tai 100. Tämän työn aikana testattiin useita rakenteeltaan ja karkeudeltaan erilaisia hiomalaikkoja. Parhaimpaan pinnanlaatuun sekä aineenpoistoon päästiin hiomalaikoilla, joiden karheus oli 80. Paksummasta levystä valmistettujen työkappaleiden hiontaan sopi paremmin hiomalaikat, joiden karheus oli 60.

### 3.3.3 Hiomalaikan kovuus

Hiomalaikan kovuudella tarkoitetaan sitä, miten lujasti työkappaletta lastuavat hiomaraakeet ovat kiinni sideaineessa. Hiomalaikan kovuus (kuva 7) ei riipu hioma-aineen kovuudesta, vaan se määritellään hiomaraakeiden, sideaineen ja huokosten määrän suhteella toisiinsa. Kun sideainetta on paljon, jää vähemmän tilaa joustaville ilmahuokosille, jolloin laikan rakenne on kova. Kun taas sideaineen osuus on pieni ja huokosten osuus suuri, niin hiomaraakeet irtoavat helposti rakenteesta ja laikka on rakenteeltaan pehmeä. (Aaltonen, Andersson & Kauppinen 1997, 248.)



KUVA 7. Hiomalaikan kovuus (Ansaharju ym. 1989, 93.)

Laikan kovuutta kuvaa kirjainmerkintä, joka osoittaa aakkosjärjestyksessä eri kovuuksia. Esimerkiksi E -kirjain tarkoittaa erittäin pehmeää ja Z -kirjain erittäin kovaa. Kovuutta ilmaisevan kirjaimen perässä voi olla myös luku, joka ilmoittaa hiomarakeiden pitoisuuden hiomalaikassa. (Työkaluterästen hionta 2005, 2.)

### 3.3.4 Hiomalaikan sideaineet

Sideaineella yhdistetään hioma-rakeet hiomalaikkaan yhdeksi kiinteäksi kappaleeksi. Keraamiset sideaineet ovat yleisimmin käytettyjä, sillä ne ovat hiontaolosuhteissa eniten stabiileja verrattuna muihin sideaineisiin. (Aaltonen ym. 1997, 246.)

TAULUKKO 2. Sideaineet (Työkaluterästen hionta 2005, 2)

Sideaine	Merkintä
Keraamisideaineet	V
Bakeliittisideaineet	B
Kumiset sideaineet	R
Metalliset sideaineet	M

Bakeliittisideaine on hyvä valinta, jos tarvitaan suuria kehänopeuksia tai elastisuutta. Elastisuus vähentää työkappaleeseen syntyviä värähtely- tai polttojälkiä. Bakeliittia käytetään yleisimmin boorinitridilaikoissa. (Aaltonen ym. 1997, 247.)

Kumisideaineita käytetään, kun tarvitaan bakeliittiakin suurempaa elastisuutta tai korkeaa hiomapainetta. Kumisideaineiden käyttöä hiomalaikoissa rajoittaa niiden alhainen sulamislämpötila, joka on noin 160 °C. (Aaltonen ym. 1997, 247.)

Metallisia sideaineita käytetään timanttilaikoissa sekä jossain boorinitridilaikoissa. Yleisimmät metalliset sideaineet ovat pronssi, teräs ja kovametalli. Metallisen sideai-

neen tarkoitus on pitää hioma-rakeet todella lujaa kiinni laikassa, kunnes ne ovat kulumineet loppuun. (Aaltonen ym. 1997, 246–247.) Tietyt erikoishiomalaiikat, joissa on metallinen sideaine, eivät sisällä lainkaan ilmahuokosia, joten ne ovat erityisen kovia ja kestävätkä erittäin suuria hiomapaineita sekä kehänopeuksia. (Työkaluterästen hionta 2005, 1–2.)

### 3.3.5 Hiomalaikan kulumisen sekä sen teroitus ja oikaisu

Hiomalaikan kulumisen johtaa hiomarakeiden tylstymiseen sekä pyöristymiseen. Kun hiomarakeet eivät enää pysty poistamaan ainetta kappaleen pinnasta, kehittävät ne vain turhaa lämpöä työkappaleeseen. Hiomalaikka toimii oikein, kun sen sideaineen lujuudet ja jännitykset ovat tasapainossa, jolloin laikka itseteroittuu. Itseteroittuminen tarkoittaa sitä, että kun hiomarae tylstyy tarpeeksi, se irtoaa ja sen korvaa uusi terävä hiomarae. Itseteroittumista tapahtuu myös, jos hiomarae murtuu ja siitä syntyy uusia lastuavia särmiä. (Työkaluterästen hionta 2005, 3.)

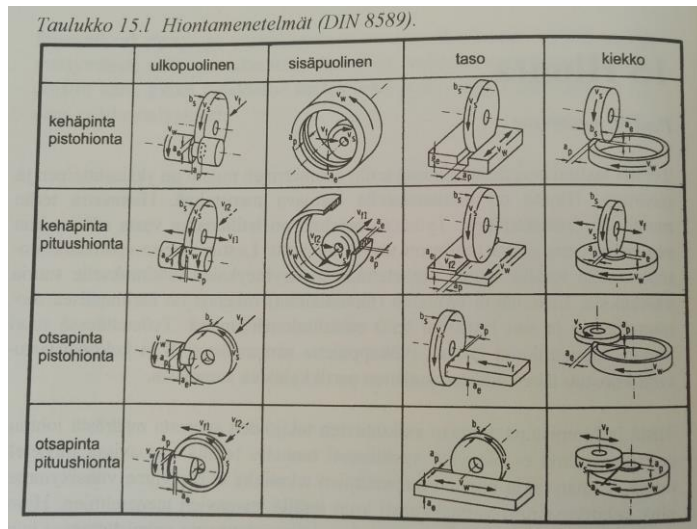
Itseteroittumista ei voi kuitenkaan verrata laadullisesti varsinaiseen hiomalaikan teroittamiseen ja oikaisuun. Oikaisulla saadaan laikkaan vaadittu profiili, joka on kulumisen takia muotoutunut epäsäännölliseksi. Teroituksella huolletaan hiova pinta siten, että lastuavista särmistä saadaan jälleen teräviä. Hiomalaikan teroitus ja oikaisu tehdään yleensä samalla kerralla. (Työkaluterästen hionta 2005, 3.)

Yksi tämän työn tärkeimmistä vaatimuksista oli, että hiomalaikan tulee kulua tasaisesti. Ylimääräistä teroitusvaihetta haluttiin välttää, koska se lisäisi läpimenoaikaa sekä tekisi hiontaprosessin suunnittelusta monimutkaisempaa. Hiomalaikan muodolla ja hiontamenetelmän valinnalla vaikutetaan siihen, miten hiomalaikka kuluu.

## 3.4 Hiontamenetelmät

Hiontamenetelmät jaotellaan yleensä työkappaleen muodon mukaan. Pääasiassa menetelmät jaetaan pyörö – ja tasohiontaan. Pyöröhionta voidaan eritellä sisäpuoliseen ja ulkopuoliseen pyöröhiontaan sekä tasohionta jaotellaan otsa – ja kehähiontaan. Kuvassa 8 on kuvattu nämä edellä mainitut menetelmät sekä taulukossa 3 on kerrottu kuvassa esiintyvien suureiden merkitykset. (Aaltonen ym. 1997, 238.)





KUVA 8. Hiontamenetelmät (Aaltonen ym. 1997. 238.)

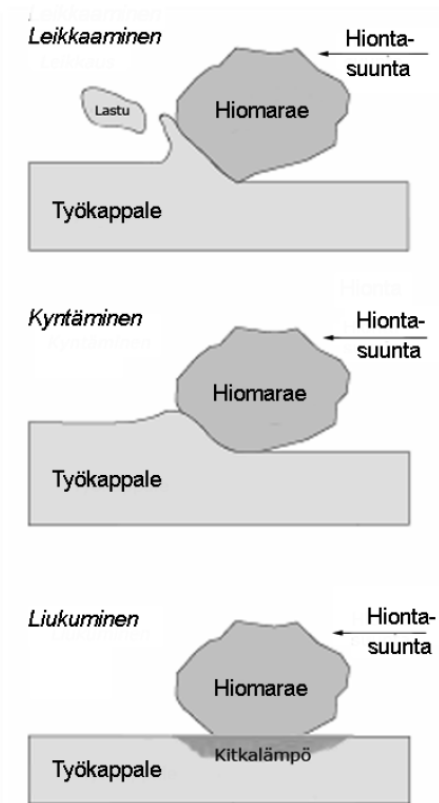
TAULUKKO 3. Hiontamenetelmien suuret. (Aaltonen ym. 1997. 238.)

$V_s$ laikan kehänopeus	$b_s$ laikan leveys
$V_f$ syöttönopeus	$a_e$ asetussyvyys työtasossa
$B_k$ laikan kontaktileveys	$a_p$ asetussyvyys kohtisuorassa työtasoon
$V_w$ työkappaleen kehänopeus	$d_w$ työkappaleen halkaisija

Kaikilla hiontamenetelmillä on teoriassa mahdollista tuottaa yhtä tarkka ja hyvä pinnanlaatu. Kuitenkin käytännön tilanteissa hiontamenetelmän sekä hiomakoneen luonteesta johtuen ei ole aina mahdollista päästä haluttuun hiomatulokseen. Ulkoinen pyöröpistohionta on ongelmattomin, mutta esimerkiksi pituushionnassa syöttövoima voi aiheuttaa työkappaleen ja hiomalaikan välille värähtelyä. Yleensäkin värähtelyä esiintyy työkappaleen ja laikan välillä, kun tarvitaan suurta hiomalaikan pyörimisnopeutta. Värähtelyn lisäksi toinen haitallinen tekijä hionnassa on lämpötilannousu. Varsinkin tasohionnassa, jossa laikan kosketuspinta-ala, lastuamisvoima sekä tehontarve ovat suuria, esiintyy lämpötilan nousua kappaleessa. (Aaltonen 1997, 237–238.)

### 3.5 Lastuamistapahtuma

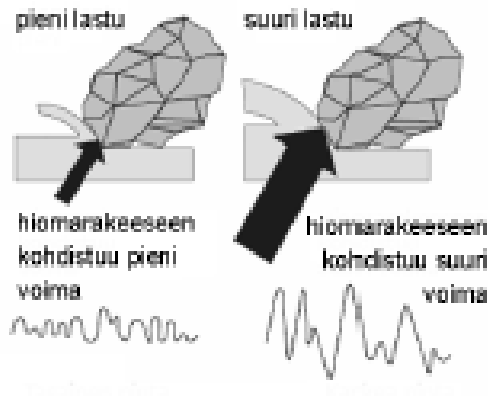
Hionnassa lastuava särmä koostuu hiomarakeista. Kappaletta hiottaessa, suuri määrä hiomarakeita lastuaa työstettävää kappaletta ja kokonaislastuvirta koostuu näiden partikkeleiden summasta. Hiomiselle on tyypillistä, että lastuamisnopeudet ovat suuria ja lastuamissyvyys on pieni. Hiomisessa tapahtuu kappaleen ja hiomarakeiden välillä kolme erilaista kosketusta (kuva 10), jotka ovat leikkaaminen, kyntäminen ja liukuminen (Työkaluterästen hionta 2005, 3.)



KUVA 10. Lastuamistapahtuma (Työkaluterästen hionta 2005, 3.)

### 3.5.1 Lastun paksuus

Hionnassa kappaleen pinnasta irtoaa pieniä lastuja, jotka ovat kooltaan ja muodoltaan epäsäännöllisiä. Kuitenkin keskimääräinen lastun paksuus on aina melko vakio, jos hiontaparametrit pysyvät muuttumattomina. Kun hiomaraakeeseen kohdistuu suuri voima, irtoaa kappaleesta suhteessa suurempi lastu, kuin jos hiomaraakeeseen kohdistuisi pienempi voima. Suuret irtoavat lastut johtavat korkeampaan pinnankarheuteen ja lastukoon pientyminen vaikuttaa päinvastoin. (Työkaluterästen hionta 2005, 3–4.)



KUVA 11. Lastun koko (Työkaluterästen hionta 2005, 3.)

### 3.5.2 Hiontaleikkauskulma

Hionnassa lastuavan särmän rintakulma on lähes aina negatiivinen ja keskiarvoltaan noin  $-30$  -  $-40$  astetta. Hiomarae ulottuu vain hieman sideaineen ulkopuolelle, minkä takia yhden rakeen lastuamissyvyys on pieni. Tämän takia hiomarakeen koolla on suuri merkitys hionnassa. (Aaltonen ym. 1997, 240.)

Kun pyörivä hiomalaikka ja työstettävän kappaleen pinta kohtaavat, alkavat hiottavan materiaalin ja hiomalaikan sideaine hiomarakeineen myötää kimmoisasti. Tämä johtaa lastuamisvoimien kasvamiseen, jolloin hiottavan materiaalin lämpötila nousee ja myötölujuus pienenee. Tästä seuraa plastinen muodonmuutos ja lopulta lastun repeytyminen hiottavasta materiaalista. (Ihalainen ym. 2011, 198.)

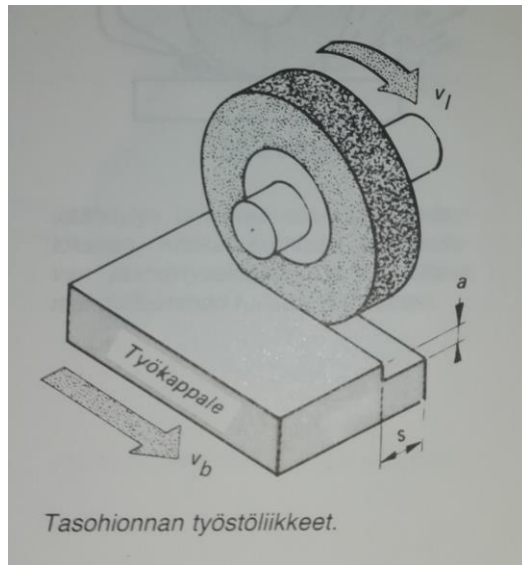
### 3.5.3 Hiontavoimat

Jokaisessa hiomaraakeessa vaikuttavia hiontavoimia, kutsutaan ominaisvoimiksi. Hiontavoimaa, joka muodostuu koko hiomalaikan ja työkappaleen välille, kutsutaan kokonaisvoimaksi. Ominaisvoimien keskiarvo lasketaan jakamalla kokonaisvoima lastuavien särmien määrällä, joka riippuu kosketuspinta-alan koosta ja lastuavien särmien määrästä hiomaradalla. (Työkaluterästen hionta 2005, 3.)

## 3.6 Hionnan työstöarvot

Hionnan työstöarvoja ovat hiomalaikan kehänopeus, kappaleen siirtonopeus, lastuamissyvyys sekä syöttö. Kuvasta 12 voidaan nähdä esimerkki tasohiontaan vaikuttavista

työstöarvoista sekä taulukosta 4 nähdään selitykset kuvan muuttujille. (Ansaharju ym. 1989, 99.) Yhdessä nämä työstöarvot muodostavat hiontaprosessin aineenpoistonopeuden (Työkaluterästen hionta 2005, 4).



KUVA 12. Hionnan työstöarvot (Ansaharju ym. 1989, 99)

TAULUKKO 4. Selitykset työstöarvoille (Ansaharju ym. 1989, 99)

$v_l$	hiomalaikan kehänopeus
$v_b$	kappaleen siirtonopeus
$s$	syöttö
$a$	lastuamissyvyys

Hiomalaikan kehänopeus vaikuttaa lastuavien särmien lukumäärään, jotka poistavat ainetta kappaleen pinnalta. Hiomalaikan valmistaja on määritellyt hiomalaikan maksimiarvon kehänopeudelle. Suositeltava kehänopeus on usein maksimiarvoa pienempi. Yleensä hiomalaikan kehänopeus sekä kappaleen syöttönopeus halutaan pitää suurina, jotta päästään suuren aineenpoistoon. (Ansaharju ym. 1989, 100; Työkaluterästen hionta 2005, 4.)

Kappaleen siirtonopeudella kuvataan sitä nopeutta, jolla kappaletta syötetään pitkin hiomalaikan terää. Hiomalaikan syötöllä kuvataan leveyttä, jolla kappaleen pinnasta poistetaan ainetta. Hionnassa lastuamissyvyys on vaatimaton verrattuna muihin lastuaviin menetelmiin. Lastuamissyvyys on hionnassa millimetrin sadasosista aina kymmenyksiin saakka. (Ansaharju 1989, 99–100.)

