



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Tuomo Kulmala

Hitsausviisteiden valmistaminen yhteistyörobotin avulla

Opinnäytetyö

Kevät 2022

Konetekniikan tutkinto-ohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Tuomo Kulmala

Työn nimi: Hitsausviisteiden valmistaminen yhteistyörobotin avulla

Ohjaaja: Jussi Yli-Hukkala

Vuosi: 2022

Sivumäärä: 65

Liitteiden lukumäärä: 1

Tämä opinnäytetyö tehtiin BE Group Oy Ab -nimiselle teräspalvelualan yritykselle. Työn tarkoituksena oli tutkia yhteistyörobotiikan hyödyntämistä hitsausviisteiden valmistamisessa sekä särmäysapupalojen poistamisessa.

Hitsausviisteiden valmistamiseen käytetään yrityksessä poltto-, plasma- tai laserleikkauskonetta, jolla viisteet tehdään osaan leikkauksen yhteydessä. Leikkauksen jälkeen tehtävät viisteet tehdään pääasiassa Koike-viisteleikkauskoneella johon on kiinnitetty kaasupoltin. Molemmissa menetelmissä oli huonoja puolia, joita pyrittiin ratkaisemaan tässä opinnäytetyössä yhteistyörobotiikan avulla.

Työ lähti käyntiin yhteistyössä Universal Robotsin maahantuojaan kanssa, jolta vuokrattiin yhteistyörobotti kuukauden ajaksi. Universal Robotsin edustaja tuli paikalle robotin saavuttua ja perehdytti alkuun robotin käytössä sekä peruskäskykannan käytössä. Robotti kiinnitettiin kiinni lattapöytään pystyasennossa, ja robotin työkalulaippaan laitettiin plasmapoltin.

Varsinainen testaus aloitettiin perinteisellä opettavalla ohjelmointitavalla, eli näyttämällä robotille liikkeisiin tarvittavat pisteet. Tällä tavalla saatiin kumminkin leikattua ainoastaan poltin suorassa, joten tapa soveltui ainoastaan särmäysapupalojen poistamiseen tarkoitettuihin testeihin. Viisteiden tekemiseen kehitettiin apuväline, jolla plasmapoltin saatiin käännettyä haluttuun astekulmaan.

Lopuissa testeissä keskityttiin suorien ja muotoviisteiden tekemiseen. Nämä osoittautuivat huomattavasti haastavammiksi kuin aikaisemmat testiajot, koska polttimen kääntäminen 45 asteen kulmaan tarvitsee huomattavasti enemmän robotin nivelten yhtäaikaista liikkeitä. Suorille pinnoille tehtävissä viisteissä pystyttiin edelleen käyttämään opettamalla ohjelmointia, mutta muotoviisteosien tekemiseen käytettiin johdattamalla ohjelmointia.

¹ Asiasanat: Yhteistyörobotiikka, hitsausviiste, cobotti, plasmaleikkaus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Mechanical Engineering

Specialisation: Mechanical and Production Engineering

Author/s: Tuomo Kulmala

Title of thesis: Manufacturing welding bevels by using a collaborative robot

Supervisor(s): Jussi Yli-Hukkala

Year: 2022

Number of pages: 65

Number of appendices: 1

This thesis was made for a company in the metal industry called BE Group Oy Ab. The purpose of this thesis was to research how to use collaborative robotics in manufacturing welding bevels and removing excess material from angled pieces.

Welding bevels are manufactured into parts with flame-, plasma- or laser cutting machines during the cutting process. Bevels that are made after the cutting process, are primarily manufactured with Koike edge cutting machine which has a gas cutting torch attached. Both methods had downsides that require solutions to solve in this thesis with collaborative robotics.

Work started in collaboration with importer of Universal Robots from which the collaboration robot was rented for a month. An representative from Universal Robots visited our company and after the robot arrived, he briefed us on how to use the robot and its basic commands. The robot was attached to work table in vertical position and plasma torch was attached into robots end effector.

Actual testing started with traditional teach programming method, ergo showing to the robot all the points that are needed for movements. This way it was only possible to cut with plasma torch in straight position, so the style was suitable only for tests that were meant to remove excess material from angled pieces. For manufacturing bevels, a tool had been developed which helped the plasma torch turn into the required angles.

The remaining tests were focused on making straight- and shape bevels. This turned out to be considerably more challenging than the tests we made before, because turning plasma torch into 45 degree angle requires a lot simultaneous movements from robot joints. Bevels that were made for straight surfaces was still possible to do with teach programming method but to manufacture shape bevels, we used hand guiding programming methods.

¹ Keywords: Collaboration robotics, welding bevel, cobot, plasma cutting

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	8
1 JOHDANTO	11
1.1 Työn tausta	11
1.2 Työn tavoitteet.....	11
2 Yritysesittely	13
3 Terminen leikkaus	14
3.1 Polttoleikkaus	14
3.2 Plasmaleikkaus	15
3.3 Laserleikkaus	16
3.3.1 Hiilidioksidilaser	18
3.3.2 Kuitulaser	19
3.3.3 Laserleikkauksen edut ja huonot puolet.....	20
4 Teollisuusrobotiikka.....	22
4.1 Robottityypit ja rakenteet.....	23
4.2 Robottien ohjaus ja ohjelmointi.....	24
4.2.1 Teollisuusrobottien käskykanta.....	27
4.2.2 Opettamalla ohjelmointi	28
4.2.3 Johdattamalla ohjelmointi	28
4.2.4 Etäohjelmointi	29
4.3 Yhteistyörobotiikka ja käyttökohteet	30
5 Hitsaus	38
5.1 Sula- ja puristushitsaus	39
5.2 Hitsausprosessit.....	40

5.2.1	MIG- ja MAG-hitsaus	40
5.2.2	TIG-hitsaus	43
5.2.3	Puikkohitsaus.....	45
5.3	Hitsausrailotyypit ja valmistus.....	46
6	Testien tulokset	50
6.1	Kelkan suunnittelu ja versiot.....	50
6.2	Ohjelman tekeminen robotille	52
6.3	Testiajot särmäysapupalan poistoon	52
6.4	Testiajot kelkan ensimmäisellä versiolla	53
6.5	Testiajot suorille viisteille	53
6.6	Nopeustestit ja vertailu	54
6.7	Tuotannon osan T3-236099-AH viisteiden valmistaminen.....	55
6.8	Tuotannon osan F683266 viisteiden valmistaminen	57
7	Pohdinta	60
	LÄHTEET	62
	LIITTEET	65

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Polttoleikkauksen toimintaperiaate	14
Kuva 2. Plasmaleikkauksen toimintaperiaate sekä kuristuksen vaikutus kaaren lämpötilaan	16
Kuva 3. Lasersäteen ominaisuudet.....	17
Kuva 4. CO ₂ -laserin tehon ja levyvahvuuden vaikutus leikkausnopeuteen	18
Kuva 5. CO ₂ -laserleikkauspään toimintaperiaate	19
Kuva 6. a) Suuritehoinen kuitulaser ja b) kuitulaserin toimintaperiaate.....	20
Kuva 7. Yleisimpien robottityyppien rakenne (ISO 8373).....	22
Kuva 8. Teollisuusrobotti ja tavallisimmat komponentit.....	23
Kuva 9. Avoin ja suljettu kinemaattinen rakenne.	24
Kuva 10. Liikeradan opettaminen yhteistyörobotille	29
Kuva 11. Teollisuusrobotin ja cobotin erot	31
Kuva 12. Universal Robots yhteistyörobotti BMW:n autotehtaassa	32
Kuva 13. Franka Emika yhteistyörobotti elektroniikkakomponenttien kokoonpanossa	33
Kuva 14. Universal Robots yhteistyörobotti lajittelemassa lääkkeitä.....	33
Kuva 15. Techman yhteistyörobotti pakkaamassa tuotteita.....	34
Kuva 16. Universal Robots yhteistyörobotti hitsaamassa metalliosia	35
Kuva 17. ABB:n yhteistyörobotti avustaa erään ruotsalaisen yliopiston tutkijoita.....	36
Kuva 18. Universal Robots yhteistyörobotti hallinnoimassa varastoa.	37
Kuva 19. Sulahitsauksen toimintaperiaate	39