Hionnassa aineenpoistonopeus ilmaistaan aikayksikköä kohti  $\text{mm}^3/\text{s}$ . Aineenpoistonopeuteen vaikuttavat hiomalaikan kehänopeus ja laikan koostumus, työkappaleen siirtonopeus, syöttö sekä välillä myös kappaleen koko. Taloudellisista syistä hionnassa pyritään aina suureen aineenpoistonopeuteen, kunhan se ei vaikuta hiomisen laatuun. (Työkaluterästen hionta 2005, 4.)

### 3.7 Lastuamisneste

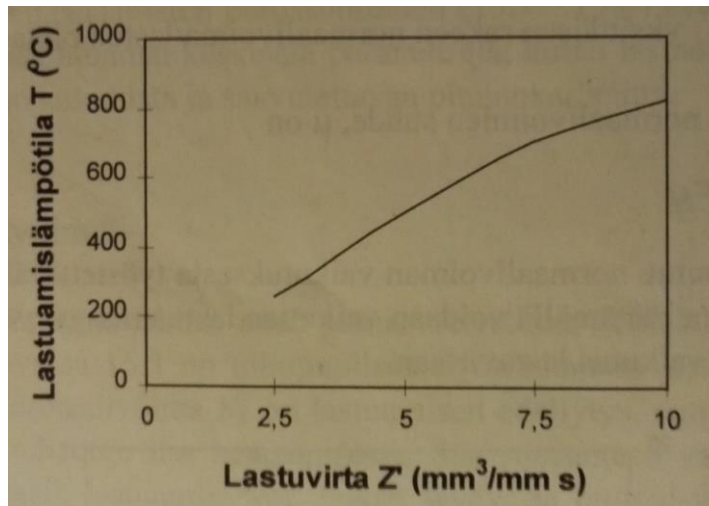
Kuten muissakin lastuavissa työstömenetelmissä, niin myös hionnassa käytetään usein lastuamisnesteitä. Lastuamisnesteiden tehtävänä on jäähdyttää työkappaletta, toimia voiteluaineen vähentäen kitkaa työkappaleen, lastujen ja hiomalaikan välillä sekä poistaa lastuja työstökohdasta. Hionnassa käytetään kolmen tyyppisiä lastuamisnesteitä, jotka ovat vesiseokset, emulsiot ja leikkuuöljyt. (Työkaluterästen hionta 2005, 5.)

Lastuamisnesteiden käyttöä suunniteltuun hiontasovellukseen harkittiin, mutta yrityksen hiomakoneilla tehdyillä testeillä havaittiin, ettei työkappaleen pintaa siirry liikaa lämpöä. Tämän uskotaan johtuvan siitä, että viimeistelyhionnassa poistettava aineenmäärä on melko vähäistä.

### 3.8 Hionnan ongelmat

Hionnassa syntyy ongelmia, jos työssä käytetään vääränlaisia hiomaparametreja, laikkaa tai vääränlaista hiontamenetelmää. Nämä virheet aiheuttavat usein sen, että kappaleen pintakerrokseen tuotetaan turhaa lämpöä eikä ainetta poistu siitä. (Työkaluterästen hionta 2005, 7–8.)

Hionnassa suurimmat lämpötilat syntyvät hiomalaikan ja työkappaleen välisen hankauksen ja lastun liukumisen seurauksena. Lastuamislämpötilat voivat nousta työkappaleen pinnalla jopa yli  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ :een. Lastuamislämpötilaan vaikuttaa työkappaleen materiaalin termiset ominaisuudet, hiomalaikan koostumus, käytetyt työstöarvot sekä mahdollisesti käytettävä lastuamisneste. Kuvasta 13 nähdään lastuvirran vaikutus lastuamislämpötilaan. (Aaltonen ym. 1997, 240.)



KUVA 13. Lastuvirran vaikutus lämpötilaan. (Aaltonen ym. 1997, 244.)

Liiallinen lämpötilan nousu aiheuttaa suuria pintajännityksiä, jotka laukeavat hiomasäröiksi kappaleen pinnalle. Vääränlainen hiomatyökalu tai sen käyttö voi saada aikaan juuri tällaista lämmön nousua kappaleen pinnalla. Hiomasäröt syntyvät yleensä kohtisuoraan hiontasuuntaan nähden, mutta ovat harvoin silmin nähtävissä. Vaurioituneen pintakerroksen tunnistaa parhaiten palojäljistä eli hiotun pinnan värjäytymisestä. Palojälkien sekä hiomasäröjen syntyä voidaan ehkäistä oikeanlaisella jäähdytyksellä sekä teroitetulla hiomalaikalla. Muita hionnan ongelmia sekä niiden ehkäisytapoja nähdään kuvassa 14. (Työkaluterästen hionta 2005, 7–8.)

Ongelma	Toimenpide
Värijäljet	Tarkista, että hiomalaikka on tasapainossa. Tarkista timantin terävyys. Tarkista timantin kiinnitys.
Karkea pinta	Pienennä sivuttaissyöttöä. Laske työkappaleen nopeutta. Vaihda pienemmän raekoon laikkaan. Valitse kovempi laikka.
Palojäljet, hiomasäröt	Tarkista timantin terävyys. Suurena sivuttaissyöttöä. Tarkista, että hiontakohdassa on lastuamislämpötilaa. Käytä pehmeämpää laikkaa.
Laikka kuluu liian nopeasti	Tarkista lastuamisnopeus. Laske hiontasyvyyttä ja muita syöttöjä. Valitse kovempi hiomalaikka.
Täplikkäs pinta	Tarkista, että lastuamislämpötila on puhdasta. Huuhtelee laikan suojuksen puhtaaksi.

KUVA 14. Hionnan ongelmat (Työkaluterästen hionta 2005, 11.)

### 3.9 Hionnan tulokset

Laadukkaan ja mittatarkan hiomatuloksen saaminen vaatii koko hiomisprosessin ja sen muuttujien tuntemista ja hallitsemista. Hiontatyössä hallittavia muuttuvia on erityisen runsaasti. Kuvassa 15 on esitetty yhteenveto tärkeimmistä hiontatulokseen vaikuttavista muuttujista. Hiontatulokseen vaikuttavat neljä tärkeintä osa-aluetta, jotka ovat aineen poistuminen, lastuamisvoimat, lämpötilan nousu sekä työkalun kuluminen. (Aaltonen ym. 1997, 245.)



KUVA 15. Hiontatulokseen vaikuttavat tekijät (Aaltonen ym. 1997, 245.)

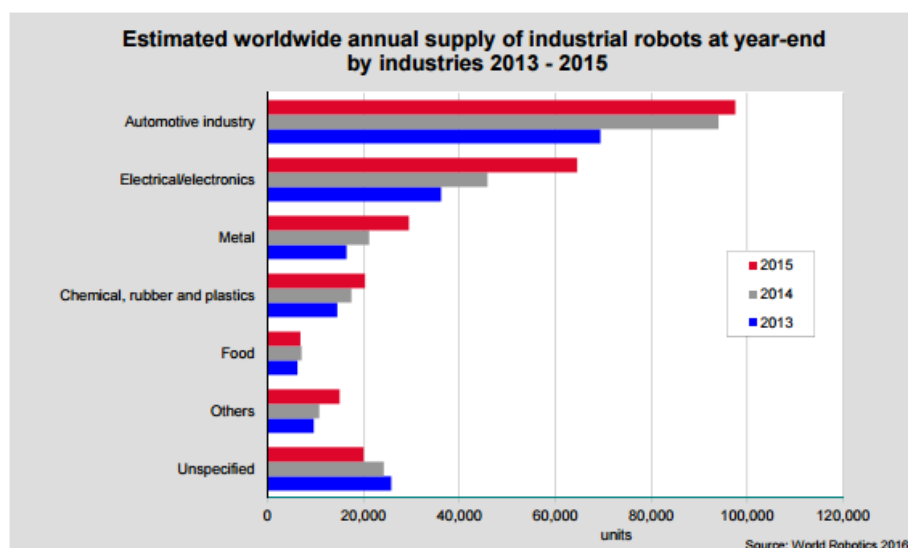
Tässä työssä hiontatapahtuman tärkeimmät muuttujat olivat aineen poistuminen ja työkalun kuluminen. Hiontatuloksesta ei tarvinnut tulla mittatarkkaa, sillä hiottavat pinnat eivät tule olemaan kosketuksissa minkään muun pinnan kanssa. Tämän takia tärkeimpänä kriteerinä oli saavuttaa ulkonäöllisesti laadukas pinnanlaatu.

## 4 TEOLLISUUSROBOTIIKKA

Kansainvälisen robottiyhdistyksen määritelmän mukaan robotti on uudelleen ohjelmoitava, monipuolinen ja vähintään kolminivelinen mekaaninen laite, joka on suunniteltu liikuttamaan kappaleita, osia, työkaluja tai erikoislaitteita ohjelmoitavin liikkein monenlaisien tehtävien suorittamiseksi. (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 13.)

Teollisuusrobotit ovat teollisuuden eri prosesseihin ja työtehtäviin räätälöityjä joustavia automaattisia laitteita, joita ohjaavat ja valvovat tietokoneet. (Arora, Gupta & Westcott 2017, 397.) Teollisuusrobotti on yksinkertaistettuna mekaaninen laite, joka siirtää työkalun kiinnityslaippaa halutulla tavalla. Sen liikerata voi olla erikseen ohjelmallisesti määritelty, perustua toimintaympäristön tapahtumiin tai perustua antureilta saatavaan tietoon. (Robotiikka 2016, 2–3.)

Teollisuusrobotteja käytetään paljon auto-, elektroniikka-, metalli – sekä kemian – ja muoviteollisuudessa (kuva 16). Teollisuusrobotteja käytetään korvaamaan ihmisten tekemää työtä, joka on ihmiselle vaarallista, haitallista tai yksitoikkoista. Niitä käytetään myös töihin, joissa tuotteen laatu – ja tarkkuusvaatimukset ovat korkeat sekä tuotantoprosessilta vaaditaan suurta nopeutta ja tuottavuutta. Robotit pystyvät toistamaan työtehtävän väsymättä sekä työskentelemään ympärivuorokautisesti. Työntekijät, joiden työt on korvattu robotilla, voidaan sijoittaa sellaisiin työtehtäviin, jotka vaativat korkeampaa ajattelu - ja hahmottelukykä sekä sellaisiin työtehtäviin, joita ei ole kannattavaa tehdä robotilla. (Arora ym. 2017, 401–402.)



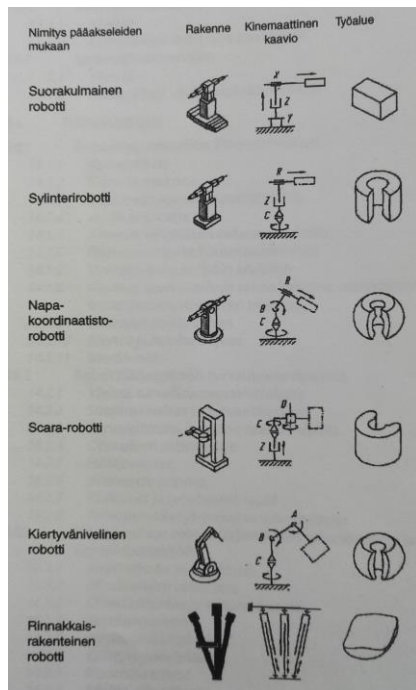
KUVA 16. Robottimarkkinat aloittain. (International Federation of Robotics, 2016)



## 4.1 Robottien rakenteet

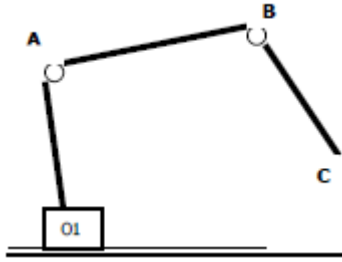
Useat yritykset ovat valmistaneet teollisuusrobotteja ja erilaisia robottimalleja on rakennettu jo useita tuhansia. Yritysten valmistavat robottimallit perustuvat yleensä tiettyihin robottien perusrakenteisiin (kuva 17). (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 12.)

Robottivalmistajat luokittelevat robottinsa myös sen käyttökohteen mukaan, kuten esimerkiksi hitsaus-, materiaalin – ja kappaleenkäsittely-, maalaus- ja kokoonpanorobotteihin. Nykyaikana robotit voidaan luokitella myös siten, että onko robotti yhteistoiminta robotti vai ei. Tällä tarkoitetaan sitä, että voiko robotti työskennellä vuorovaikutuksessa ihmisen kanssa samaan aikaan ja samassa työtilassa. (Bouchard 2014).

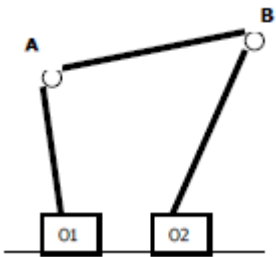


KUVA 17. Yleisimmät robotti rakenteet (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 12.)

Robotit voidaan myös luokitella niiden mekaanisen rakenteen mukaan eli ovatko ne rakenteeltaan kinemaattisesti avoimia vai suljettuja. Suurin osa robottien mekaanisista rakenteista on kinemaattisesti avoimia, jolloin robotin rakenteella pyritään matkimaan ihmisen käden toimintaa paremmin. Tällöin robotin tukivarret ovat kytketty edellisten perään. Poikkeuksena on kuitenkin rinnakkaisrakenteinen robotti, jossa käytetään suljettua kinemaattista rakennetta. Tällöin tukivarret kytketään rinnakkain (kuva 19). (Robotiikka 2016, 28–29.)



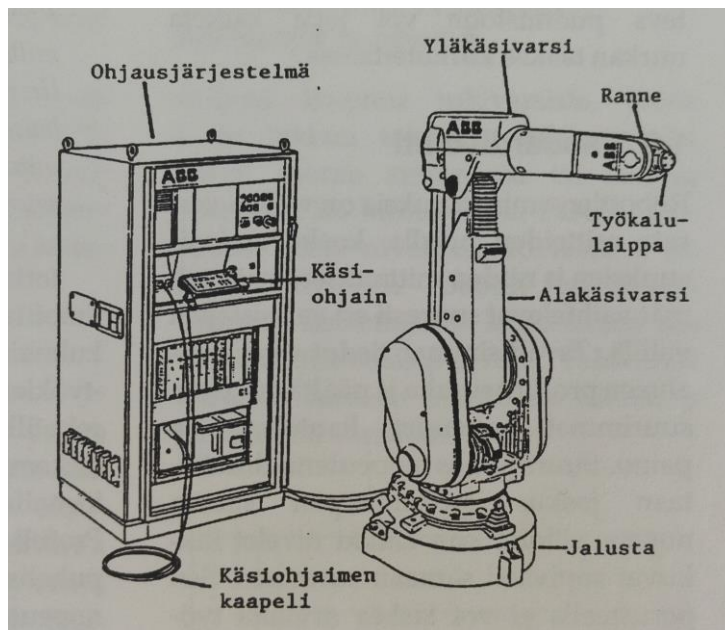
KUVA 18. Kinemaattisesti avoin rakenne (Robotiikka 2016, 29.)



KUVA 19. Kinemaattisesti suljettu rakenne (Robotiikka 2016, 29.)

Yksinkertaistettuna robotin mekaaniseen rakenteeseen kuuluu jalusta, tukivarret sekä työkalun kiinnityslaippa. Jalusta on se osa robotista, jolla se kiinnitetään lattiaan, seinään tai kattoon. Jalusta voi olla myös kiinnitetty lineaarijohteelle, jolloin robotti voi liikkua eri työasemien välillä. Jalustaan on kiinnitetty tukivarret peräkkäin tai rinnakkain sekä niiden päässä on työkalun kiinnityslaippa, johon robotin tarrain tai työkalu kiinnitetään (kuva 20). (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 13; Robotiikka 2016, 11.)

Robotti koostuu useista tukivarsista, joista kaksi liikkuu toistensa suhteen, joka suoran suuntaisesti tai suoran ympäri. Yleensä tätä akselia kutsutaan robotin niveleksi ja näiden nivelien avulla tukivarret muuttavat keskinäisiä asentojaan ja asemiaan. Robotiikassa yhtä perusliikettä eli niveltä kutsutaan vapausasteeksi. (Robotiikka 2016, 28.)