Kuva 20. Puristushitsauksen toimintaperiaate.	39
Kuva 21. Hitsausprosessit	40
Kuva 22. MIG/MAG-hitsauksen toimintaperiaate	41
Kuva 23. Suojakaasun vaikutukset kaasukaarihitsauksessa	41
Kuva 24. TIG-hitsauksen toimintaperiaate	43
Kuva 25. Puikkohitsauksen toimintaperiaate.	45
Kuva 26. Hitsauksen yleisimmät liitostyypit.....	47
Kuva 27. V-, puoli V-, X- ja K-railotyypit 3 mm juuripinnalla.....	48
Kuva 28. Eri variaatiota U- ja J-railotypeistä 3 mm juuripinnalla.	48
Kuva 30. Kelkan versio 1	51
Kuva 31. Kelkan versio 2.	51
Kuva 32. Tuotannon osan T3-236099-AH nesti viistettynä plasmaleikkauskoneella.	55
Kuva 33. Tuotannon osan T3-236099-AH nesti ilman viisteitä.	56
Kuva 34. Tuotannon osa T3-236099-AH viistettynä robotilla.	57
Kuva 35. Tuotannon osan F683266 nesti viistettynä plasmaleikkauskoneella.....	58
Kuva 36. Tuotannon osan F683266 nesti ilman viisteitä.....	58
Kuva 37. Tuotannon osan F683266 viistettynä robotilla.	59
Taulukko 1. Nopeustestien tulokset.	54

Käytetyt termit ja lyhenteet

Aktiivinen kaasu	Tarkoitetaan hitsauksessa kaasua, joka reagoi hitsisulan muiden aineiden kanssa.
Aliohjelma	Itsenäinen ohjelman osa, joka suorittaa tietyn toiminnon. Aliohjelmaa voidaan kutsua pääohjelman eri osista.
CAM	Tietokoneavusteinen valmistus, eli Computer-aided manufacturing
Cobotti	Nimitys, jota käytetään yhteistyöroboteista (Collaborative Robots).
Dissosisaatio	Tarkoitetaan molekyylin hajoamista kahdeksi tai useammaksi molekyyliksi tai atomiksi.
Eksotermien reaktio	Kemiallinen reaktio, joka vapauttaa lämpöä.
Hitsausviiste	Prosessi, jossa materiaalia poistetaan kappaleen liitospinnalta ennen hitsauksen aloittamista. Tehdään paksuimmissa materiaaleissa läpihitsauksen takaamiseksi.
Inertti kaasu	Tarkoitetaan hitsauksessa kaasua, joka ei reagoi kemiallisesti muiden aineiden kanssa.
Interpolaatio	Matematiikassa käytetty menetelmä, jossa lasketaan uusia arvoja tunnettujen arvojen väliin.
Ionisoitunut	Kutsutaan tilaa, jossa atomi on menettänyt elektroneja.
Juuripinta	Juuripinnaksi kutsutaan hitsausviisteessä kohtaa, josta materiaalia ei ole poistettu. Yleisesti hitsin alapinnassa tai molemmin puoleisissa viisteissä keskellä.
Jäyste	Tarkoitetaan leikkauksen yhteydessä materiaalin särmään muodostunutta kuonaa tai sulaa metallia, joka täytyy poistaa jälkikäteen.

Kaarihitsausprosessi	Nimitystä käytetään hitsausprosesseista, jossa lämmönlähteenä käytetään valokaarta.
Karkeneminen	Teräksen karkeneminen perustuu lämpötilan nousuun ja laskuun. Korkeassa lämpötilassa teräksen kiderakenne muuttuu austenttiseksi, ja jäähtyessään se muuttuu martensiitiksi. Tämä vaikuttaa teräksen ominaisuuksiin.
Koherentti	Tällä tarkoitetaan valonsäteistä puhuttaessa, että kaikki valonsäteet ovat samassa vaiheessa.
Lämmönvaikutusalue	Teräksen kiderakenteessa muodonmuutoksia aiheuttava alue, joka sijaitsee leikkaus- tai hitsausrailon läheisyydessä.
MAG-hitsaus	Lyhenne sanoista Metal Active Gas (welding)
Mekanisoitu	Manuaalinen prosessi, joka on tehty koneelliseksi.
MIG-hitsaus	Lyhenne sanoista Metal Inert Gas (welding)
Monokromaaninen	Tällä tarkoitetaan valonsäteistä puhuttaessa, että kaikilla valonsäteillä on sama aallonpituus ja kulkusuunta.
Nestaus	Termi jolla tarkoitetaan levyosien sijoittamista materiaaliarkille, jolla pyritään mahdollisimman pieneen materiaalihävikkiin.
Palamisreaktio	Materiaali kuumennetaan syttymislämpötilaansa
Servo	Asemointiin tarkoitettu toimilaitteen ohjauspiiri.
Sulamisreaktio	Materiaali kuumennetaan sulamislämpötilaansa
Särmäysapupala	Termi, jota käytetään särmäyksessä, kun kappaleessa on esimerkiksi aukko mikä ei mene särmäyspuristimen alaterän yli. Näissä tapauksissa aukon kohta voidaan jättää umpeen särmäyksen ajaksi, jotta osa saadaan taivutettua kuvan mukaisesti. Särmäysapupala poistetaan kappaleesta särmäyksen jälkeen.

Terminen leikkaus	Termisellä leikkauksella tarkoitetaan poltto-, plasma- tai laserleikkausmenetelmää, jossa metallia leikataan lämpöenergian avulla.
TIG-hitsaus	Lyhenne sanoista Tungsten Inert Gas (welding)
Tunkeuma	Tunkeumalla tarkoitetaan aluetta, joka ulottuu hitsin a-mitan suunnassa perusaineen sisäpuolelle.
Valokaari	Fysikaalinen ilmiö, joka syntyy kahden elektrodin välisen sähkökentän noustessa niin suureksi, että sähkövirta purkautuu sähköä heikosti johtavan materiaalin läpi.
Vapausaste	Robotiikassa käytetty termi, jolla kuvataan robotin nivelten määrää.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

BE Group Oy Ab:n Lapuan tuotantoyksikössä valmistaan erilaisia koneenosia ja teräsrakenteita teräslevystä poltto-, plasma- tai laserleikkaamalla. Monet osat liitetään toisiinsa tai johonkin muuhun rakenteeseen hitsausliitoksella, joten useasti osan reunasta pitää tehdä viisto ainakin paksuissa materiaaleissa, jotta hitsausseura saadaan läpihitsattua. Nykytilanteessa hitsausviisteet valmistetaan yrityksessä poltto-, plasma- tai laserleikkauskoneella leikkauksen yhteydessä tai leikkauksen jälkeen Koike-viisteleikkauskoneella johon on kiinnitetty kaasupoltin. Koike-viisteleikkauskone on lineaarinen kuljetin, jossa on nopeuden ja astekulman säätö. Molemmilla nykyisissä menetelmissä on huonoja puolia, joita pyrittiin ratkaisemaan opinnäytetyössä robotiikan avulla.

Plasmaleikkauskoneella pystytään valmistamaan monipuolisia muotoja hitsausviisteisiin, mutta se kasvattaa materiaalihukkaa huomattavasti ja hidastaa plasmaleikkauksen leikkauksen nopeutta. Koike-viisteleikkauskoneen huonoja puolia ovat hitaus ja valmistettavan muodon rajoittuminen ainoastaan suoralle pinnalle. Lisäksi työntekijän tulee olla kaasuliekin lähellä viistettä tehtäessä, jolloin työtaturman mahdollisuus kasvaa.

Särmäysapupalojen poisto tehdään yrityksessä plasmapolttimella käsivaraisesti, ja sen jälkeen reuna hiotaan tasaiseksi ja lopulliseen muotoonsa. Menetelmä on hidas ja vaatii paljon kokemusta vaaditun laadun saavuttamiseksi.

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia yhteistyörobotin soveltuvuutta hitsausviisteiden tekemiseen ja särmäysapupalojen poistamiseen. Testeissä käytettiin Universal Robots UR10e yhteistyörobotia, joka vuokrattiin maahantuojalta kuukauden ajaksi. Projektin tavoitteena oli kerätä tietoa erilaisten muotojen valmistamisesta robotilla sekä laadun ja nopeuden arviointi nykyisistä menetelmistä verrattuna. Opinnäytetyössä pyrittiin löytämään mahdollisimman yksinkertaiset ratkaisut erilaisten kappaleiden jatkojalostustyövaiheille.

Testitulosten ja ratkaisuiden tarkoitus oli toimia pohjana kehitystyölle, sekä toimia tukena investointipäätökselle.

2 Yritysesittely

BE Group -konsernilla on juuret Suomessa ja Ruotsissa jo kolmella vuosisadalla. Bröderna Estrand ja Starckjohann & Co perustettiin 1800-luvun lopulla. Useiden yrityskauppojen seurauksena BE Group Oy Ab konserni perustettiin vuonna 2006. BE Group konsernin päämarkkina-alueet ovat Suomi ja Ruotsi, mutta toimintaa on myös Baltian maissa sekä Puolassa. BE Group konsernin palveluksessa on 633 henkilöä, joista valtaosa Suomessa ja Ruotsissa. Konsernin pääkonttori sijaitsee Malmössä (BE Group, [Viitattu 22.10.2021]; BE Group, [Viitattu 23.10.2021].)

BE Groupin tuotevalikoimaan kuuluvat kanget, profiilit, palkit, putket, levyt, kelat, ruostumattomat ja haponkestävät teräkset, alumiinit ja muut metallit. BE Groupin asiakaskunta voidaan jakaa kahteen pääryhmään, joita ovat rakennusteollisuus ja valmistava teollisuus. Materiaalit toimitetaan asiakkaalle määrämittaan sahattuina, kuvien mukaan leikattuina ja tarvittaessa suojamaalattuina. BE Groupilla on myös laaja esikäsittelytarjonta, jolloin asiakkaat voivat tilata materiaalit esimerkiksi valmiiksi porattuina, särmättyinä tai viisteytettyinä valmistuskuvien mukaan (BE Group, [Viitattu 25.10.2021]; BE Group, [Viitattu 26.10.2021].)

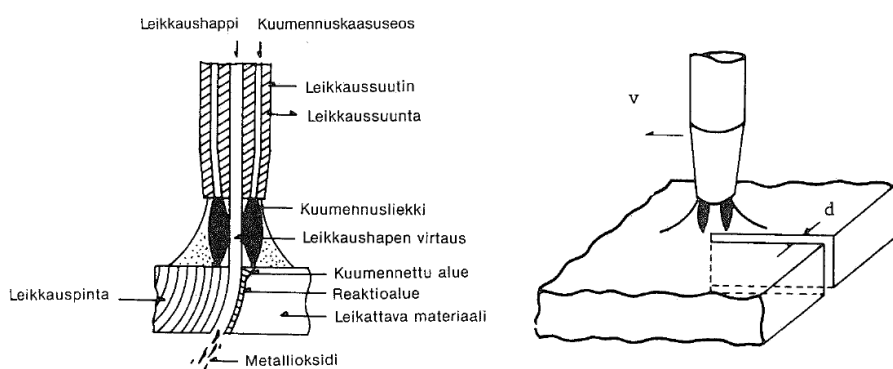
Työ toteutettiin BE Group Oy Ab:n Lapuan teräspalvelukeskuksessa, joka on keskittynyt teräksen esikäsittelyyn. Yksikön palveluvalikoimaan kuuluvat termiset leikkausmenetelmät poltto-, plasma- ja laserleikkaus sekä jatkojalostusmenetelmät särmäys, koneistus, sinkopuhallus ja viisteleikkaus (BE Group, [Viitattu 27.10.2021].)

3 Terminen leikkaus

Yleisimpiä termisiä leikkausmenetelmiä ovat plasmaleikkaus, polttoleikkaus ja laserleikkaus. Termisessä leikkauksessa materiaali kuumennetaan korkeaan lämpötilaan, joka aiheuttaa leikkausrailossa palamis- tai sulamisreaktion (Ihalainen, ym. 2003, 261–268.)

3.1 Polttoleikkaus

Polttoleikkaus on yksi termisen leikkauksen menetelmistä. Polttoleikkauksessa materiaali kuumennetaan liekillä paikallisesti syttymislämpötilaansa. Materiaalin leikkaantumisen tapahtuu leikkausrailoon kohdistetulla happisuihkulla. Sulassa tilassa oleva metallioksidi puhalletaan pois leikkausrailosta happisuihkun liike-energian avulla. Polttoleikkauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. Polttoleikkaussuuttimen läpi virtaava kuumennuskaasuseos sytytetään suuttimen päästä, joka muodostaa kuumennusliekin. Metallia kuumennetaan syttymislämpötilaansa, jonka jälkeen kuumennettuun kohtaan suihkutetaan leikkaushapetta, suuttimen keskimmäisen virtauskanavan kautta. Happi reagoi metallin kanssa muodostaen rautaoksidia ja saaden aikaan teräksen hapettumisen, joka on eksotermisen reaktio. Eksotermisen eli lämpöä vapauttava reaktio jatkaa leikkausprosessia. Metallia muuttuu palaessaan nestemäiseksi rautaoksidiksi, joka puhalletaan pois leikkausrailosta leikkaushapen kineettisen energian avulla (Ihalainen, ym. 2003, 261–262; SSAB, [Viitattu 22.10.2021].)



Kuva 1. Polttoleikkauksen toimintaperiaate (Ihalainen, ym. 2003, 261).