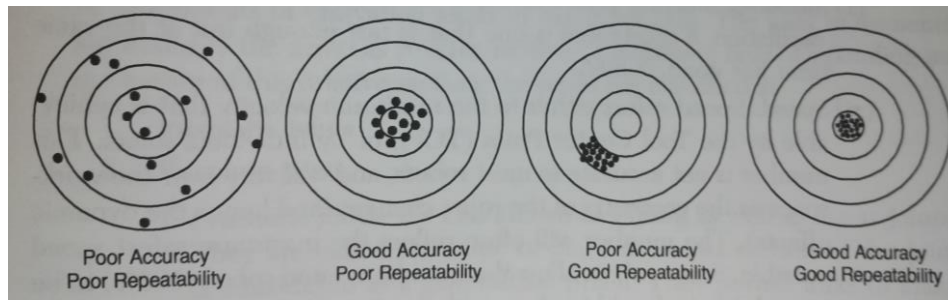
KUVA 20. (Suomen Robottiikkayhdistys Ry 1999, 13.)

Yhtä niveltä kohti on yleensä yksi toimilaite. Toimilaite tuottaa tehon, joka saa nivelten avulla robotin liikkumaan. Nykyaikana toimilaitteena toimii usein takaisinkytketty servo-ohjattu sähkömoottori. Sähkömoottoreilla saadaan aikaan tarpeeksi suuri robotin nostovoima sekä hyvä tarkkuus. Robotin voimanlähteenä voi olla myös hydraulinen tai pneumaattinen toimilaite. Suurta voimaa ja vääntöä vaativissa työtehtävissä käytetään hydraulikkaa robotin voimalähteenä, kun taas pneumatiikalla saadaan aikaan suuria nopeuksia (Arora ym. 2017, 404.)

## 4.2 Robottityypit ja käyttösovellukset

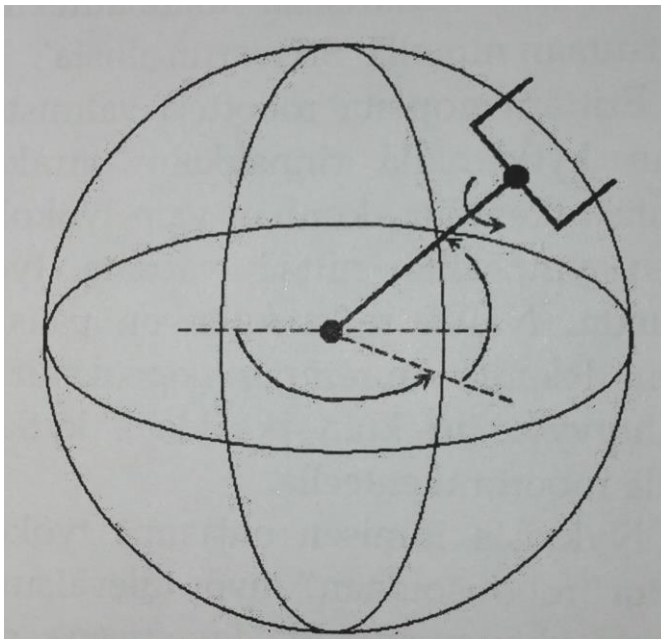
Robotin käyttösovellus määrittelee sen tarkkuuden, jonka rajoissa robotin on pystyttävä toimimaan. Lähes kaikkien robottien tarkkuus on  $\pm 1$  mm, mutta nykyisin roboteilla pystytään toimimaan paljon paremmilla tarkkuuksilla. Esimerkiksi kokoonpanoroboteilta vaaditaan parempaa tarkkuutta, jolloin asemointitarkkuuden on oltava  $\pm 0,05$ – $0,1$  mm. (Robottiikka 2016, 11.)

Robotin tarkkuus voidaan jakaa absoluuttiseen tarkkuuteen sekä toistotarkkuuteen. Hyvällä absoluuttisella tarkkuudella robotti liikkuu asetusarvoon tarkasti sekä hyvällä toistotarkkuudella robotti pystyy liikkumaan samaan pisteeseen useasti (kuva 21). (Arora ym. 2017, 411.)



KUVA 21. Robotin tarkkuus. (Arora ym. 2017, 411.)

Toinen robotin tärkeä ominaisuus on sen ulottuma ja työalueen muoto. Esimerkiksi kuudella vapausasteella, joista vähintään kolme on kiertyviä, robotti pystyy asemoimaan työkalunsa mihin tahansa asentoon 3D -ympäristössä (kuva 22). Tällöin siis, jos robotin omaa mekaanista rakennetta ja nivelten rajoituksia ei oteta huomioon. (Arora ym. 2017, 406.)



KUVA 22. Työkalun asemointi 3D -ympäristössä (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 18.)

Kolmas tärkeä ominaisuus, jonka robotin käyttösovellus määrittelee, on robotin kantokyky. Kappaleenkäsittely roboteilta vaaditaan kymmenien kilojen kantokykyä, sekä suurimmat teollisuusrobotit nostavat jopa satojen kilojen massoja. Eri käyttösovelluksiin on suunniteltu rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan erilaisia robotteja, joilla kullakin on omat vahvuutensa tietyllä osa-alueella. (Robotiikka 2016, 11.)

#### 4.2.1 Suorakulmaiset robotit

Rakenteeltaan suorakulmaisten robottien kolme ensimmäistä vapausastetta ovat lineaarisia. Suorakulmainen robotti on joko portaali - tai karteesinen robotti. Portaalirobotti on tuettu työalueen kulmista palkeilla, joka tekee sen rakenteesta tukevan (kuva 23). Tämän takia niitä käytetään usein logistiikka – ja varastosovelluksissa. Karteesisen robotin liikkeet ovat samanlaisia kuin portaalirobotissa, mutta se on vain yhden tukijalan varassa (kuva 24). Niitä käytetäänkin kevyiden ja pienten kappaleiden nosteluun sekä koonpanotehtäviin. (Robotiikka 2016, 12; Javanmiri 2011, 9–11.)



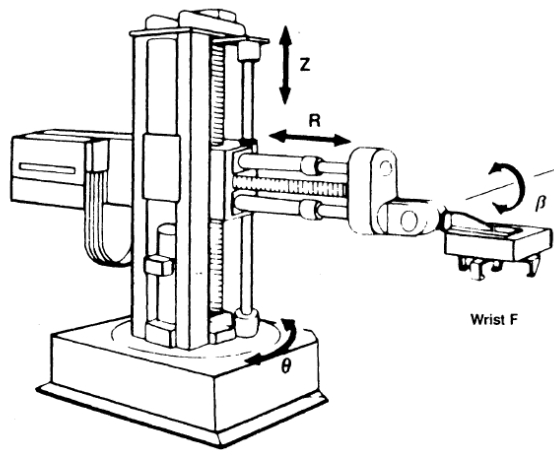
KUVA 23. Suorakulmainen robotit. (Robotiikka 2016, 12.)



KUVA 24. Karteesinen robotti. (Robotiikka 2016, 12.)

#### 4.2.2 Sylinterirobotit

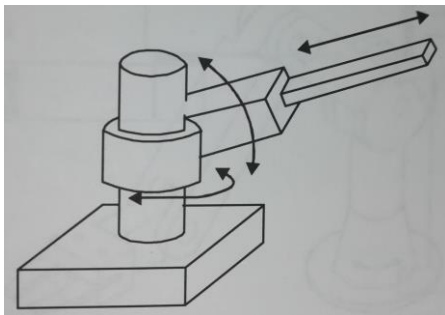
Sylinterirobottien koordinaatisto on nimensä mukaan sylinterin muotoinen. Sylinterirobotit muistuttavat suorakulmaistarobottia, mutta kahden lineaarisesti liikkuvan nivelen lisäksi yksi nivel on kiertyvä (kuva 25). Sylinterirobotteja on käytetty elintarviketeollisuudessa, mutta nykyisin ne ovat harvinaisia. (Robotiikka 2016, 15; Javanmiri 2011, 14–15.)



KUVA 25. Yleiskuva sylinterirobotista. (Robotiikka 2016, 15.)

#### 4.2.3 Napakoordinaatistorobotit

Napakoordinaatistorobotin akseleista kaksi on kiertyviä ja yksi lineaarinen (kuva 26). Näin ollen sylinterirobottiin verrattuna sen työalueesta on saatu pallomainen. Tällaisia robotteja voidaan käyttää työtehtävissä, joissa ei tarvita montaa vertikaalista liikettä. (Arora ym. 2017, 417–418; Javanmiri 2011, 16.)

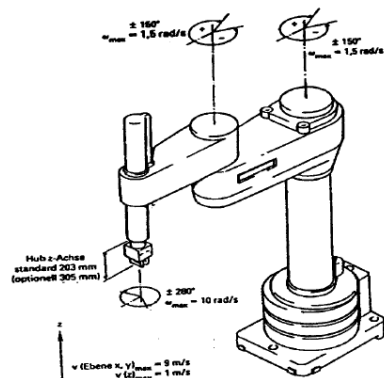


KUVA 26. Yleiskuva napakoordinaatistorobotista. (Arora ym. 2017, 417.)

#### 4.2.4 SCARA -robotit

Scara -robotit (Selective Compliance Assembly Robot Arm) ovat tiettyyn suuntaan joustavia robottikäsiä (kuva 27). Scara -roboteissa on yleensä vain neljä vapausasetta, joista kolme on vaakatasossa kiertyviä ja yksi on pystysuuntaisesti lineaarinen. Työkaluvarsi liikkuu vain yhteen suuntaan ja tämä suunta on lähes poikkeuksetta lineaarisesti työpinnan suuntainen. Scara -robotit ovat erittäin nopeita, mutta ne sopivat rakenteensa takia vain kevyiden kappaleiden liikuttamiseen. Niitä käytetäänkin erityi-

sesti pienten kappaleiden poimintaan ja kokoonpanotyöhön etenkin elektroniikkateollisuudessa. (Robotiikka 2016, 13; Javanmiri 2011, 11–12.)



KUVA 27. Yleiskuva Scara -robotista. (Robotiikka 2016, 13.)

#### 4.2.5 Kiertyväniveliset robotit

Kiertyväniveliset robotit ovat teollisuuden yleisimpiä robotteja. Niillä on suurehko ulottuvuus, mutta melko pieni kuormankantokyky. Kiertyväniveliset robotit ovat monipuolisia robotteja ja niitä käytetään esimerkiksi hitsauksessa, hionnassa, kokoonpanossa ja särmäyksessä (kuva 28). Tämän tyyppisissä roboteissa ovat kaikki vapausasteet kiertyviä ja vapausasteita on roboteissa yleensä neljä tai kuusi. Joissain kiertyvänivelisissä robottimalleissa on jopa seitsemän vapausastetta, jolla pyritään parempaan kurottelukykyyn. (Robotiikka 2016, 14; Arora ym. 2017, 418–419.)



KUVA 28. Kiertyvänivelinen robotti. (Robotiikka 2016, 14.)

#### 4.2.6 Rinnakkaisrakenteiset robotit

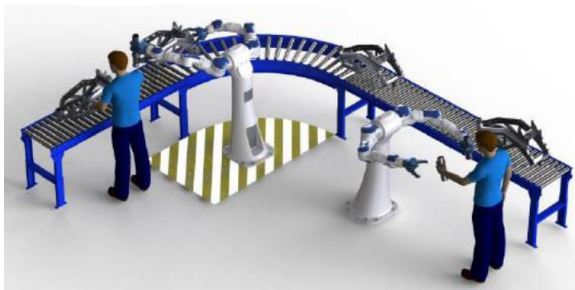
Rinnakkaisrakenteisissa roboteissa vapausasteita ja toimilaitteita on kytketty rinnakkain. Tällainen suljettu kinemaattinen rakenne mahdollistaa suuremman kantokyvyn sekä käsivarren jäykkyyden kuin perinteisimmillä rakenteilla. Rinnakkaisrakenteisten robottien tilantarve on suuri, mutta niillä on suhteellisen pieni työalue (kuva 29). Ultrakevyellä ja jäykällä rakenteella saavutetaan suuret työstövoimat ja nopeudet. Rinnakkaisrakenteisia robotteja käytetään erilaisiin poimintasovelluksiin. (Robotiikka 2016, 16–17; Javanmiri 2011, 15–16.)



KUVA 29. Rinnakkaisrakenteinen robotti. (Robotiikka 2016, 16.)

#### 4.2.7 Yhteistoiminta robotit

Yhteistoiminta robotit edustavat uutta teknologiaa, jossa yhdistyy robotin helppo ja yksinkertainen ohjelmointi, pienet asennustilavaatimukset sekä turvallisuus, jolloin työntekijät voivat työskennellä robotin vierellä ilman turva-aitoja (kuva 30). Niillä voidaan tehdä samoja työtehtäviä kuin perinteisillä teollisuusroboteilla, mutta pienemmillä laitteilla ja huomattavasti joustavammin. (Robotiikka 2016, 17–19.)



KUVA 30. Yhteistoiminta robotit. (Robotiikka 2016, 17.)

Yhteistoiminta robotit ovatkin parhaimmillaan pienissä ja keskisuurissa valmistavan teollisuuden yrityksissä, joissa työt vaihtuvat usein ja tuote-erät ovat pieniä sekä työte-



kijöiltä ei löydy tarvittavaa osaamista perinteisten robottien ohjelmointiin. (Robotiikka 2016, 17–19.)

Yhteistoiminta robotit ovat rakenteeltaan yleensä kiertyvänivelisiä robotteja, joissa on yksi tai kaksi käsivartta. Tärkeimpänä ominaisuutena niissä on jatkuva voiman mittaus. Hitaasti liikkuvat yhteistoimintarobotit ovat myös muotoiltu siten, että ne eivät aiheuta vahinkoa ihmiselle, vaikka osumia sattuisikin. (Robotiikka 2016, 17–19; Bouchard 2014.)

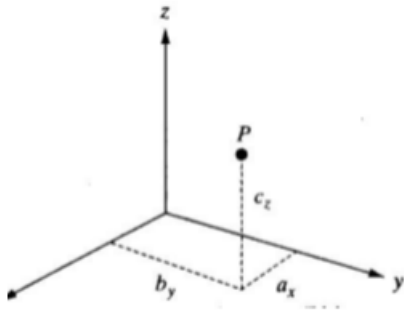


KUVA 31. Kiertyvänivelinen robotti kahdella käsivarrella. (Robotiikka 2016, 14.)

Tällä hetkellä yritykset ovat vasta alkaneet ostaa ensimmäisiä yhteistoiminta robottejaan lähinnä yksinkertaisiin kokoonpanotehtäviin. Kuitenkin tulevaisuudessa yhteistoiminta robotit tulevat yleistymään enemmän vaativissa työtehtävissä kuten hitsauksessa ja hi-onnassa. (Robotiikka 2016, 17–19; Laitinen 2017.)

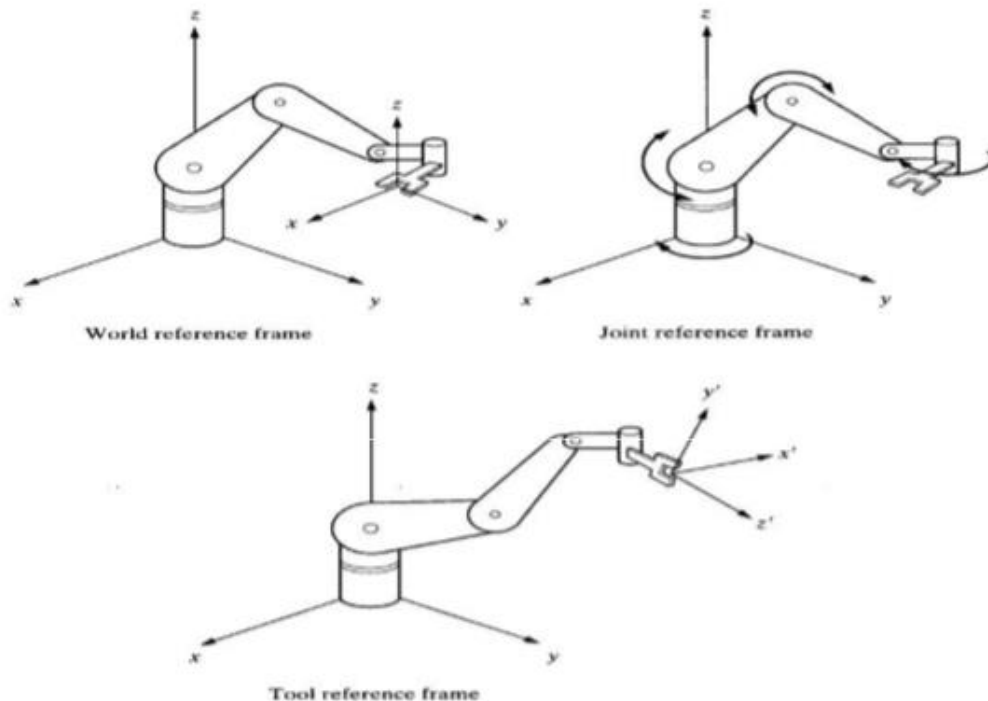
### 4.3 Geometriset muuttujat ja kinematiikka

Kappaleen asema avaruudessa määritellään sen paikan ja suunnan mukaan. Kappaleeseen kiinnitetään koordinaatisto, jonka origo ilmaisee sen paikan ja jonka akseleiden yksikkövektorit osoittavat sen suunnan toiseen koordinaatistoon nähden (kuva 32). (Airiila 1999, 1.)