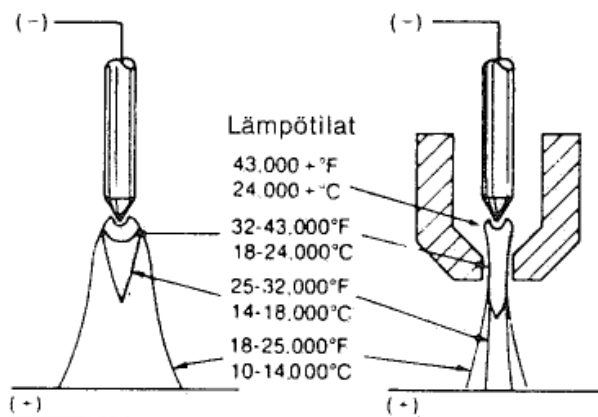
Polttoleikkaus soveltuu useiden eri teräslaatuojen, sekä vanadiinin ja titaanin leikkaamiseen. Niukkaseosteisia ja seostamattomia teräksiä, joiden hiilipitoisuus ei ylitä 0,3 %, voidaan

leikata ilman erityisiä toimenpiteitä. Seostettujen terästen leikkaaminen polttoleikkaamalla on huomattavasti vaikeampaa lähinnä niiden voimakkaan karkenevuuden takia. Polttoleikkauksen suurimpana etuna verrattuna mekaaniseen sekä muihin termisiin leikkausmenetelmiin on se, että sillä saadaan leikattua erittäin suuria ainevahvuuksia. Polttoleikkaamalla pystytään leikkaamaan materiaalia jopa 1500 mm:n asti, ja se ei ole muilla termisillä leikkausmenetelmillä mahdollista. Tämä johtuu siitä, että teräksen hapettuminen on eksotermisen reaktio, jolloin leikkaamiseen tarvittava energia saadaan suurilla ainevahvuuksilla lähestulkoon kokonaan materiaalista itsestään (Ihalainen, ym. 2003, 263.)

3.2 Plasmaleikkaus

Plasmaleikkaus on terminen leikkausmenetelmä, jossa leikkaaminen toteutetaan kuumen plasman lämpöenergian avulla. Materiaali kuumennetaan paikallisesti sulamislämpötilaansa, jonka jälkeen sulanut metalli puhalletaan pois leikkausrailosta plasmakaasun kineettistä energiaa hyväksikäyttäen. Fysiikassa plasmalla tarkoitetaan korkeaan lämpötilaan kumentunutta osaksi dissosioitunutta ja ionisoitunutta kaasua, joka koostuu molekyyleistä, atomeista, ioneista sekä elektroneista (Ihalainen, ym. 2003, 263–264.)

Plasmaleikkauksessa plasmakaasu johdetaan leikkauspolttimessa olevan elektronin ja leikattavan materiaalin välissä palavaan valoakaareen, joka tunnetaan plasmaleikkauksessa nimellä plasmakaari. Plasmakaaren kuristamiseen käytetään apuna suutinta, jotta kaaresta saadaan keskittyneempi ja kuumempi. Plasmaleikkauksen toimintaperiaate sekä kuristuksen vaikutus kaaren lämpötilaan ja keskittyneisyyteen on esitetty kuvassa 2 (Ihalainen, ym. 2003, 263–264.)



Kuva 2. Plasmaleikkauksen toimintaperiaate sekä kuristuksen vaikutus kaaren lämpötilaan (Ihalainen, ym. 2003, 264).

Leikkauskaasujen muodostamalla plasmalla on plasmaleikkauksessa kaksi tehtävää, jotka ovat leikattavan materiaalin sulatus sekä sulatetun materiaalin puhaltaminen pois leikkausrailosta. Yleisimmin käytettyjä leikkauskaasuja ovat argon, vety, typpi, happi sekä paineilma tai näiden sekoitukset kuten Varigon (Ihalainen, ym. 2003, 264; BE Group, [Viitattu 28.10.2021].)

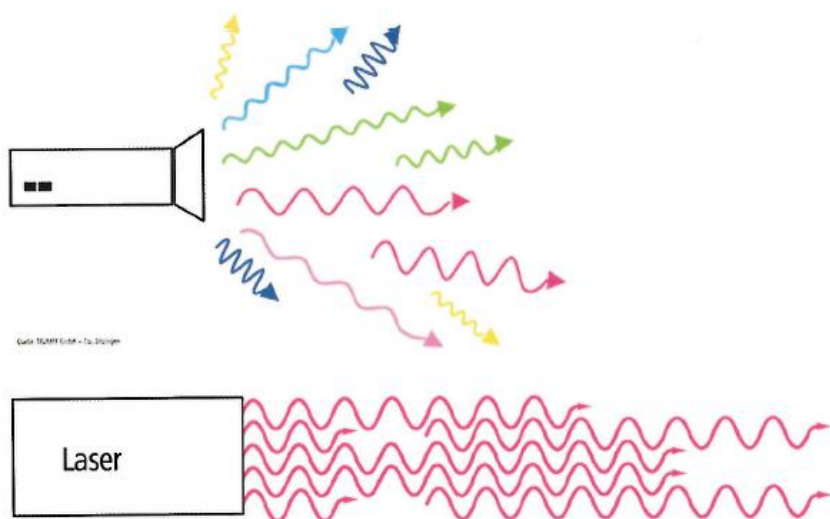
Plasmaleikkauksessa on hyviä ja huonoja puolia verrattuna muihin termisiin leikkausmenetelmiin. Hyvinä puolina voidaan pitää sitä, että plasmaleikkaamalla pystytään leikkaamaan periaatteessa kaikkia sähköä johtavia materiaaleja. Leikkausnopeudet ovat suuria alle 30 mm materiaaleissa, sekä lämmönvaikutusalue on kapea, jolloin materiaalin muodonmuutokset ovat pieniä. Huonoina puolina voidaan pitää esimerkiksi seuraavia ominaisuuksia: leikkaukslaitteiston hinta saattaa nousta korkeaksi käytettäessä useampaa poltinta, koska jokainen poltin tarvitsee oman virtalähteen, leikkausnopeus putoaa nopeasti levypaksuuden kasvaessa, leikkauspinnan laatu on muita termisiä leikkausmenetelmiä huonompi, menetelmä ei ole työntekijäystävällinen ja leikkauspintojen kovuuden kasvu voi olla suuri (Ihalainen, ym. 2003, 265–266.)

3.3 Laserleikkaus

Laserleikkaus on termien leikkausmenetelmä, jossa leikkaaminen tapahtuu joko sulamis- tai palamisreaktiona. Lasersulatusleikkauksessa lasersäteilyn energiaa hyväksikäyttäen

sulatetaan materiaaliin railo, jonka jälkeen sula metalli puhalletaan pois kaasusuihkun avulla. Laserpolttoleikkauksessa lasersäteilyn energiaa hyväksikäyttäen kuumennetaan kappale syttymislämpötilaansa, jonka jälkeen railoon suunnattu kaasusuihku suorittaa materiaalissa hapettumisen ja sulan metallioksidin poistamisen, kuten polttoleikkauksessa (Ihalainen, ym. 2003, 266.)

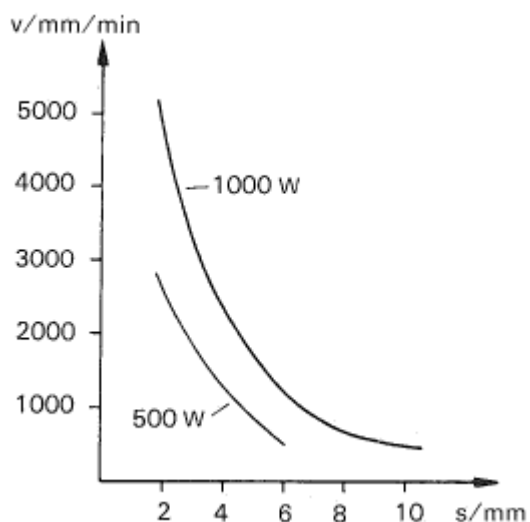
Laservalolle on ominaista, että valo on koherenttia, jolla tarkoitetaan, että kaikki valonsäteet ovat samassa vaiheessa. Laservalo on monokromaattista, joka tarkoittaa, että kaikilla säteillä on sama aallonpituus ja kaikkien valonsäteiden kulkusuunta on sama. Lasersäteen ominaisuudet on esitetty kuvassa 3 (Ihalainen, ym. 2003, 266.)



Kuva 3. Lasersäteen ominaisuudet (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 36).

Laserleikkauksella saavutetaan kappaleelle hyvä mittatarkkuus. Tämä johtuu laserleikkauksoneiden mekaanisen rakenteen tarkkuudesta, sekä numeerisen ohjauksen käytöstä. Lisäksi laserleikkaus on erittäin vakaa prosessi. Laserilla leikatut pinnat ovat kohtisuorassa levyn pintaa vastaan ja leikkauspinnan yläsärmä on terävä. Laserleikkauksessa jäysteen muodostuminen on vähäistä seostamattomilla teräksillä. Sen sijaan ruostumattomilla teräksillä jäystettä saattaa muodostua runsaasti. Leikkauspinnan laatuun vaikuttavat pääasiassa laserin teho, leikkausnopeus, leikkaushapen paine sekä polttoväli (Ihalainen, ym. 2003, 266.)

Laserleikkaukselle on tyypillistä, että leikkausnopeudet putoavat huomattavasti materiaalihyvyyden kasvaessa. Kuvassa 4 on esitetty CO₂-laserin tehon ja levyvahvuuden vaikutukset leikkausnopeuteen (Ihalainen, ym. 2003, 267.)



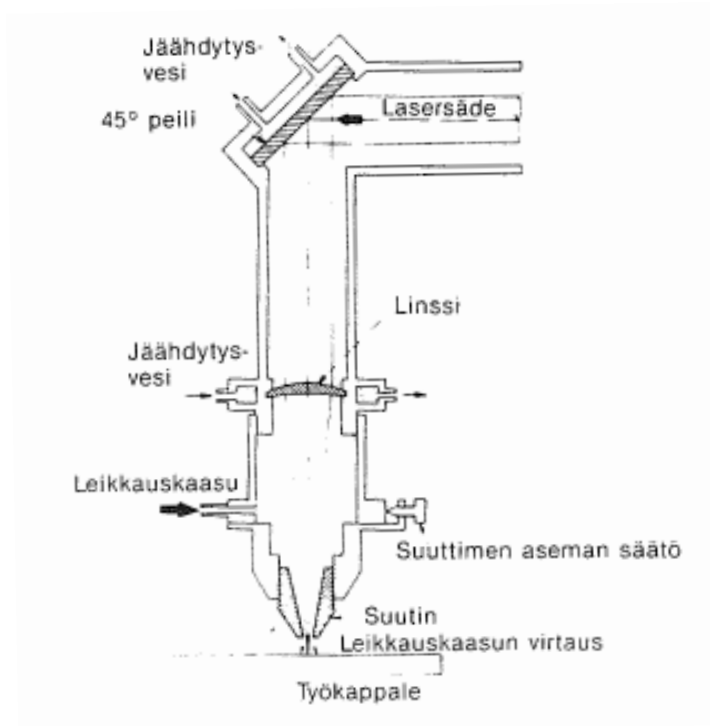
Kuva 4. CO₂-laserin tehon ja levyvahvuuden vaikutus leikkausnopeuteen (Ihalainen, ym. 2003, 267).

Metallien soveltuvuus laserleikkaukseen määrittyy sen mukaan, kuinka hyvin ne pystyvät absorboimaan lasersäteilyä. Materiaalinen absorbointikyky riippuu lasersäteen aallonpituudesta. CO₂-laserleikkauksessa aallonpituus on 0,16 μm, joten esimerkiksi materiaalit kuten kupari ja alumiini eivät pysty absorboimaan säteilyä riittävästi tällä aallonpituudella (Ihalainen, ym. 2003, 267.)

3.3.1 Hiilidioksidilaser

Ensimmäiset hiilidioksidilaserit, eli CO₂-laserit tulivat ohutmetalliteollisuuden tietoisuuteen jo vuonna 1972. Siitä lähtien CO₂-laser on ollut eniten käytetty lasertyyppi metalliteollisuudessa. Kuitulaserit ovat kumminkin kehittyneet nopeasti, ja niitä suositaankin nykyään enemmän useilla teollisuuden aloilla. Vaikka CO₂-laserit ovat vanhempi ja mahdollisesti katoava tekniikka, toimivat ne edelleen erinomaisesti varsinkin muiden materiaalien kuin metallien leikkaamiseen (Abraham 2022; Ansari, [Viitattu 27.4.2022].)

Tyypilliseen CO₂-laserleikkauskoneeseen kuuluvat korkeajännitegeneraattori, tyhjiöpumppu, jäähdytysveden sekä kaasujen paineista ja virtauksista huolehtiva järjestelmä, käyttöpaneeli, resonaattori ja leikkauspää. Kuvassa 5 on esitetty laserleikkauspään toimintaperiaate (Ihalainen, ym. 2003, 266.)

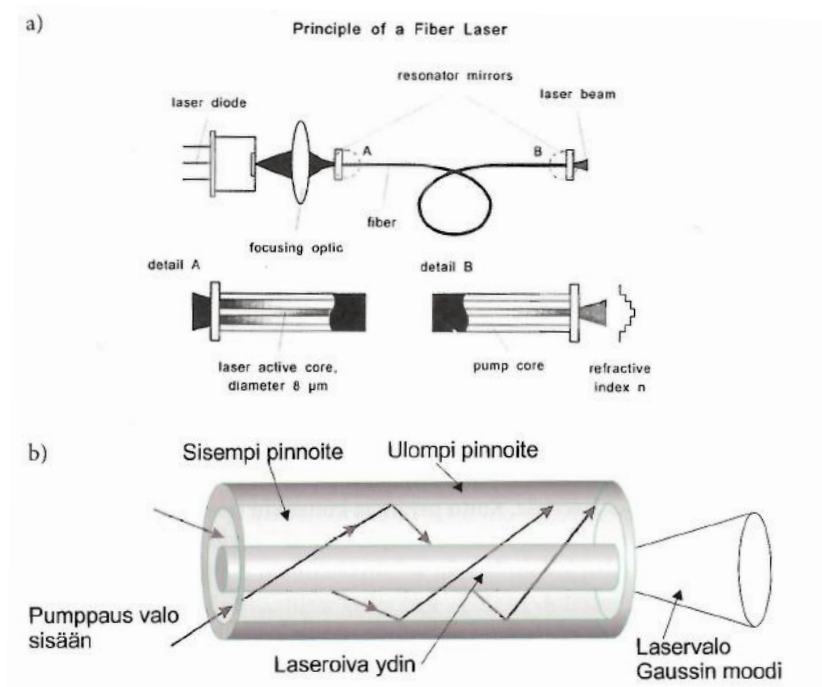


Kuva 5. CO₂-laserleikkauspään toimintaperiaate (Ihalainen, ym. 2003, 266).