KUVA 32. Pisteen esitysmuoto 3D -avaruudessa (Robotiikka 2016, 30.)

Robotilla on kolme koordinaatistoa, jotka ovat maailma-, perus -ja työkalukoordinaatisto (kuva 33). Maailmakoordinaatisto on ulkopuolinen koordinaatisto, joka on sidottu robotin työskentely-ympäristöön. Tavallisesti robotin peruskoordinaatisto sijoitetaan robotin jalustaan, mutta se voidaan sijoittaa myös muualle laskennallisesti helpompaan kohtaan, esimerkiksi lattiatasoa ylemmäksi. Yleensä peruskoordinaatisto sijoitetaan siten, että Z-akseli yhtyy ensimmäisen vapausasteen akseliin. ja X-akseli osoittaa ensimmäisen nivelen työalueen keskikohtaan sekä XY-taso on sidottu työalueen lattiaan. (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 20–21.)



KUVA 33. Robotin koordinaatistot (Robotiikka 2016, 43.)

Työkalukoordinaatisto sidotaan kiinni haluttuun kohtaan robotin työkalua. Esimerkiksi hitsauksessa valokaari kohtaa kappaleen noin 10mm päässä hitsaussuuttimesta, joten on järkevä asettaa koordinaatisto irti suuttimen päästä. (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 21.)

### 4.3.1 Kinematiikka

Kinematiikka on dynamiikan osa ja sillä tarkoitetaan mekanismin liikkeen tutkimista huomioimatta siihen vaikuttavia voimia ja momenteja. Kinemaattisen tarkastelun kohteena on pisteen tai kappaleen asema, nopeus ja kiihtyvyys eri ajanhetkinä. Kinematiikka avulla robotin ohjausjärjestelmä hallitsee robotin liikkeitä. (Airila 1999. 2–3.)

Ohjausjärjestelmä voi hallita robotin liikkeitä laskennallisesti suoralla kinematiikalla tai käänteisellä kinematiikalla. Suorassa kinematiikassa robotin akseleiden nivelkulmat ovat tiedossa ja niiden avulla lasketaan työkalulaipan asema eli missä työkalukoordinaatiston origo sijaitsee. Kun taas käänteisessä kinematiikassa tunnetaan työkalulaipan asema, jonka avulla lasketaan robotin nivelkulmat. Käänteinen kinematiikka on haastavampi ratkaista matemaattisesti. (Billing, M. 2012, 17.)

Robotin kinemaattinen ketju koostuu nivelpisteistä, jotka ovat liitetty toisiinsa. Ketjun alkupäässä on robotin peruskoordinaatisto ja ketjun loppupäässä on työkalukoordinaatisto sekä niiden välissä on niveliä, joille on myös määritetty koordinaatistot. Kahden koordinaatiston paikkaa ja asemaa toisiinsa nähden voidaan esittää siirtomatriisin avulla (kuva 34). Kun yhdistetään kaikki kinemaattisen ketjun siirtomatriisit, pystytään työkalukoordinaatisto paikka ja asento ratkaisemaan robotin peruskoordinaatistossa. (Billing 2012, 11–13.)

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

KUVA 34. Siirtomatriisi (Robotiikka 2016, 33.)

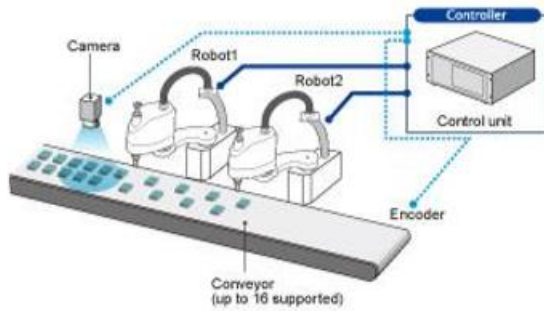
#### 4.4 Robotin ohjausjärjestelmä ja aistinjärjestelmät

Ohjausjärjestelmä on robotin aivot. Ohjausjärjestelmän tehtävinä on muuntaa sille annetut toiminnot liikekäskyiksi, ohjata liikekäskyillä takaisinkytkettyjen toimilaitteiden toimintaa sekä seurata näiden liikekäskyjen ja toimilaitteiden suoritusta. Ohjausjärjestelmän tehtäviin kuuluu myös työympäristön havainnointi antureiden avulla ja robotin sisäisen toiminnan tarkkailu. (Robotiikka 2016, 44–45.)

Nykyään robottien ohjausjärjestelmässä käytetään reaaliaikaisia prosessitietokoneita, joiden avulla voidaan robotin toimilaitteita ohjata jopa tuhansia kertoja sekunnissa. Ohjausjärjestelmä koostuu tavallisesti keskusyksiköstä, massamuistista, käsiohjelmointilaitteesta, ulkoisista liitännöistä ja akseleiden servo-ohjauskorteista. (Robotiikka 2016, 44.)

Anturilla kerätään tietoa prosessin ja koneen tilasta. Antureilla muodostetaan roboteille aistit, jotta ne voivat toimia joustavasti olosuhteiden muuttuessa. Ilman antureita robotit olisivat vain pelkkiä koneita. Robotin antureiden mittaustarpeet keskittyvät pääasiassa aseman, nopeuden tai voiman mittaamiseen, mutta on myös joitain sovelluksia, joissa tarvitaan kiihtyvyyden ja vääntömomentin mittaamista. Robotin anturit voidaan jakaa sen mukaan mittaavatko ne robotin omaa toimintaa vai ympäristön olosuhteita. (Arora ym. 2017, 441–442; Airila 1999, 1.)

Konenäköjärjestelmät ovat kameratekniikalla sekä ohjelmistoilla toteutettua kappaleen tai muodon tunnistusta. Konenäköjärjestelmien hyödyt on tunnettu tuotantoautomaatiossa ja robotiikassa jo pitkään, ja nykypäivänä ne ovat yleistyneet runsaasti (kuva 36). Konenäköjärjestelmät voidaan karkeasti luokitella kolmeen ryhmään, jotka ovat kappaleen sijainnin ja aseman määrittäminen, kappaleen tunnistus ja luokittelu sekä kappaleen mittaus.



KUVA 36. Robotin konenäköjärjestelmä (Robotiikka 2016, 64.)

#### 4.5 Työkalut ja tarttijat

Työkalun avulla robotti pystyy käsittelemään tai työstämään työkappaletta. Työkalu voi olla kiinnitettynä robotin työkalulaippaan tai integroituna sen runkoon. Jos robotille on suunniteltu vain yksi työtehtävä, kuten maalaus, on robotin työkalu usein integroituna sen runkoon. Muussa tapauksessa työkalu kiinnitetään robotin työlaippaan, sekä robotti voi myös käyttää erillistä työkalun vaihtojärjestelmää (kuva 37). Tällöin robotilla on usein erillinen työkaluasema, jossa on useita työkaluja, ja josta se osaa automaattisesti vaihtaa työkalun. (Robotiikka 2016, 56.)



KUVA 37. Robotin työkalun vaihtojärjestelmä (Robotiikka 2016, 61)

Työkaluja ovat yleensä erilaiset tarttijat ja prosessityökalut. Tarttujalla tartutaan kappaleeseen ja viedään se johonkin ulkopuoliseen kohteeseen (kuva 38). Tarttujaa käytetään yleensä kokoonpanotehtävissä tai jos halutaan muokata työkappaletta ulkopuolisella työkoneella.



KUVA 38 Robotin tarttumat (Robotiikka 2016, 58)

Toinen vaihtoehto on, että työkappale on paikallaan ja robotti muokkaa työkappaletta erillisellä prosessityökalulla. Tavallisia prosessityökaluja ovat erilaiset hitsauspäät (kuva 40), maalaussuuttimet, jäysteenpoisto - ja hiomalaitteet (kuva 39), polttoleikkaimet, valukauhat sekä ruuvaustyökalut ja niittauslaitteet. Jos robottiin on integroitu kääntöpöytä, voidaan sillä käänellä työkappaletta, joka yksinkertaistaa ja nopeuttaa robotin ohjelmointia esimerkiksi hitsaamisessa. (Robotiikka 2016, 56, 62–63.)



KUVA 39. Paineilmakara (Laitinen 2015, 79)



KUVA 40. Kaarihitsaus työkalu (Robotiikka 2016, 63)

## 4.6 Robottien ohjelmointi

Robotin ohjelmoinnin tarkoituksena on laatia toimintajärjestys ja logiikka, jotta robotinkäsivarsi voi toteuttaa työkalun liikkeen halutulla tavalla. Ohjelmoinnin tarkoituksena on tahdistaa käsivarren liikkeitä ympäristön signaaleihin nähden sekä välittää liikkeistä tietoa mahdollisiin muihin laitteisiin. Robotin ohjelmassa on määriteltävä myös robotin toiminta virhetilanteissa. Robottien ohjelmointia voidaan tehdä kolmella tavalla, jotka ovat johdattamalla ja opettamalla ohjelmointi sekä etäohjelmointi. (Robotiikka 2016, 47.)

## 4.7 Johdattamalla ohjelmointi

Johdattamalla ohjelmoinnissa robotin operaattori ohjaa lihasvoimin robotin käsivartta ja työkalua samalla, kun robotti tallentaa niveliensä asentojen ja asemien paikkaa (kuva 41). Ennen johdattamalla ohjelmointi oli hankalaa, sillä robotit käsivarren toimilaitteet piti erikseen vapauttaa sekä robotit olivat raskaita. Nykyään robotteja on kevyt käsitellä ja paikanmittausjärjestelmät ovat kehittyneet tarkemmiksi. Yhteistoiminta robottien ja voimaohjauksen yleistyttyä, on johdattamalla ohjelmoinnista kehittynyt nopein ja helpoin tapa ohjelmoida robotteja tietyissä työtehtävissä. (Robotiikka 2016, 48–49.)



KUVA 41. Johdattamalla ohjelmointi (Robotiikka 2016, 49.)

## 4.8 Opettamalla ohjelmointi

Opettamalla ohjelmoinnilla robotin työkalua ohjataan haluttuun paikkaan robotin käsiohjaimen (kuva 42) avulla ja paikka tallennetaan muistiin. Näistä tallennetuista pis-

teistä koostuu robotin ohjelma, joka voidaan viedä tekstimuotoon päätteelle, jossa sitä voidaan muokata vielä paremmaksi. Käsiohjaimen avulla robotille voidaan opettaa jokin työrutiini kerran esim. työkappaleen sivun hitsaus tai työkalun vaihto, ja tästä rutiinista voidaan luoda aliohjelma. Kutsumalla ja käyttämällä aliohjelmia sekä hyppykäskyjä, saadaan robotin ohjelmoinnista nopeampaa sekä robotin ohjelmasta lyhyempi ja yksinkertaisempi. (Robotiikka 2016, 49–51.)

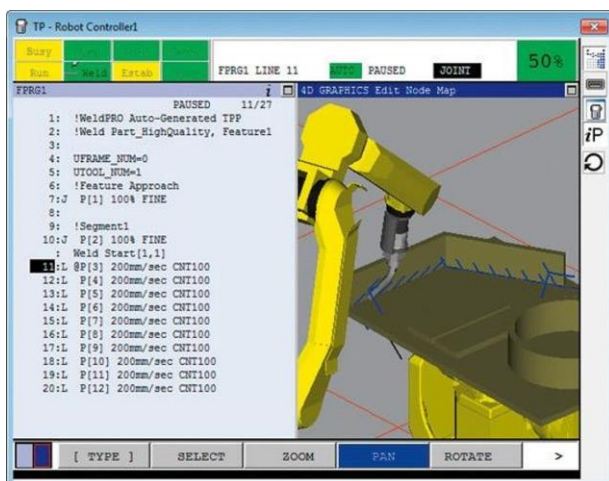


KUVA 42. Robotin käsiohjain (Robotiikka 2016, 49)

#### 4.9 Etäohjelmointi

Nykyaikana robotteja etäohjelmoidaan mallipohjaiseen tietoon perustuen. Robottien mallipohjainen ohjelmointi tarkoittaa robotin ohjelmointia ilman fyysistä robottia siten, että ulkopuolisella tietokoneella toimitaan graafisessa 3D -ohjelmointiympäristössä. Tällä työkalulla ohjelmointiin ja simulointiin käytetään todennukaisia robotin, sen oheislaitteiden ja työkappaleiden 3D -malleja. Simulointimallissa robotin liikkeitä ja nopeuksia sekä työkalun asentoja on helpompi testata ja muokata kuin todellisella robotilla tehtyjä (kuva 43). Valmis ja simuloitu ohjelma voidaan siirtää myöhemmin robotin ohjaimen, jonka jälkeen robotti voi suorittaa ohjelman. (Arora ym. 2017, 484–485; Robotiikka 2016, 51–52.)





KUVA 43. Etäohjelman simulointi (Laitinen 2015, 38)

CAD -mallin monimutkaisten liikeratojen ratojen ohjelmointiin voidaan käyttää piirre-pohjaista ohjelmointitapaa, joka nopeuttaa ja helpottaa robotin ohjelmointia. Piirre tarkoittaa työkappaleen ominaisuutta, jonka valmistaminen vaatii tietynlaista menetelmää. Ohjelmointijärjestelmään on tallennettu näitä piirteitä, josta ne voidaan nopeasti hakea ja muokata kappalekohtaisesti. Piirteitä voi olla esimerkiksi laipan ympärihitsaus tai kaarihitsauksessa hakupisteiden luonti. (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 85.)

Etäohjelmoinnin vahvuutena on, verrattuna muihin robottien ohjelmointi menetelmiin, että robottien ei tarvitse lopettaa tuotantotyötään ohjelmoinnin ajaksi. Mallipohjainen ohjelmointi on järkevä valinta, kun valmistusprosessi edellyttää robotilta suurta määrää paikoituspisteitä, tuotesuunnittelu käyttää 3D CAD-järjestelmiä, tuotanto on asiakasohjautuva sekä, jos robotteja ei voida ohjelmoida paikan päällä. (Robotiikka 2016, 53.)

## 5 HIONNAN AUTOMATISOINTI

Yleisesti tuotantoprosessin automatisointia aletaan harkita, kun halutaan raskas ja vaarallinen työtehtävä poistaa, tuottavuutta parantaa tai kapasiteettiä lisätä, sekä tuotannolta vaaditaan parempaa ja tasaista laatua. Automatisointiin voi ajaa myös halu parantaa yritys- ja tuoteimagoa tai puute ammattitaitoisista työntekijöistä. Automaation tavoitteena on tuotteiden lyhyemmät läpäisyajat. Sen etuina ovat työprosessin myös toistettavuus sekä työvoimakustannussäästöt, jolloin prosessi voidaan ajaa miehittymättömänä ympäri vuorokauden. (Arora ym. 2017, 3–5, 9–10.)

Käsin tehtävä hiontatyö on raskasta, väsyttävää, likaista ja vaarallista työtä. Vanhempien työntekijöiden eläköityessä on yhä vaikeampi löytää osaavaa työvoimaa suorittamaan konepajateollisuuden hiontatöitä. Samaan aikaan robottiteknologia kehittyy ja innovatiivisia hiontasovelluksia ilmestyy markkinoille. (Butler 2016, 1.)

Kun päätös hiontaprosessin automatisoinnista on tehty, voidaan selvittää, mikä laiteratkaisu olisi sopivin yrityksen hiontaprosessille. Kappaleita voidaan hioa automaattisesti CNC -ohjatuilla työstökoneilla tai robotilla. Molempia laitteita voidaan käyttää yhdessä, jolloin robottia käytetään työstökoneen panostuksessa (kuva 44). (Butler 2016, 2; Robotiikka 2016, 68.)