3.3.2 Kuitulaser

Kuitulaserit ovat olleet yksi mullistavimmista teknologioista sen jälkeen, kun CO₂-laserit otettiin ensimmäisen kerran käyttöön metalliteollisuudessa. Suhteellisen lyhyessä ajassa kuitulaserit ovat edistyneet valtavasti ohutlevynleikkaustekniikassa. Kuitulaserit saavuttivat 4 kW:n leikkaustehon rajapyykin vain viidessä vuodessa, kun CO₂-lasertekniikalla samaan meni neljä kertaa pidempi aika. Nykyään kuitulasereita on saatavilla jopa 30 kW:n teholla. Kuitulaserin käyttö- ja huoltokustannukset ovat huomattavasti pienemmät ja leikkausnopeus voi olla jopa viisi kertaa nopeampi kuin vastaavassa CO₂-laserissa (Artega 2021; Eagle Group, [Viitattu 27.4.2022].)

Kuitulaserissa lasersäde synnytetään suoraan optisen kuidun sisään. Kuitu muodostaa resonaattorin ja kuidun ydin on seostettu laseroivalla väliaineella, jota pumpataan diodilaserin avulla. Kuitulaserin rakenne on tyypillisesti modulaarinen, jonka avulla saadaan saavutettua suuri teho yhdistämällä useamman lasermoduulin tehot toisiinsa. Kuitulaserin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6 (Kujanpää, ym. 2005, 68.)



Kuva 6. a) Suuritehoinen kuitulaser ja b) kuitulaserin toimintaperiaate (Kujanpää, ym. 2005, 68).

3.3.3 Laserleikkauksen edut ja huonot puolet

Laserleikkauksen yksi suurimmista eduista verrattuna muihin perinteisiin termisen leikkauksen menetelmiin on monimutkaisten ja pienten muotojen valmistaminen. Tämän mahdollistaa hyvin kapea leikkausrailo, joka on esimerkiksi 5–10 mm levyvahvuuksilla vain 0,5–1 mm. Lisäksi työkappaleeseen kohdistuva lämmöntuonti on vähäistä, joten materiaalin muodonmuutoksia ei yleensä tapahdu (Ihalainen, ym. 2003, 267.)

Laserleikkauksen edut

- suuri leikkausnopeus ohuilla materiaalivahvuuksilla.
- kapea lämmönvaikutusalue, joten lämmön aiheuttamia muodonmuutoksia ei yleensä esiinny.
- leikkauspinnan laatu on hyvä ja mittatarkkuus on suuri
- leikkausrailo on kapea, joka säästää materiaalia ja mahdollistaa pienten ja monimutkaisten muotojen valmistamisen
- ei työkalun kulumista
- menetelmä on yksinkertainen käyttää, turvallinen ja työntekijäystävällinen
- alhaiset käyttökustannukset

Laserleikkauksen huonot puolet

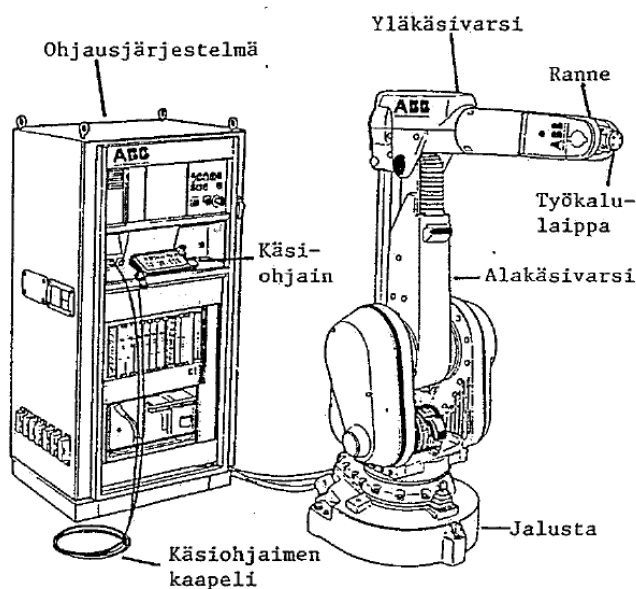
- laserleikkauslaitteiston korkea hinta
- leikkausnopeus putoaa nopeasti levyvahvuuden kasvaessa
- teollisessa käytössä olevilla lasereilla voidaan leikata vain ohuita ainevahvuuksia

(Ihalainen, ym. 2003, 267–268.)

4 Teollisuusrobotiikka

Robotilla tarkoitetaan uudelleen ohjelmoitavaa, monikäyttöistä laitteistoa, joka on suunniteltu liikuttamaan materiaalia, osia tai työkaluja ohjelmoituja ratoja pitkin, sekä suorittamaan erilaisia työkiertoja ja tehtäviä. Robottia voidaan myös kuvailla laitteistoksi, joka jäljittelee ihmisen tekemiä toimia perustuen tietokoneen ohjelmointiin (Miller M., Miller R., 2017, 2). Uudelleenohjelmoitavuus on olennainen asia robotiikassa, mutta nykyaikaisissa aistinohjatuissa robottisovelluksissa pelkkä uudelleenohjelmoitavuus ei riitä, vaan robotin on saatava muodostaa liikeratansa tuotteiden suunnittelutiedoista ja ympäristömallista, jota päivitetään prosessia tarkkailevien anturien avulla (Kuivanen 1999, 13.)

Teollisuusrobotti on yksinkertaistettuna mekaaninen laite, joka siirtää työkalun kiinnityslaippaa halutulla tavalla. Robotin liikerata voi olla ohjelmallisesti etukäteen luotu, toimintaympäristön tapahtumiin mukautuva tai antureiden signaalien mukaan liikeradan aikana luotu. Robotin jalustan ja työkalun kiinnityslaipan välissä on tukivarsia, joiden liitoksissa on nivelet. Robotin niveliä liikutetaan servomoottorien avulla. Kuvassa 7 on esitetty tyypillinen teollisuusrobotti ja sen tärkeimmät komponentit (Kuivanen 1999, 13.)



Kuva 7. Yleisimpien robottityyppien rakenne (ISO 8373) (Kuivanen 1999, 13).

4.1 Robottityypit ja rakenteet

Teollisuusrobottivalmistajia on maailmanlaajuisesti useita satoja yrityksiä, ja jokaisen yrityksen valikoimaan on kuulunut jatkuvasti useita eri malleja. Yhden mallin elinkaari on ollut keskimäärin neljä vuotta, joten erilaisia teollisuusrobotteja on suunniteltu ajan saatossa useita tuhansia. Standardi ISO 8373 määrittelee yleisimmät teollisuusrobottimallit niiden mekaanisen rakenteen mukaan. Yleisimmät teollisuusrobottimallit ja niiden kinemaattiset kaaviot sekä työalueet on esitetty kuvassa 8 (Kuivanen 1999, 12–13.)

Nimitys pääakseleiden mukaan	Rakenne	Kinemaattinen kaavio	Työalue
Suorakulmainen robotti			
Sylinterirobotti			
Napa-koordinaatisto-robotti			
Scara-robotti			
Kiertyvänivelinen robotti			
Rinnakkais-rakenteinen robotti			

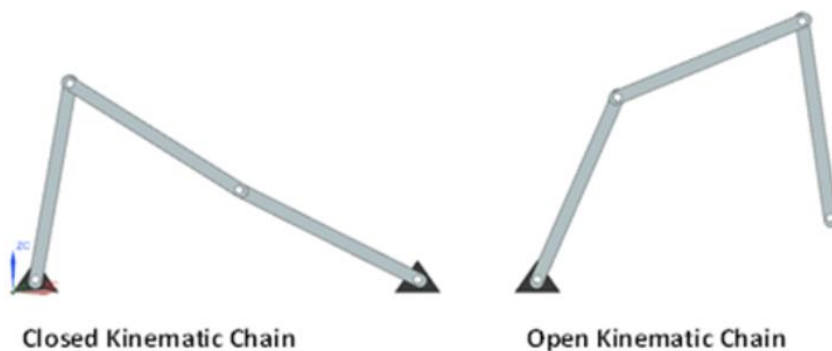
Kuva 8. Teollisuusrobotti ja tavallisimmat komponentit (Kuivanen 1999, 12).

Robotti koostuu tukivarsista ja nivelistä. Kahden tukivarren välissä on nivel, joka mahdollistaa tukivarsien liikkeen toistensa suhteen tietyn suoran suunnassa joko kohtisuorasti tai suoran ympäri. Yhtä robotin perusliikettä, eli niveltä, kutsutaan

vapausasteeksi. Jokaista vapausastetta kohti on tavanomaisesti yksi toimilaitte, joka on yleensä moottori tai sylinteri. Toimilaitteen avulla niveltä liikutetaan, jotta saadaan tukivarret haluttuun asentoon. Differentiaali rakenteessa jokaista vapausastetta kohden on kaksi toimilaitetta (Kuivanen 1999, 15.)

Robottisovellusta valittaessa kannattaa ottaa huomioon tarvittava vapausasteiden määrä ja valita juuri optimaalinen tarvittavaan työhön. Esimerkiksi hitsauksessa riittää viisi vapausastetta, koska hitsauslangan kiertymäkulmalla itsensä ympäri ei ole prosessissa merkitystä. Kuitenkin lähes kaikissa myytävissä kiertymänivelisissä robottimalleissa on kuusi vapausastetta, jotta eri robottimallien valikoima saataisiin pidettyä mahdollisimman suppeana (Kuivanen 1999, 16.)

Robottien rakenteet voidaan yleisesti jakaa kahteen eri ryhmään. Suljettu kinemaattinen rakenne ja avoin kinemaattinen rakenne. Avoimessa kinemaattisessa rakenteessa tukivarret on kiinnitetty toistensa perään ja suljetussa rakenteessa tukivarret ovat toisiinsa nähden rinnakkain. Kuvassa 9 on esitetty avoin ja suljettu kinemaattinen rakenne (Kuivanen 1999, 15.)



Kuva 9. Avoin ja suljettu kinemaattinen rakenne (Siemens, [Viitattu 22.10.2021]).

4.2 Robottien ohjaus ja ohjelmointi

Robotin ohjausjärjestelmät ovat reaaliaikaisia prosessitietokoneita, jotka ohjaavat robotin toimilaitteita tuhansia kertoja sekunnissa ja pystyvät reagoimaan ympäristön viesteihin,

kuten anturisignaaleihin millisekunnissa. Tavallisesti ohjausjärjestelmään kuuluvat keskusyksikkö, massamuisti, liitännät käsiohjaukselle ja ulkoisia tietokoneita varten, nivelkohtaiset servotoimilaitteet ja teholähteet (Kuivanen 1999, 34.)

Robotinohjauksella on monia eri tehtäviä robotin toiminnan kannalta. Robottien ohjauksen pääasiallinen tehtävä on tietojen käsittely. Ohjaus havainnoi erilaisia virhetiloja, jotka se tulkitsee törmäyksinä tai väärinä liikkeinä. Kaiken täytyy siis olla kunnossa, tai muuten käsivarsi ei liiku. Robottien ohjausjärjestelmien tehtävät voidaan jakaa viiteen ryhmään.

Liikeohjaus

- toimilaitteiden ohjaus paikkaohjearvoon, myös haluttu liiketila säilyttäen
- liikkeet ohjelmien, ohjelmoinnin ja radan opetuksen aikana.

Ohjelmointi ja opetus

- liikeratojen muodostaminen käsiohjauksen avulla tai muualla luotujen robottiohjelmien hyväksyminen
- liikkeiden hidastaminen ohjelmien testausvaiheessa.
- loogisten rakenteiden muodostaminen ohjelmaan, sekä aistimien vaikutuksen huomioonottaminen
- ohjelmien muuttaminen
- ohjelmien talletus ja lataaminen

Ohjelmien toisto ja liikkeiden suoritus

- ohjelmien tulkinta, tavallisesti käskyriivi kerrallaan

- liikkeiden lisäksi aistimien vaikutus liikeratoihin ja ohjelman vaiheiden suoritusjärjestykseen

Turvallisuustoimintojen toteuttaminen

- hätäpysäytys ja väärin liikkeiden estäminen
- diagnostiikka huoltoa varten
- robotin toiminnan alustaminen esimerkiksi sähkökatkon jälkeen
- testaus
- huolto ja käyttöönotto
- osittainen toiminta huoltotehtävien aikana. Esimerkiksi jarrujen avaus käsivarren liikuttamiseksi ilman moottoreiden käyttöä.

(Kuivanen 1999, 34.)

Ensimmäiset robottien ohjelmoinnit tehtiin sähkömekaanisina kytkentöinä, joilla saatiin nivelet liikkumaan päin haluttuja rajakatkaisijoita vaihe kerrallaan. Seuraavaksi robotin ohjelmoinnissa siirryttiin opettamaan kädenliikkeitä johdattelemalla, eli nauhoittamalla. Nauhoituksessa tallennettiin nivelten paikka-anturien tietoja ja toistettiin näitä liikkeitä. Suurin osa nykyisistä robottisovelluksista on toteutettu liikuttamalla käsivarsi tiettyihin aseisiin, mutta luomalla toiminnan logiikka ja useita liikeratojen asemia tietokoneohjelmoinnin avulla. Robotille pystytään myös tekemään mallipohjaista ohjelmointia erillisessä tietokoneessa, kun robotista ja työympäristöstä on luotu kolmiulotteinen tietokonemalli (Kuivanen 1999, 78.)

Robottiohjelmoinnin tärkeimpiä tehtäviä ovat toimintaympäristön ja logiikan laatiminen robottikäsivarren liikkeille, työkalun liikkeiden aikaansaamiseksi, käsivarren liikkeiden synkronointi ympäristön signaaleihin, tietojen välittäminen muihin laitteisiin ja robotin toiminnan määrittäminen virhetilanteissa (Kuivanen 1999, 78.)

4.2.1 Teollisuusrobottien käskykanta

Joidenkin teollisuusrobottien käskykannassa on jopa 150 käskyä. Robottien käskykantaan kuuluu myös ulkoisten järjestelmien käyttöön tarvittavia käskyjä, kuten esimerkiksi hitsauslaitteistojen ohjaamiseen liittyviä komentoja (Kuivanen 1999, 80.)