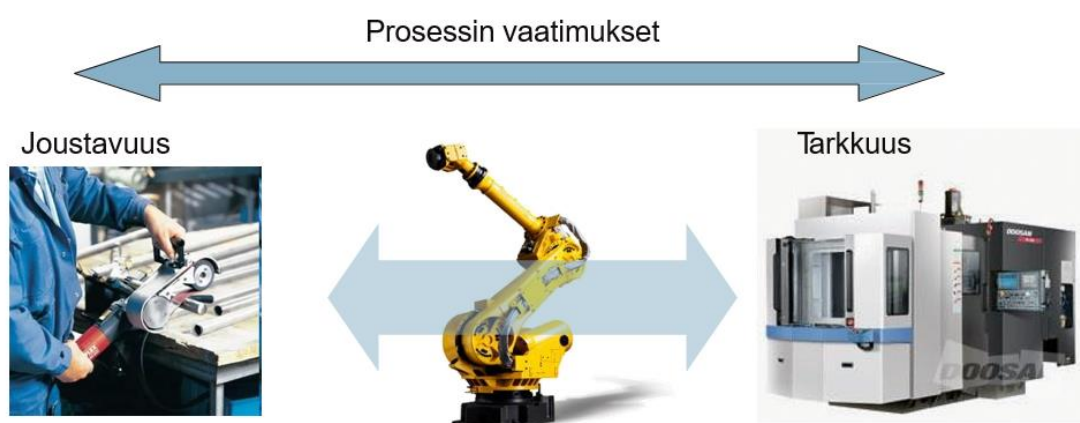


KUVA 44. Työstökoneen panostus (Laitinen 2015, 24)

Työstökoneet ovat nopeampi sekä niillä saavutetaan tarkempi hiontatulos, mutta robotin etuna ovat sen sijaan monipuolisuus ja joustavuus. Robotti voi hioa työkappaletta tarttujansa ja ulkoisen hiomakoneen avulla tai robotin käsivarren päähän voidaan asentaa hiomatyökalu. Robotilla pystytään myös paremmin matkimaan ihmistyöntekijän hionta-

liikkeitä ja -voimia. Työstökoneet ovat helpommin ohjelmitavia kuin robotit. Kuitenkin robottien ohjelmointia kehitetään jatkuvasti sekä teknisen alan kouluissa opetetaan robottien etäohjelmointia ja simulointia. Robotilla pystytään tekemään myös muita kappaleen valmistuksen työvaiheita, kuten esimerkiksi kappaleiden lastaaminen lavalle. (Butler 2016, 2)

CNC -työstökoneet sopivatkin robottia paremmin suurten tuote-erien ja muodoltaan samankaltaisten osaperheiden hiontatyöhön. Robotti taas sopii keskikokoisten tuoteerien ja muodoltaan eri kokoisten kappaleiden hiomiseen (kuva 45). Käsien hiomisella edelleen tarvetta töissä, joissa kappaletta ei voida siirtää hiontapisteelle tai hiomista ei ole kannattavaa tehdä robotilla. (Laitinen 2015, 87.)



KUVA 45. Hiontaprosessin vaatimukset (Laitinen 2015, 87) muokattu

## 5.1 Hionnan robotisointi

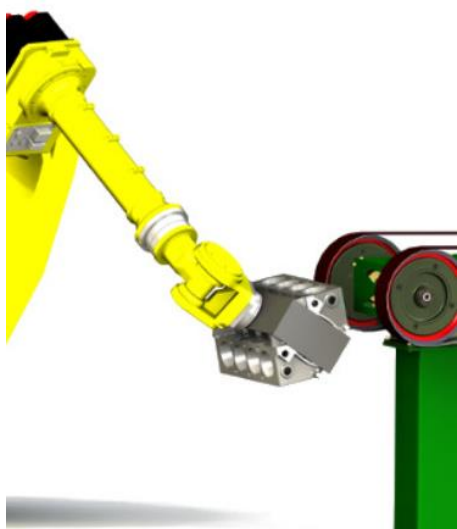
Hionnan automatisoinnin suurimmat haasteet ovat kappaleiden geometriavirheet ja aineenpoiston määrän vaihtelu sekä hiomalaikan tai -nauhan kuluminen. Robotin osalta hiontatyön haasteita ovat robotin tarkkuusvirheet ja sen ohjelmointi sekä kappalelogistiikka. Robotilla tehtävässä hiontatyössä on myös huomioitava rajoitteet, kuten esimerkiksi robotin nostokyky ja robotin työkalun tartunta-alue sekä työstökoneen liikealue ja -työkalut. Hiontaprosessin epätasaisuudesta ja robotin jäykästä ohjauksesta johtuen tasan lastuvirran tuottaminen on hankalaa ja prosessin hallinta vaikeaa. Ratkaisuna ongelmiin, robotilla hiomiseen käytetään joustavia työkaluja tai työkalupitimiä. Jousta-

vuutta saadaan myös joustavien nivelien, voimaohjauksen sekä reaaliaikaisen radankorjauksen avulla. (Billing 2012, 27; Ihalainen ym. 2011, 460; Laitinen 2015, 71.)

Voima – ja etäisyysantureiden sekä konenäkökameroiden käyttö helpottaa hiontaprosessin hallintaa ja robotin ohjelmointia. Nykyaikana etäohjelmoinnin ja CAD -mallituotetiedon käyttäminen yhdessä robotin voimaohjauksen kanssa, on yksi varteenotettava vaihtoehto hiontatyön automatisointiin. Myös erilaiset hiontatyöstösolut ja automaattiset hiontakoneet ovat lisänneet valinnanvaraa robotin tehtävän hiontatyön suorittamiseksi. (Laitinen 2017; Weszelovszky 2017).

## 5.2 Robotilla hiomisen toteutus

Kun työkappaleet ovat kevyitä, kiinnitetään ne robotin tarttujaan, ja kappaleen pintaa hiotaan ulkoisen hiomakoneen laikkaa tai nauhaa vasten (kuva 46). Hiomakoneina käytetään yleensä penkkihiomakonetta tai nauhahiomakonetta. Näihin koneisiin usein lisätään joustoelementti tai voimaohjattu joustoyksikkö, joka kompensoi robotin jäykkyyttä. Penkkihiomakoneen etuina on, että siihen voidaan kiinnittää esimerkiksi kaksi hiomalaikkaa tai harjaa eri karkeuksilla. Nauhahiomakone on luonnostaan joustava ja joustavuutta voidaan lisätä erilaisilla kontaktipyörillä. (Laitinen 2017.)

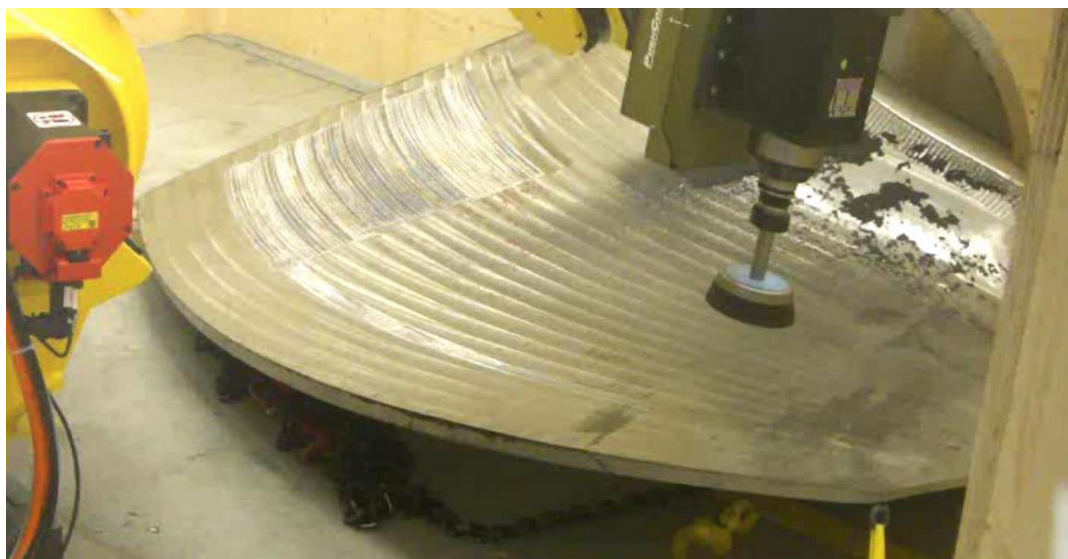


KUVA 46. Työkappale robotin tarttujassa (Pushcorp Inc)

Tämä menetelmän etuina on, että robotti pystyy helposti noukkimaan kappaleet esimerkiksi kuljettimelta ja hiontatyön jälkeen ne voidaan pakata lavalle. Toisena vahvuutena on, että ulkoiset hiomakoneet ja niiden hiomalaikat voivat olla suuria tai hiomanauhat

pitkiä. Tällöin joudutaan tekemään vähemmän hiomatyövälineen vaihtoja, ja päästään suurempaa kappaleen syöttönopeuteen perustuen hiomakoneen suurempaan tehoon. Tämän menetelmän heikkoutena on, että kappaleeseen joudutaan mahdollisesti tarttumaan useamman kerran, jotta kappaleen kaikki pinnat saadaan hiottua. (Godwin 1996, 1–2.)

Kun kappale on liian painava tai suuri robotin käsiteltäväksi, käytetään robotissa käsi-varteen lisättyä hiomatyökalua (kuva 47). Hiomatyökalun ja robotintyökalulaipan väliin lisätään yleensä passiivinen tai aktiivinen voimaohjattu joustokomponentti. Koska robotin kantokyky on rajallinen, ovat robotin hiomatyökalut kooltaan pieniä sekä tehottomampia kuin ulkoiset hiomakoneet. Tästä johtuen myös hiomatyöväline on kooltaan pieni ja se joudutaan vaihtamaan usein. Nauhahiomakoneet ovat vähemmän käytettyjä, koska hiomanauhan pituus jää lyhyeksi. (Godwin 1996, 2–3; Laitinen 2017.)

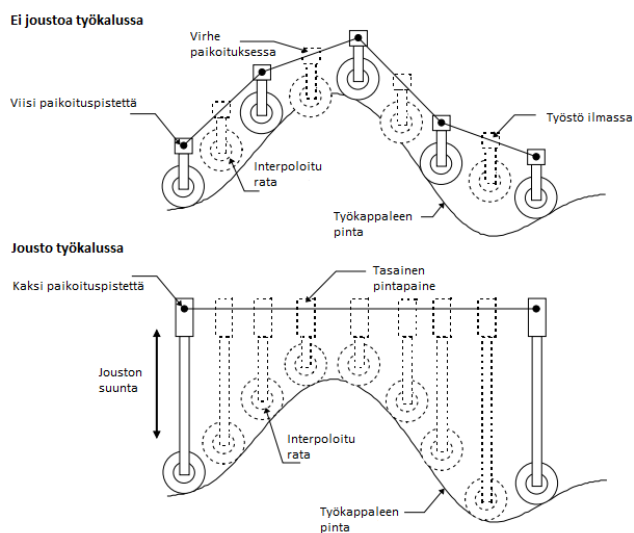


KUVA 47. Robotin hiomatyökalu (Laitinen 2015, 93)

### 5.3 Joustavuus ja radanohjaus

Tutkimuksissa on todettu, että hiontatyö vaatii joustavuutta. Tämä johtuu siitä, että aineenpoiston määrä on suuresti riippuvainen työkappaleeseen kohdistuvasta hiontavoimasta. Kappaleen muotojen ja poistettavan ainemäärän vaihdellessa, on ihminen luonnostaan joustava ja näin ollen suoriutuu hyvin hiontatyöstä. Robotti on taas ohjaukseltaan ja rakenteeltaan jäykkä, joten se suoriutuu heikosti hiontatyöstä. Robotilta puuttuvaa joustavuutta voidaan hieman kompensoida robotin tarkalla radanmäärityksellä (ku-

va 48). Tämä kuitenkin johtaa robotin paikoituspisteiden määrän kasvuun, jolloin ohjelmointi on monimutkaista ja siihen kuluu liikaa aikaa. Jo pienellä joustoelementillä robotin ja hiomalaikan välillä pystytään paikoituspisteiden määrää vähentämään suuresti (kuva). (Godwin 1996, 4–5.)



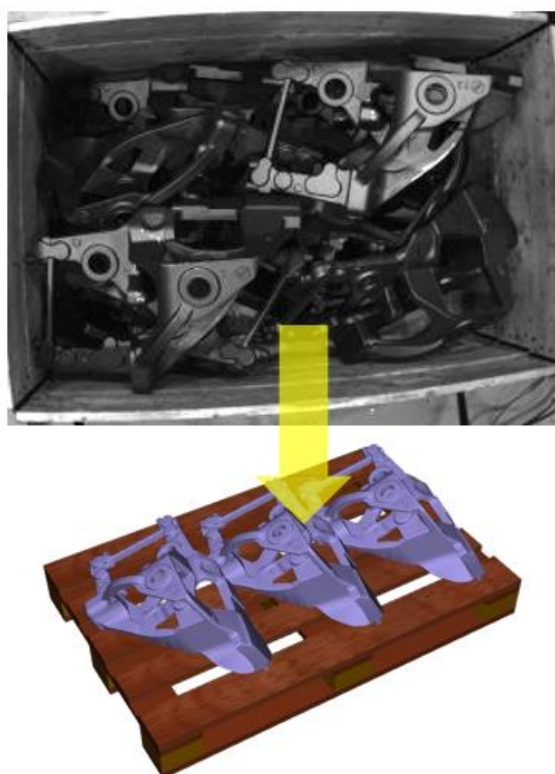
KUVA 48. Jousto hionnassa (Godwin 1996, 5) muokattu.

Joustoelementillä tarkoitetaan yleensä joustaa tai kimmoisaa materiaalia, joka mahdollistaa paremman hiontavoiman hallinnan hiomalaikan ja kappaleen välillä. Jo itse hiomalaikan oma joustavuus ja pehmeys voi antaa robotille tarvittavaa joustavuutta. Kuitenkin on muistettava, että jousen tai materiaalin puristuessa kasaan, niiden vastustava voima kasvaa, joten niiden käyttö tarkkuutta vaativissa hiontatöissä ei ole kannattavaa. (Laitinen 2017; Godwin 1996, 6–7.)

#### 5.4 Hionnan etäisyyden mittaus ja hallinta

Voimaohjauksen lisäksi lasermittauksen - sekä konenäkötekniikan avulla saadaan robotilla hiominen prosessina paremmin hallintaan. Lasermittaustekniikka mahdollistaa kappaleen mittojen ja aseman tarkistamisen ennen hionnan alkamista. Myös hionnan jälkeen robotti voi tarkistaa hiontalaadun lasermittaamalla kappaleen ja vertaamalla mittoja robottiin esiohjelmoituihin arvoihin. Laser -tai ultraäänianturin avulla voidaan myös mitata hiomalaikan kulumista tai robotin etäisyyttä hiomalaikkaan, ja tätä tietoa voidaan käyttää robotin ohjelmassa. (Butler 2016, 3; Weszelovszky 2017.)

Nykyisten konenäkökamera järjestelmien avulla pystytään kappaleet identifioimaan ja asemoimaan, sekä erottamaan erilaiset kappaleet toisistaan niiden mallin, mittojen tai valmistusvirheiden takia vain muutamassa sekunnissa. Konenäkökameralla kuvatun kappaleen mitat saadaan lisättyä robotin ohjelmaan, jolloin pystytään helpottamaan robotin tarttumista kappaleeseen sekä nopeuttamaan hiontaohjelman tekemistä. Konenäkökameralla voidaan mitata myös kappaleen ja hiomalaikan etäisyyttä toisiinsa ja myös tätä tietoa voidaan käyttää robotin ohjelmassa. (Butler 2016, 3; Weszelovszky 2017.)



KUVA 49 Kappaleiden tunnistus (Laitinen 2015, 102)

## 5.5 Voimanohjaus hionnassa

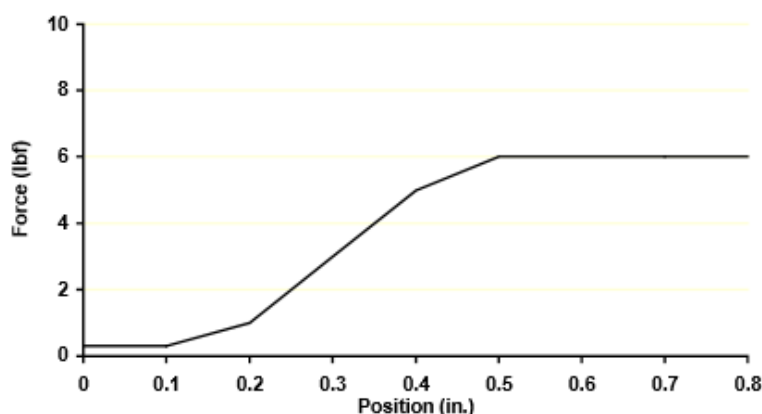
Voimaohjaus voidaan ajatella myös joustoelementtinä, koska työkalu saadaan myötäilemään kappaleen muotoja. Voimaohjaus voidaan jakaa passiiviseen ja aktiiviseen voimanohjaukseen. Passiivinen voimanohjaus tarkoittaa ohjauksella muutettavaa joustovoimaa, joskaan voiman hallinnassa ei ole takaisinkytkentää ja se vaihtelee olosuhteiden muuttuessa. Aktiivisessa voimaohjauksessa joustovoimaa mitataan ja hallitaan, jolloin hiontavoima pysyy muuttumattomana. (Godwin 1996, 5, 7.)



Voimaohjaus on käyttötavaltaan usein sähkömagneettinen tai pneumaattinen toimilaitte. Ne pystyvät tuottamaan vakiovoiman koko toimilaitteen iskun aikana. Sähkömagneettiselle toimilaitteella voimaa voidaan nopeasti muuttaa vaihtamalla virran suuruutta solenoidin läpi. Solenoidit ovat kuitenkin painavia ja vaativat suurta sähköistä tehoa tuottamaan tarvittavaa voimaa kappaleen ja hiomatyökalun välille. Pneumaattinen voimaohjaus perustuu siihen, että sylinterin männän molemmilla puolilla säädetään ilman painetta manuaalisen tai sähköisesti ohjatun säätimen avulla. Koska kompressori sijaitsee muualla tehtaassa, ovat pneumaattiset voimaohjatut yksiköt kevyitä ja niitä voidaan käyttää myös robotin hiomatyökalun ohjaamiseen. (Godwin 1996, 7.)

Voimaohjauksesta tulee aktiivista, kun ohjaukseen lisätään takaisinkytketty voimaanturi. Tämä mahdollistaa jatkuvan voiman sekä aseman mittaamisen ja säätämisen, joka myös huomioi painovoiman, kitkan ja hitausmomentin vaikutuksen hiomatyökaluun. Aktiivinen voimaohjaus antaa robotille ihmismäisen kosketuksen kappaleeseen. (Godwin 1996, 4, 7.)

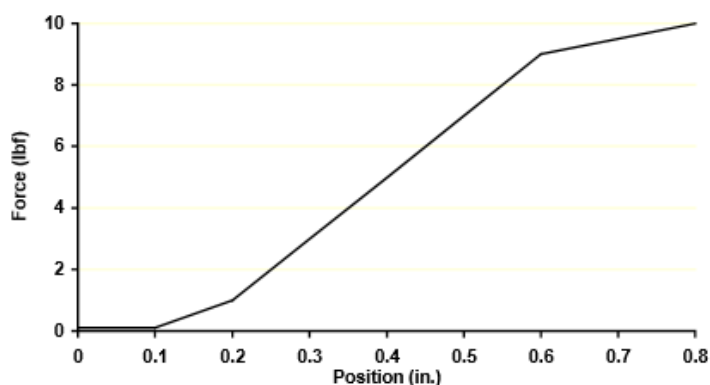
Aktiivinen voimaohjaus voidaan eritellä kahteen menetelmään. Ensimmäisessä menetelmässä hiontavoima pyritään pitämään vakiona hiomatyökalun aseman muuttuessa (kuva 50). Toisessa menetelmässä työkalun asema pyritään pitämään vakiona ja hiontavoimaa muuttuu aineenpoiston määrästä johtuen (kuva 51). Eli kappaleissa joissa aineenpoistomäärä on suurin piirtein vakio, pyritään hiontavoima pitämään samana ja työkalun aseman muutoksella haetaan lähinnä joustavuutta robotin paikoitukseen. Tämä esimerkiksi vähentää hiomatyökalun värähtelyä kappaleen pinnalla, kun hiomatyökalu kohtaa kappaleen pinnan (kuva). Tällöin päästään parempaan hiomatyökalun hallintaan ja hiontalaatuun, jolloin kappaleen syöttönopeutta voidaan nostaa sekä tuotteiden läpimenoajat lyhenevät. (Godwin 1996, 8–9.)



KUVA 50. Hiomatyökalu kohtaa kappaleen pinnan. (Godwin 1996, 8)



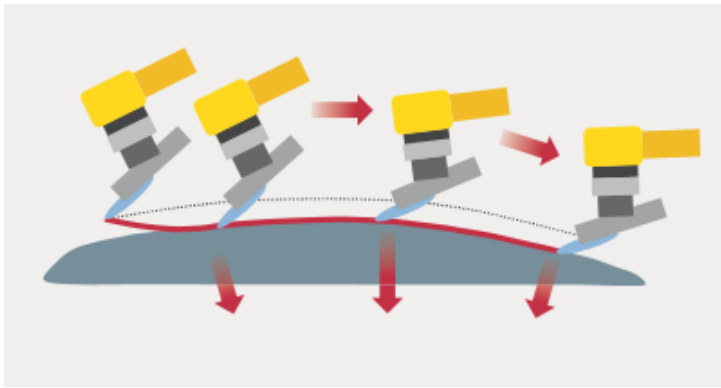
Kun taas kappaleissa joissa aineenpoiston määrä vaihtelee, kuten esim. käsin MIG - hitsatuissa kappaleissa, tulee hiontavoimaa säädellä hitsaussauman korkeuden vaihdellussa. Voimaohjaus lisää hiontavoimaa, kun hiomatyökalu kohtaa korkeamman kohdan hitsaussaumasta (kuva) ja päinvastoin vähentää voimaa. (Godwin 1996, 9; Laitinen 2017.)



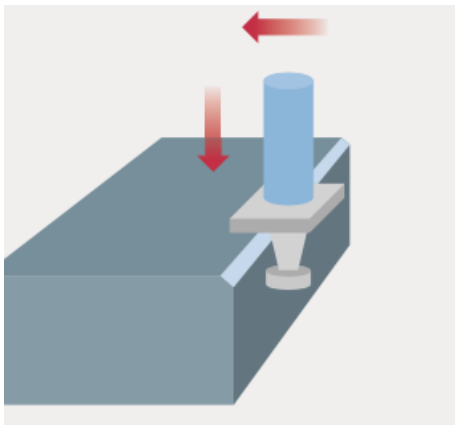
KUVA 51. Hiontavoiman lisääminen aineenpoiston määrän lisääntyessä. (Godwin 1996, 9)

### 5.5.1 Integroitu voimaohjaus

Aktiivinen voimaohjaus voidaan integroida robotin työkalulaipan ja tarraimen tai hiontatyökalun välille. Integroitu voimaohjaus on vahvasti robottimerkkisidonnaista, sillä työkalun voimaa, momenttia ja paikoitusta hallitaan akseleiden servomoottoreiden avulla voima-anturilta saatavan tiedon perusteella. Integroidulla voimaohjauksella voidaan säätää robotin paikoitusta vapausasteiden ja koordinaatistojen suhteen siten, että robotin työkalu ohjelmoidaan seuraamaan työkappaleen pintaa (kuva 52). Nykyajan integroidulla voimaohjauksella voidaan robotin hiomatyökalulla painaa kappaleen yläpuolelta ja sivulta samaan aikaan, jolloin saadaan aikaan tasainen viiste kappaleen kulmaan (kuva 53). (Fanuc 2015, 5; Godwin 1996, 6; Laitinen 2015, 88–89.)



KUVA 52. Voimaohjaus (Fanuc 2015, 5)

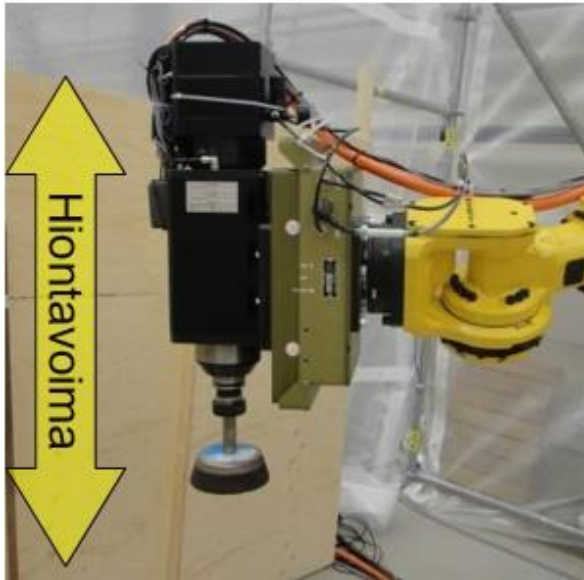


KUVA 53. Työkalun painaminen kahteen suuntaan (Fanuc 2015, 5)

### 5.5.2 Ulkoiset voimaohjatut joustoyksiköt

Ulkoiset voimaohjatut joustoyksiköt ovat robotin merkistä riippumattomia ja niitä käytetään hiomakoneissa sekä robotin työkaluissa. Ulkoiset voimaohjatut yksiköt toimivat vain yhden vapausasteen suhteen. Niitä käytetäänkin hiontasovelluksissa, jossa työkalupale on kiinnitetty ja sen pintaa muokataan robotin tarraimessa. Tällöin hiomakoneen ja sen jalustan väliin on asetettu ulkoinen joustoyksikkö. Kun robotti painaa kappaleen pintaa hiomakonetta vasten, joustoyksikkö myötää tai vastustaa robotin liikettä oman akselinsa suhteen pitäen hiontavoiman vakiona. (Billing 2012, 37–38; Godwin 1996, 2; Pushcorp Inc).

Joustoyksikkö voidaan lisätä myös robotin työkalulaipan ja työkalun väliin. Tämä toimii esimerkiksi tasohiontatyökaluissa (kuva 54). Joustoyksikköä voidaan myös käyttää robotin tarttujassa. Tässä on kuitenkin haittapuolena se, että robotti joutuu tarttumaan kappaleeseen uudelleen monta kertaa, koska yhdellä tartunnalla pystytään hiomaan vain yksi pinta. (Godwin 1996, 4; Laitinen 2015, 91–94).



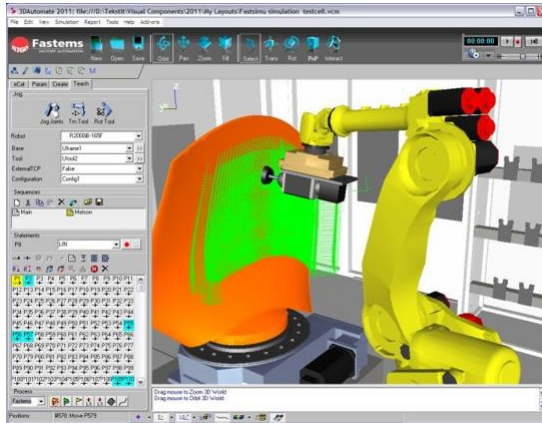
KUVA 54. Voimaohjattu joustoyksikkö (Laitinen 2015, 92)

## 5.6 Hiontarobotin ohjelmointi

Työkappaleen hiontaohjelma suunnitellaan robotille pääasiassa opettamalla ohjelmoinnalla, etäohjelmoinnalla tai yhdistelemällä näitä kahta ohjelmointitapaa. Myös johdatamalla ohjelmointi on noussut uudestaan suosioon, kun voimaohjaus on yleistynyt uusissa robottimalleissa (Godwin 1996, 1; Robotiikka 2016, 49).

Käsiohjaimella opettamalla ohjelmointi on perinteinen robotin ohjelmointimenetelmä ja se sopii hyvin muodoltaan yksinkertaisten kappaleiden hiontaan. Esimerkiksi suorakulmaisen kotelon yhden sivun hionta voidaan ohjelmoida siten, että robotille opetetaan sivun alkupiste ja loppupiste sekä robotti ohjelmoidaan liikkumaan lineaarisesti pisteiden välillä. (Pennanen 2017.)

Etäohjelmointi on tarkempi ohjelmointimenetelmä, kun hiotaan muodoltaan vaihtelevia ja monimutkaisia kappaleita. Esimerkkinä tällaisesta hiontatyöstä on turbiinien lapojen viimeistelyhionta, joka vaatii useita satoja paikoituspisteitä. Tällaisen työkappaleen hiontaohjelman suunnittelu pelkällä käsiohjaimella on lähes mahdotonta. Hiomatyökalun asentoa ja kulmaa kappaleen pinnan suhteen on hallittava, kun liikutaan paikoituspisteiden välillä. Mallipohjaisessa etäohjelmointi ympäristössä pystytään hiomatyökalun orientaatiota hallitsemaan tarkasti ja myös simuloimaan hiontaohjelman toiminta (kuva 55). (Suomen Robotiikkayhdistys Ry 1999, 91.)



KUVA 55. Etäohjelmointi hionnassa (Laitinen 2015, 85)

Voimaohjausteknologian kehittyessä, on johdattamalla ohjelmoinnista tullut tavallaan helpoin ja nopein tapa ohjelmoida robotteja. Robottimarkkinoilta ei vielä löydy erikseen hiontarobotteja, jotka tukisivat johdattamalla ohjelmointia. Muutamia työkappaleen pinnan kiillotussovelluksia on jo olemassa, joissa voimanohjauksen ja johdattamalla ohjelmoinnin avulla, yhteistoiminta robotti voi työskennellä vuorovaikutuksessa ihmis-työntekijän kanssa. (Laitinen 2017; Universal Robots). Yhteistoiminta robotille voidaan määritellä työskentelyalue, jossa se toimii kuten normaali teollisuusrobotti, sekä ihmisen saavuttua alueelle, se hidastaa toimintaansa ja lopettaa vaarallisen työn suorittamisen (Weszeloyszky 2017).

## 6 TYÖN TOTEUTUS

Työn toteutus aloitettiin alkutilanteen selvityksellä. Ensin selvitettiin, miten ja millä työvälineillä sekä menetelmillä kappaleet hiotaan tällä hetkellä. Selvitettiin myös minkälaisia työkappaleet ovat kooltaan ja muodoltaan. Yrityksen omistamia hiomakoneita ja -työvälineitä vertailtiin, sekä tutkittiin, minkälaista hiomajälkeä erilaisilla hiomalaikoilla ja -nauhoilla voidaan saada aikaan. Selvityksessä otettiin huomioon myös työvaiheet ennen hiontatyötä ja sen jälkeen. Myös hionnan laatuvaatimukset otettiin huomioon.

Elektrorakenne Oy valmistaa pääasiassa teräksestä ja alumiinista erilaisia koteloita ja suoja teollisuuden käyttöön. Kappaleet ovat pääasiassa suorakulmaisia tai niissä on usein suoria muotoja kiinnitysreikiä luukuunottamatta. Tässä työssä keskitytään työkappaleiden hiontatyön automatisointiin, jotka ovat valmistettu teräksestä ja ruostumattoman teräksestä.

### 6.1 Kappaleen valmistuksen työvaiheet

Kappaleen työvaihe alkaa Finn Power -levytyökeskukselta, jossa teräslevy leikataan oikeaan mittaan ja muotoon. Yritys käyttää robottia levyjen panostukseen levytyökeskukselle. Robotti pystyy liikkumaan lineaarijohteiden avulla levytyökeskuksen alkupäästä loppupäähän. Kun levyt on leikattu oikeaan mittaan ja muotoon, viedään ne särmäykseen. Särmäyspuristimella levyä taivutetaan siten, että kappale saa lopullisen muotonsa. Yritys käyttää särmäykseen Robot ER -tuotantosolua, jolloin särmäystyöt on voitu automatisoida täysin. (Elektrorakenne Oy -kotisivut.)

Särmäyksen jälkeen kappaleen taivutetut sivut hitsataan yhteen. Yritys hitsaa kappaleensa perinteisesti Mig – ja Tig -hitsausmenetelmillä sekä myös CMT -hitsaustekniikkaa käyttäen. Mig – ja Tig -hitsaus kuuluvat kaarihitsausmenetelmiin, jossa tarvittava lämpö tuotetaan valokaaren avulla. CMT -hitsaus on lyhytkaarihitsausmenetelmä, jossa käytetään hyväksi metallin kylmäsiirtymistä. Prosessin matalan lämmöntuoton ansiosta CMT -hitsauksella voidaan hitsata ohuita materiaaleja ja roiskevaapaasti. (Elektrorakenne Oy -kotisivut.) Yritys käyttää kappaleiden hitsaukseen robottia, jonka toimintoja ohjelmoidaan käsiohjaimella opettaen.

Hitsauksen jälkeen kappaleet hiotaan. Kappaleiden hitsausseamat pyöristetään ja puhdistetaan käsin nauhahiomakoneella. Tarvittaessa penkkihiomakoneella hiomakiveä käyttäen saadaan aikaan suurempaa aineenpoistoa. Kulmahiomakoneella pystytään hiomaan suuret kotelot hiomalaikkaa käyttäen. Myös erilaisia hiomaharjoja voidaan käyttää kappaleen viimeistelyyn. Ruostumattomien teräskappaleiden ulkopinnat tullaan kiillottamaan. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi kulmahiomakonetta, johon on asennettu kiillotuslaikka. Normaaliin teräskappaleiden pintoja ei kiilloteta, koska ne menevät vielä maalaukseen. Suurin osa yrityksen työkappaleista on materiaailtaan terästä, joten tässä työssä keskitytään pääasiassa niiden viimeistelyhiontaan.

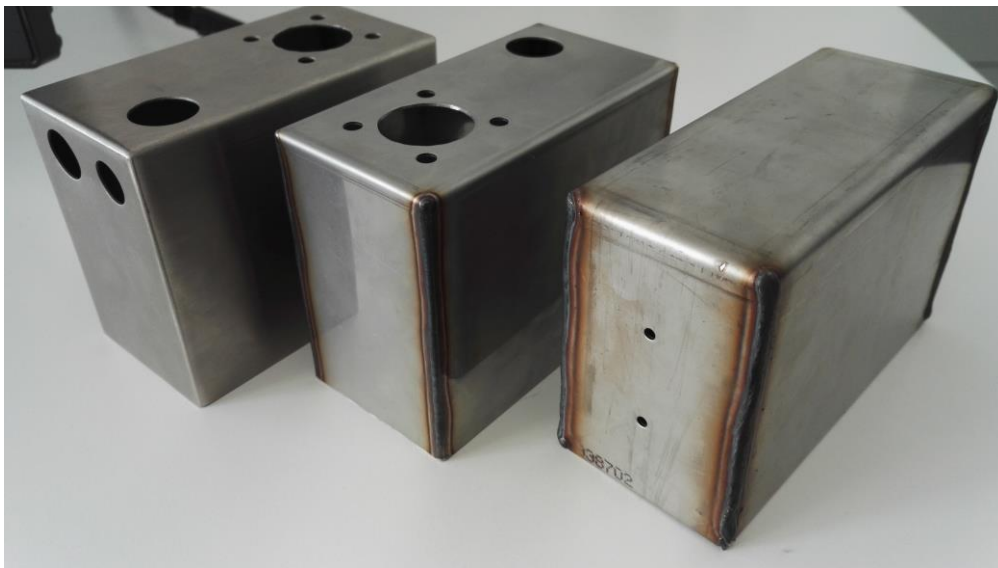
## 6.2 Hiontaprosessin ominaisuudet

Tämä projekti aloitettiin alkuselvityksellä, jossa asetettiin tavoitteet ja vaatimukset automaattiselle hiontasovellukselle. Yrityksen puolelta vaatimuksena oli, että hiontaan käytetään jo yrityksellä olevaa robottia (kuva 55). Robotin ohjelmoinnin tulisi olla nopeaa ja helppoa sekä ohjelmointitapana käytettäisiin pääasiassa käsiohjaimella opettaen ohjelmointia. Robottisolun simulointia ja etäohjelmoinnin mahdollisuutta mietittiin myös, mutta se rajattiin pois jo projektin alkuvaiheessa.



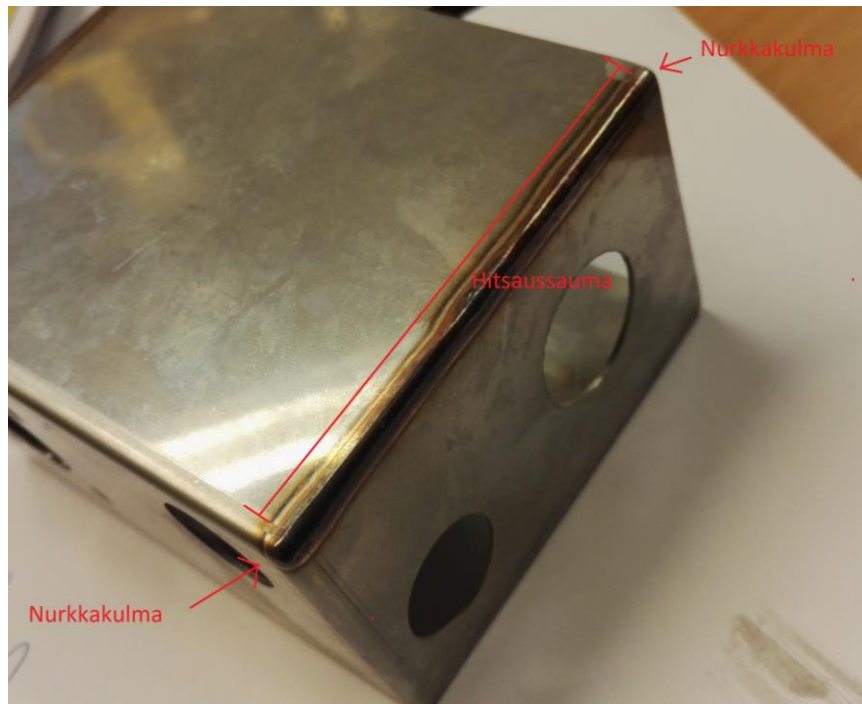
KUVA 55. Fanuc M 710i/45 (Kuva: Santeri Vienonen 2017)

Työkappaleet joita robotilla tulnaisiin hiomaan ovat kooltaan hyvinkin erikokoisia. Pienimmät kappaleet ovat kooltaan noin 100x50x50mm ja suurimmat taas ovat noin 1000x1000x500mm. Muodoltaan työkappaleet ovat usein suorakulmaisia koteloita tai ainakin niissä on suoria muotoja. Kuvasta 56. nähdään kooltaan pienimmät kotelot, joita robotilla tulnaisiin hiomaan. Kuvan oikeassa reunassa on Mig- hitsattu ja keskellä Tig - hitsattu työkappale sekä kuvan vasemmassa reunassa on valmis hiottu ja kiillotettu työkappale. Yrityksen kanssa päätettiin, että valitaan juuri nämä kuvan työkappaleet esimerkkikappaleiksi, joiden ympärille hiontaprosessi suunnitellaan.



KUVA 56. Esimerkkityökappaleet (Kuva: Santeri Vienonen 2017)

Hiontalaadun vaatimuksena oli, että pyöristykselle saataisiin tasainen säde. Tämä kuitenkin riippuu kappaleen mitoista ja levyn paksuudesta, mutta esimerkkikappaleille tavoiteltiin pyöristyksen säteeksi noin 2mm. Pinnanlaatua arvioitiin silmämääräisesti, mutta pinnan tuli olla tasainen eikä kappaleissa saanut olla teräviä kulmia. Hitsausseaman pyöristyksen ja puhdistuksen lisäksi myös kappaleen nurkkakulmat tuli kevyesti pyöristää (kuva 57).



KUVA 57. Kappaleen reunojen pyöristys (Kuva: Santeri Vienonen 2017)

Elektrorakenne Oy toimii alihankkijana monen eri alan yrityksille. Kappale-erät vaihtelevat kymmenistä tuotteista muutamiin satoihin. Kappale-erien pienet koot ja kappaleiden vaihtuvuus oli huomioitava hiontaprosessin suunnittelussa. Kappale-erien vaihtuvuuden takia oli robotin ohjelmointiin kiinnitettävä huomiota, jottei asetus aika kasvanut liian suureksi.

Yritys käyttää Fanuc -robottivalmistajan kuusiakselisia kiertyvänivelisiä robotteja, joiden kantavuus on 20 – 45kg. Robotin kantavuus tuli huomioida suurten koteloiden hinnassa.

### 6.3 Hionatyön automatisoinnin haasteet

Yrityksessä oli jo aiemmin tutkittu hionatöiden automatisointia, joten sen suurimmat haasteet olivat jo selvillä. Hionatöiden automatisoinnin suurimpina haasteina pidetään aineenpoiston määrän ja kappaleiden muotojen vaihtelua, hiomavälineen kulumista sekä hionavoiman hallintaa robotin sekä kappaleen välillä.



### 6.3.1 Aineenpoiston vaihtelun hallinta

Kappale-erien sisällä aineenpoiston määrän vaihtelua pystytään hallitsemaan hyvin, koska kappaleet hitsataan robotin avulla. Kuitenkin kappale-eriä valmistetaan eri paksuisesta levystä, joten hitsaussauman paksuus ja hitsaustekniikat vaihtelevat. Tämä tarkoittaa, että jokaiselle hitsausparametrille on asetettava omat hionta-asetuksensa.

Toinen vaihtoehto jota mietittiin Fastems:n Mika Laitisen kanssa oli, että hitsauksesta tulleet kappaleet esivalmistellaan ennen varsinaisen hiontatyön alkua. Eli kaikkien kappaleiden hitsausauma ajetaan saman suuruiseksi, esimerkiksi kuvan 58. mukaisella erikoistyökalulla. Työkalu toimii siten, että työkalun päässä on laakeri ja ennen laakeria on varsinainen lastuava terä. Laakerin halkaisijalla määritellään, paljonko ainetta halutaan poistaa. Kun hitsaussauman korkeus on liian suuri, poistaa terä ainetta kappaleen pinnalta. Kun taas sauman korkeus on sopiva, ottaa laakeri kosketuksen kappaleen pintaan ja terä pyörii tyhjä. Tämä metodi on kuitenkin liian hidas tähän kyseiseen hiontaprosessiin ja sen käyttöä on tutkittava lisää.



KUVA 58. Erikoistyökalu (Kuva: Santeri Vienonen 2017)

Yrityksen valmistamat kappaleet ovat siis muodoltaan usein suorakulmaisia tai ainakin niissä on suorita muotoja. Tämä tarkoittaa sitä, että hitsaussauman puhdistukseen voidaan ainakin yhden akselin suuntaan käyttää lineaarisia liikkeitä. Toisaalta tasaisen pyöristyksen tekeminen kappaleen kulmaan vaatii jonkinlaista kiertoliikettä tai tietynlaista hiomalaikan muotoa ja rakennetta. Yrityksen kiertyväniveliset robotit voidaan ohjelmoida liikkumaan lineaarisesti tai sen akseleita voidaan kiertää, jolloin se sopii tämän projektin mukaiseen hiontatyöhön.

### 6.3.2 Hiomavälineen kulumisen kompensointi

Hiomavälineen kuluminen oli yksi suurimmista haasteista, jotka kohdattiin työn edetessä. Kappaleen ja hiomavälineen välinen voima tulisi olla vakio, vaikka hiomalaikka kuluisikin pienemmäksi. On olemassa muutamia sovelluksia, joilla saadaan aikaan joustavuutta ja voimanohjausta hiontaprosessiin.

Kaikista kehittynein metodi olisi käyttää integroitua voimaohjausta, ja simuloida robotin toimintaa yhdessä kappaleen 3D -mallin kanssa etäohjelmointiympäristössä. Integroitu voimanohjaus on robottivalmistajakohtaista ja esimerkiksi Fanuc:lla on omat voimasensorinsa (kuva 59). Voimasensorilla voidaan hallita työkalun tai tarraimen voimaa kolmen akselin suhteen sekä vääntömomenttia. Voimasensorilta saatavaa dataa voidaan seurata ja tarvittavat muutokset lisätä robotin ohjelmaan (kuva 60). Kolmen akselin suhteen toimiva robotin voimanohjaus ei ole kuitenkaan aivan ongelmaton. Robotti ei pysty asemoimaan työkaluaan tarkasti voimasensorilta saatavan tiedon mukaan, jos se kohtaa 90 asteen kulman kappaleen pinnalla. Lisäksi kolmen akselin suhteen tapahtuva voimanohjaus ei ole yhtä nopeaa toiminnaltaan, kuin yksinkertaisemmat sovellukset. Yrityksen robottien ohjaimiin ei myöskään pystytty lisäämään Fanuc:n voimaohjausohjelmaa, eikä yrityksellä ollut kiinnostusta tällaiseen sovellukseen.

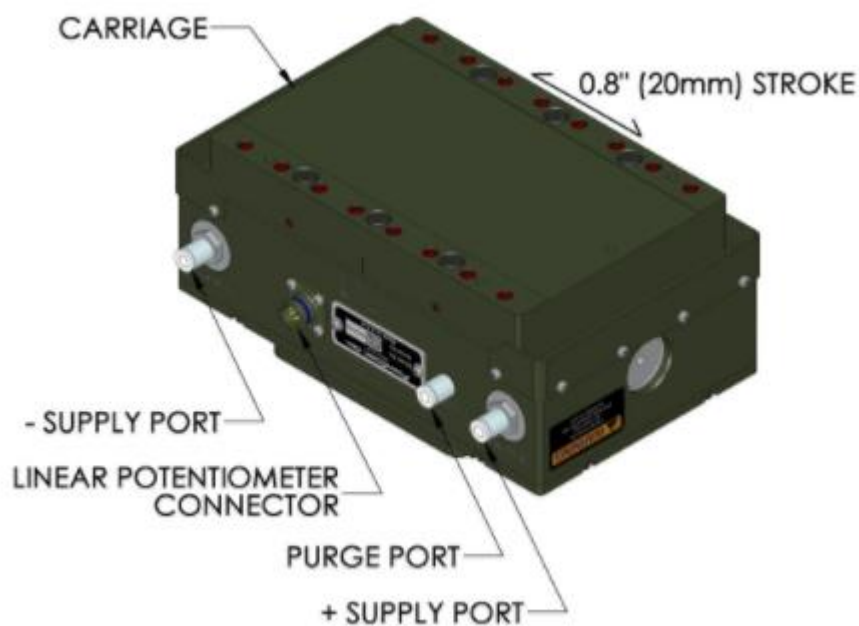


KUVA 59. Fanuc -voimasensori (Fanuc 2015, 6.)



KUVA 60. Voimasensoreilta saatavaa tietoa (Fanuc 2015, 6.)

Kolmen akselin suhteen voimaohjaus koettiin liian monimutkaiseksi ja jopa turhaksi näin yksinkertaiseen hiontasovellukseen. Päädyttiin miettimään voimaohjausta yhden akselin suhteen siten, että kaksi muuta akselia ovat lukittuna. Tällöin pystyttiin harkitsemaan myös muiden kuin robottivalmistajan ratkaisuja. Esimerkiksi amerikkalainen PushCorp Inc. myy aktiivisia sekä passiivisia voimaohjattuja joustoyksiköitä (kuva 61). Joustoyksiköt toimivat yhden akselin suuntaan, ja ne voidaan lisätä joko robotin työkalulaipan ja työkalun välille tai ulkopuolisen hiomakoneen ja sen jalustan välille. Aktiiviselta voimaohjausyksikön asema-anturilta saadaan myös tietoa robotin ohjelmaan.



KUVA 61. Passiivinen voimaohjattu joustoyksikkö (PushCorp Inc)

Yhtenä varteenotettavana vaihtoehtona pidettiin juuri passiivisen joustoyksikön lisäämistä penkkihiomakoneen ja sen jalustan välille. Tällöin kappale olisi robotin tarttujassa ja voimanohjaus tapahtuisi kappaleen pinnan ja hiomavälineen välillä joustoyksikön avulla. Passiivinen voimaohjaus voidaan myös luoda jousen tai paineilmasylinterin avulla, mutta vastustava voima ei ole tällöin vakio. Kuitenkin näitäkin vaihtoehtoja harkittiin hiontasovellusta suunnitellessa.

Yksi tapa jolla voidaan säädellä robotin hiontavoimaa, on seurata sähkökäyttöisen hiomakoneen ottamaa virtaa. Kun vastustava voima kappaleen ja hiomakoneen terän välillä nousee, niin nousee myös hiomakoneen sähköverkosta ottaman virran suuruus. Kun tiedetään millä virran arvolla hiontavoima on sopiva, voidaan robotin liikkeillä säätää tätä voimaa halutun suuruiseksi.

Työn aikana tutkittiin myös antureiden ja konenäkökameroiden käyttöä etäisyyden hallintaan laikan ja kappaleen välillä. Esimerkiksi laser – tai ultraäänianturilla pystytään mittaamaan etäisyyttä hiomalaikkaan jopa  $\pm 0,1$  mm tarkkuudella.

Laseranturi sopii kiinteän hiomalaikan etäisyyden mittaamiseen, sillä lasersäde on halkaisijaltaan hyvin pieni. Kun taas rakenteeltaan ilmavamman laikan mittaamiseen suositellaan käytettäväksi ultraäänianturia, koska sen mittausalue on paljon laajempi. Konenäkökameroilla pystytään mittaamaan kahden eri tason välistä etäisyyttä. Esimerkiksi kamera voidaan asettaa hiomakoneen yläpuolelle mittaamaan etäisyyttä kappaleeseen ja hiomalaikkaan. Vaikka antureiden tai konenäkökameroiden avulla etäisyyttä pystytään mittaamaan tarkasti, pitää silti kappaleen ja laikan välille lisätä jokin joustoelementti. Hiomalaikan tai -nauhan oma luontainen joustavuus ja pehmeys voi riittää, sekä robotin tarttujan ominaisuuksilla saadaan aikaan lisää joustoa.

Hiomavälineen kulumista voidaan myös laskennallisesti arvioida ja ennustaa. Robotille voidaan tehdä aliohjelma, jolla pyritään laskemaan hiomalaikan keskimääräinen kuluminen. Tällöin hiomalaikkaa ja työkappaletta liikutetaan aina lähemmäksi toisiaan. Menetelmä vaatii paljon testausta ja kokeilua, jotta se saadaan toimimaan ilman ihmisen valvontaa. Keskimääräinen kuluminen voi perustua kappalemäärään ja hiottavien sivujen pituuteen. Robotin ohjelmassa kannattaa määritellä raja, jolloin tiedetään, milloin hiomalaikan kulumispinta on loppu. Raja voidaan myös toteuttaa ulkoisella anturilla.

## 6.4 Lopullisen hiontamenetelmän valinta

Yritys käyttää siis kolmen tyyppisiä hiomakoneita kappaleiden viimeistelyhiontaan, jotka ovat nauha-, penkki- ja kulmahiomakoneet. Yleisesti kooltaan pienten kappaleiden hiontaan käytetään nauha – ja penkkihiomakonetta sekä suurten koteloiden hiontaan sopii paremmin käsin käytettävä kulmahiomakone. Kooltaan pienten koteloiden hiontatyön automatisointiin sopii hyvin hiontamenetelmä, jossa kappale on kiinni robotin tarraimessa, ja kappaleen pintaa painetaan hiomakoneen laikkaa tai nauhaa vasten.

Nauhahiomakoneen etuna voidaan pitää, että nauhan kulumispinta on aina melkein vakio, joten kulumista ei tarvitse kompensoida erillisen liikkeen avulla. Nauha menee poikki, kun sen kulumispinta loppuu. Tämän jälkeen uusi nauha vaihdetaan tilalle ja hiontatyö voi jatkua. Nauhan ja robotin välistä joustavuutta pystytään säätämään erilaisien kontaktipyörien avulla. Työkappaletta voidaan hioa eripuolella hiomakoneen nauhaa, jolloin saadaan erilainen hiontatulos. Yleensä kappaletta hiotaan juuri nauhan päältä kontaktipyörän kohdalta, mutta myös niin sanottua vapaata nauhaa voidaan käyttää esimerkiksi kappaleen kevyeen viimeistelyyn.

Nauhan pituutta lisäämällä vähennetään nauhan vaihtoja. Anturilla voidaan seurata hiomanauhan katkeamista ja välittää tästä tieto robotin ohjelmaan. Kuitenkin nauhan vaihtaminen on työläämpää kuin laikan, ja lisäksi robotilla nauhan vaihtamisen automatisointi on hankalampaa. Tästä syystä johtuen yrityksen kanssa päätettiin suunnitella hiontasovellus penkkihiomakoneen ja robotin ympärille.

Penkkihiomakoneeseen voidaan lisätä muodoltaan ja ominaisuuksiltaan erilaisia hiomalaikkoja, -harjoja tai -kiviä. Penkkihiomakoneessa on yleensä paikka kahdelle eri laikalta, jolloin toisella voidaan suorittaa varsinainen aineenpoisto ja toista voidaan käyttää pinnan viimeistelyyn. Juuri penkkihiomakoneen monipuolisuuden takia se valittiin tähän hiontasovellukseen. Yksi pääsyy oli, että työn edetessä huomattiin ettei yhdellä hiomalaikalla päästä yhtä aikaa riittävään aineenpoistoon sekä laadukkaaseen pinnanlaatuun. Hiontavälinemarkkinoilta ei löydetty tarpeeksi pehmeää ja joustavaa laikkaa, jossa olisi samalla hyvät aineenpoisto-ominaisuudet. Hiontasovellukseen suunniteltiin, että varsinainen hitsaussauman puhdistus ja aineenpoisto tehdään kovemmallalla hiomalaikalla sekä kulmien pyöristys ja pinnan viimeistely pehmeämmällä hiomaharjalla.

Penkkihiomakoneen käyttö robotin kanssa vaatii jonkinlaista kompensointia hiomalaikan kulumisen takia, sillä muuten kappaleen ja hiomalaikan pinta eivät kohta. Vaihtoehtoina oli ostaa robottivälinemarkkinoilta valmis ratkaisu tai itse suunnitella oma ratkaisu.

Amerikkalaiselle PushCorp Inc. -yritykselle lähetettiin tarjouspyyntö voimaohjautusta joustoyksiköstä, mutta sen hintaa pidettiin liian kalliina. Lisäksi tarjouspyyntöjä lähetettiin hiomalaikkavalmistajille sekä anturi – ja konenäkösovelluksia myyville yrityksille. Yrityksen kanssa päätettiin itse suunnitella yksinkertainen joustoyksikkö sekä suunnitella robotille aliohjelma, jolla pyritään ennustamaan hiomalaikan kulumista.

Penkkihiomakoneeseen valittiin hiomalaikka, jonka kulumispinnan paksuus on noin 40mm. Tämä tarkoittaa, että joustavan liikkeen matkan ei tarvitse olla kovin suuri. Viimeistelyyn käytettävän hiomaharjan ja kappaleen etäisyyden hallinta ei ole niin tarkkaa kuin itse laikan. Tarkoituksena oli, että kappale upotetaan hieman harjan sisälle ja harjan avulla pyöristetään kulmat hieman pyöreämmiksi.

Yrityksen kanssa suunniteltiin pneumaattinen ratkaisu, jolla kappaleen ja laikan välinen vastustava voima on melkein vakio. Lisäksi hiomakoneeseen suunniteltiin mekaaninen ratkaisu, joka vähentää tärinää. Ulkopuoliselta yritykseltä saatiin apua robotin hiontaohjelman suunnitteluun sekä hiomalaikan keskimääräisen kulumisen laskentaan sekä aliohjelman suunnitteluun. Robotin ja penkkihiomakoneen välisestä sovelluksesta oli tarkoitus valmistaa prototyyppi kesällä 2017.

## 7 POHDINTA

Työssä selvitettiin, miten käsin tehtävää hiontatyötä voidaan automatisoida robotin avulla. Nykyaikana yrityksellä on ollut hankaluuksia löytää osaavia työntekijöitä, joka on vaikuttanut haluun tuotannon automatisoimiseksi. Hiontatyö on likaista, raskasta ja yksitoikkoista työtä, joka sopii hyvin tehtäväksi robotilla. Työ aloitettiin alkuselvityksellä, jossa käytiin nykyinen prosessi läpi ja mietittiin, miten kyseiset työt voidaan tehdä myös robotilla tehokkaasti.

Työn aikana tuli selväksi, että hiontatyön robotisointi voidaan toteuttaa monin eri tavoin. Eroja ratkaisussa on esimerkiksi laitteiden hinnoissa, tehokkuudessa ja muunneltavuudessa. Ratkaisuiden valintaan vaikuttavat myös yrityksen työkappaleet, tuotannon strategia ja käytännön toimintatavat.

Elektrorakenne Oy:n hiontatyöt ovat pääasiassa juuri hitsattujen levyrakenteiden jäysteenpoistoa sekä viimeistelyhiontaa. Työkappaleet olivat muodoltaan suorakulmaisia koteloita, joiden hitsausseama tuli puhdistaa ja terävät kulmat pyöristää. Pinnanlaadun tuli olla ulkonäöllisesti hyvä, mutta suurin osa kappaleista meni maalaukseen vielä hionnan jälkeen. Hiontaprosessin suunnittelun haasteita olivat erikokoiset kappaleet ja pienet kappale-erät. Eri materiaalista ja paksuudeltaan eri kokoisista levyistä valmistetut kappaleet hitsattiin käyttäen eri hitsausparametreja. Tämä johtaa aineenpoiston määrän vaihteluun, joka tulee huomioida robotin hiontaohjelmaa suunnitellessa.

Hiontaprosessissa on neljä muuttujaa, jotka vaikuttavat suuresti aineenpoiston määrään. Nämä muuttujat ovat hiomalaikan karheus, hiontavoima kappaleen ja hiomalaikan välillä, hiomalaikan pyörimisnopeus sekä syöttönopeus, jolla kappaleen pintaa kuljetetaan lastuavaa terää vasten. Näistä neljästä muuttujasta ainoastaan viimeiseen voidaan robotilla suoraan vaikuttaa.

Kun hiontaprosessiin haetaan optimaalisia hionta-asetuksia, voivat yhteen muuttujaan tehtävät muutokset vaikuttaa myös muihin muuttujiin ja siten lopulliseen hionnan laatuun. Esimerkiksi karkeammalla hiomalaikalla sekä käyttämällä pienempää hiontavoimaa ja hiomalaikan pyörimisnopeutta, voidaan robotin liikettä nopeuttaa, joka parantaa kappaleiden läpimenoaikaa. Tällöin on kuitenkin muistettava, että karkeammalla hiomalaikalla ei päästä yhtä hyvään pinnanlaatuun kuin pehmeämmällä laikalla. Valitettavasti

ei ole olemassa tarkempia sääntöjä hiontaprosessin muuttujien asetuksista, jotta hiontatulos voitaisiin tarkasti ennustaa ennen hiontatyön testaamista.

Työn lopputuloksena tehtiin toimintasuunnitelma siitä, miten yritys voisi automatisoida hiontatöitään. Päätettiin, että yritykselle suunnitellaan uusi hiomakone, joka sopii hyvin kooltaan pienten kappaleiden hiontaan robotilla. Hiomakoneesta tehtiin kokoonpanosuunnitelma, osat ja komponentit valittiin sekä niistä lähetettiin tarjouspyynnöt. Hiomakoneeseen suunniteltiin erillinen joustoyksikkö, josta tehtiin CAD -malli. Robotin hiontaohjelmaan päätettiin suunnitella aliohjelma, joka pyrkii ennustamaan hiomalaikan kulumista. Hiomakoneeseen löydettiin sopiva hiomalaikka ja sen toimintaa päästiin jo kokeilemaan käytännössä, kun ensimmäinen prototyyppi koneesta valmistui kesän 2017 aikana. Yritys ei halunnut julkistaa tarkempia suunnitelmia hiomakoneesta ja prosessin automatisoinnista, joten tässä työssä keskityttiin yleisesti hiontatöiden automatisoinnin vaihtoehtoihin, haasteisiin ja ratkaisuihin.

Työ onnistui mielestäni hyvin ja selvityksen ansiosta yritys pystyy jatkamaan projektia eteenpäin. Yritys tulee luultavasti tarvitsemaan ulkopuolista apua varsinkin robotin hiontaohjelman suunnitteluun, mutta yrityksellä on hieman kokemusta vastaavan kaltaisista automatisointiprojekteista.



## LÄHTEET

- Aaltonen, K., Andersson, P. & Kauppinen, V. 1997. Koneistustekniikat. 1. Painos. Porvoo: WSOY.
- Airila, M. 1999. Mekatroniikka. Robottimekanismit. 5. painos. Helsinki: Hakapaino Oy
- Airila, M. 1999. Mekatroniikka. Anturit. 5. painos. Helsinki: Hakapaino Oy
- Ansaharju, T., Ilomäki, O. & Maaranen, K. 1989. Lastuava työstö. Porvoo: WSOY.
- Arora, S.K., Gupta, A.K. & Westcott, J.R. 2017. Industrial Automation and Robotics. Dulles: Mercury Learning and Information.
- Billing, M. 2012. Oppimisympäristö robotiikan ja etäohjelmoinnin opetukseen. Kone-tekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.
- Bouchard, S. 2014. Industrial robots: What are the different types? Julkaistu 13.3.2014. Luettu 14.5.2017.  
<http://blog.robotiq.com/bid/63528/what-are-the-different-types-of-industrial-robots>
- Butler, T. 2016. Robotic Grinding Automation in the Foundry of the Future. Luettu 11.5.2017.  
[http://www.palmermaus.com/pdf/Palmer-Maus\\_SS\\_Issue-5\\_EN\\_2016.pdf](http://www.palmermaus.com/pdf/Palmer-Maus_SS_Issue-5_EN_2016.pdf)
- Fanuc. 2015. Fanuc Force Sensor brochure. Luettu 3.5.2017  
<http://www.fanuc.eu/~media/files/pdf/products/robots/brochures/force%20sensor%20brochure.pdf?la=fi>
- Godwin, L. 1996. Programming with Force Control. Luettu 3.5.2017  
<http://www.pushcorp.com/pages/technical-papers/Programming-with-Force-Control.pdf>
- Elektrorakenne Oy. Yrityksen kotisivut. Luettu 2.7.2017  
<https://www.elektrorakenne.fi/historiaa/>
- Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 2011. Valmistustekniikka. 14. painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
- International Federation of Robotics. 2016. Executive Summary World Robotics 2016 Industrial Robots. Luettu 30.3.2017.  
[https://ifr.org/img/uploads/Executive\\_Summary\\_WR\\_Industrial\\_Robots\\_20161.pdf](https://ifr.org/img/uploads/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_20161.pdf)
- Javanmiri, A. 2011. Kokoonpanorobotisointi konepajateollisuudessa. Konetekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaattityö.
- Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Suomen Robotiikkayhdistys Ry. Vantaa: Talentum Oyj/Metallitekniikka.
- Lahden ammattikorkeakoulu. 2016. Robotiikka. Luettu 30.3.2017.  
[http://miniweb.lpt.fi/automaatio/opetus/luennot/pdf\\_tiedostot/Robotiikka\\_yleinen.pdf](http://miniweb.lpt.fi/automaatio/opetus/luennot/pdf_tiedostot/Robotiikka_yleinen.pdf)

Laitinen, M. robotiikan myyntijohtaja, Fastems Oy Ab. 2017. Haastattelu 24.3.2017. Haastattelija Vienonen, S. Espoo.

Laitinen, M. 2015. Tuotantoautomaatiokurssi, Robotiikkasovellukset teollisuudessa. Julkaistu 16.10.2015. Luettu 23.4.2017.

[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/144203/mod\\_resource/content/1/Mika%20Laitisen%20robotiikkaluento%202015.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/144203/mod_resource/content/1/Mika%20Laitisen%20robotiikkaluento%202015.pdf)

Leppäkoski, P. automaatioinsinööri, Pasi-Robot Oy. 2017. Puhelin haastattelu 8.5.2017. Haastattelija Vienonen, S. Kerava.

Pennanen, O. toimitusjohtaja, Elektrorakenne Oy. 2017. Haastattelu 11.4.2017. Haastattelija Vienonen, S. Tuusula.

Pushcorp Inc. Backstand Equipment Overview. Luettu 6.5.2017.

<http://www.pushcorp.com/backstand-index.html>

Ristikaarto, P. 2011. Tuotantoautomaatio. Päivitetty 25.11.2011. Luettu 23.4.2017.

[Kappaletavaratuotannon%20ja%20metalliteollisuuden%20tuotantojärjestelmät\[1\].ppt](#)

Uddeholm Oy Ab. 2005. Työkaluterästen hionta. Luettu 14.3.2017.

[http://www.uddeholm.fi/files/tyokaluterasten\\_hionta.pdf](http://www.uddeholm.fi/files/tyokaluterasten_hionta.pdf)

Universal Robots. Case story. Luettu 12.5.2017

<https://www.universal-robots.com/case-stories/paradigm-electronics/>

Weszlovsky, P. teknisen tuen insinööri, Fanuc Nordic Ab. 2017. Haastattelu 6.4.2017. Haastattelija Vienonen, S. Vantaa.

Ylivinkka, J. 2012. Koneistuksen asetusajkojen lyhentäminen. Kone – ja tuotantotekniikka. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.