Tyypillisen teollisuus robotin peruskäskykanta

- liiketavan valinta, jolla valitaan lineaarinen, ympyrä- tai nivelinterpolaatio
- liikekäsky suhteellisesti muutettuun pisteeseen, mutta parametreinä annetussa asennossa
- liikeradan siirto kolmessa ulottuvuudessa
- tehtäväkoordinaatiston siirto kuudessa vapausasteessa
- pysähtyminen ulkoisen anturin tilan muuttuessa odotetusti
- liikenopeuden ohjaus ulkoisella anturilla
- ulkoisten antureiden tietojen perusteella tehtävät korjaukset nimelliseen liikerataan
- työkalukoordinaatistoliikkeet
- lavan lastaus säännöllisessä muodossa tai lavan purkaminen vastaavasti
- ehto-, toisto- ja silmukkarakenteet
- binäärisignaalien luku ja kirjoitus
- analogisten signaalien luku ja kirjoitus

Ulkoisiin laitteisiin liittyvät käskyt

- robotin liikkeiden kytkeminen kuljettimen liikkeeseen pulssianturin avulla
- näköjärjestelmän käyttö kappaleen poimimisessa
- liikeratojen korjaus antureiden avulla
- kaarihitsauslaitteen ohjaus ja vaaputuksen avulla toteutettu railon seuranta
- pistehitsausprosessin ohjaus

(Kuivanen 1999, 80.)

4.2.2 Opettamalla ohjelmointi

Yleisesti robotteja ohjelmoidaan siirtämällä työkalu haluttuun pisteeseen käsiohjaimen avulla ja tallentamalla paikkatieto muistiin. Tätä ohjelmointitapaa kutsutaan usein opetukseksi. Liikkumista pisteiden välillä tai kohdeaseman valintaa ohjataan ohjelmoinnista tutuilla menetelmillä, eli erilaisilla hyppykäskyillä ja aliohjelmilla. Ohjelma pystytään luomaan kokonaisuudessaan robotin käsiohjaimen avulla, eli ulkopuolista PC:llä tehtävää etäohjelmointia ei välttämättä tarvita (Kuivanen 1999, 79.)

4.2.3 Johdattamalla ohjelmointi

Robottia voidaan myös ohjelmoida näyttämällä työkalulle tietty liikerata. Tätä ohjelmointitapaa kutsutaan johdattamalla ohjelmoinniksi. Tästä ohjelmointitavasta tuli vallitseva menetelmä maalausroboteissa robotiikan yleistyessä 1960-luvulla. Robotin käsivarren toimilaitteet vapautettiin ja ihminen liikutti työkalua lihasvoimin. Nivelten paikkaanturien lukemat tallennettiin instrumenttinauhuriin, joiden perusteella lopullinen liikerata muodostettiin. Johdattamalla ohjelmoinnin huono puoli on ohjelman muuttamisen

hankaluus: jos rata ei onnistu, joudutaan se ohjelmoimaan alusta uudestaan (Kuivanen 1999, 78.)

Johdattamalla ohjelmointia käytetään myös nykyaikaisissa yhteistyöroboteissa. Robotille näytetään suoritettava liike, jonka jälkeen robotti tallentaa paikkatiedot muistiin liikeradan aikaansaamiseksi. Voimaohjauksen yleistyessä nykyaikaisissa yhteistyöroboteissa johdattamalla ohjelmoinnista on tullut tavallaan kehittynein, nopein ja helpoin ohjelmointitapa. Kuvassa 10 on demonstroitu yhteistyörobotin johdattamalla ohjelmointia. Työkalulaipasta käsin liikuttamalla robotin kaikki tarvittavat nivelet liikkuvat liikutettavan radan mukaan (Robotiikka 2016, [Viitattu 20.4.2022].)



Kuva 10. Liikeradan opettaminen yhteistyörobotille (Robotiikka 2016, [Viitattu 20.4.2022]).

4.2.4 Etäohjelmointi

Mallipohjaisella etäohjelmoinnilla tarkoitetaan robotin ohjelmointia ilman tuotantorobottia. Ohjelmointi suoritetaan tuotannon ulkopuolisessa tietokoneessa käyttäen graafista 3D-

käyttöliittymää, robotin ja sen toimintaympäristön simulointimalleja sekä hyödyntäen valmistettavan tuotteen 3D-muototietoja (Kuivanen 1999, 81.)

Mallipohjainen ohjelmointi sopii käytettäväksi, kun tuotanto on asiakasohjautuvaa, tuotantosarjat ovat pieniä ja tuotteiden elinkaaret ovat lyhyitä. Mallipohjainen ohjelmointi on hyvä vaihtoehto myös silloin, kun valmistusprosessissa on paljon paikoituspisteitä, kuten hitsaus, kiillotus, maalaus, pinnoitus, työstö jne. On myös olemassa prosesseja, joissa robottia ei voida ohjelmoida tuotannossa esimerkiksi turvallisuusriskin takia, kuten valimot, ampumatarviketeollisuus ja ydinvoimalaitokset (Kuivanen 1999, 82.)

4.3 Yhteistyörobotiikka ja käyttökohteet

Yhteistyörobotit (Collaborative Robots), eli cobotit, ovat kevytrakenteisia robotteja, jotka on suunniteltu työskentelemään yhteistyössä ihmisen kanssa tai ihmisen läheisyydessä. Ihminen pystyy työskentelemään robotin kanssa samassa tilassa ilman suoja-aitoja turvallisesti, koska törmätessään esteeseen cobotin liike pysähtyy automaattisesti (Laplace, [Viitattu 25.4.2022]; Machine Tool, [Viitattu 25.4.2022].)

Verrattuna perinteiseen teollisuusrobottiin cobotit ovat hitaampia, pienempitehoisia ja halvempia. Cobotteihin sovelletaan teollisuuden hyväksymiä turvallisuusstandardeja, ja niitä käytetään usein vaarallisten, likaisten ja toistuvien töiden tekemiseen työtapaturmien välttämiseksi. Turvallisuuden ohella cobotit parantavat yleistä tehokkuutta työskentelemällä yhteistyössä ihmisen kanssa. Kuvassa 11 on listattu cobotin hyviä puolia verrattuna perinteiseen teollisuusrobottiin (Shepherd 2019; Laplace, [Viitattu 25.4.2022].)



Blind and unaware of surroundings	Sees & understands people & environment
Dangerous	Safe
Compete on precision and repeatability	Focused on flexibility and ease of use
Task must be restructured for that solution	Task done just as a human does it
Requires components and integration	Fully integrated & self contained
Requires expert programmers	Can be trained by ordinary people
Expensive	Unbelievably inexpensive

Kuva 11. Teollisuusrobotin ja cobotin erot (Laplace, [viitattu 25.4.2022]).

Perinteisen auto- ja metalliteollisuuden lisäksi yhteistyörobotit avaavat mahdollisuuksia automatisoida tuotantoaan lukuisien eri alojen yrityksille. Kevyillä, turvallisemmilla ja helppokäyttöisillä yhteistyöroboteilla on paljon laajempi valikoima käyttökohteita kuin perinteisillä teollisuusroboteilla. Alla on lueteltuna eri tuotannon aloja sekä käyttökohteita yhteistyöroboteille (Buchert 2021.)

Autoteollisuus

Autoteollisuus on automatisoinut tuotantolaitoksiaan jo 1980-luvulta lähtien. Useimmat autoteollisuuden valmistajat, kuten Toyota, Hyundai ja BMW käyttävät teollisuusrobotteja osien hitsaukseen ja maalaukseen (Buchert 2021.)

Perinteisten teollisuusrobottien kalliiden korjauskustannusten myötä autovalmistajat ovat löytäneet uusia mahdollisuuksia muiden työvaiheiden automatisoinnille. Helppokäyttöisyyden ja joustavan suunnittelun ansiosta näiden kevytrakenteisten robottien käyttö kasvaa kokoonpanolinjoilla, laaduntarkkailussa ja erilaisissa raskaiden osien siirtelytehtävissä. Kuvassa 12 on yhteistyörobotti BMW:n autotehtaalta (Buchert 2021.)

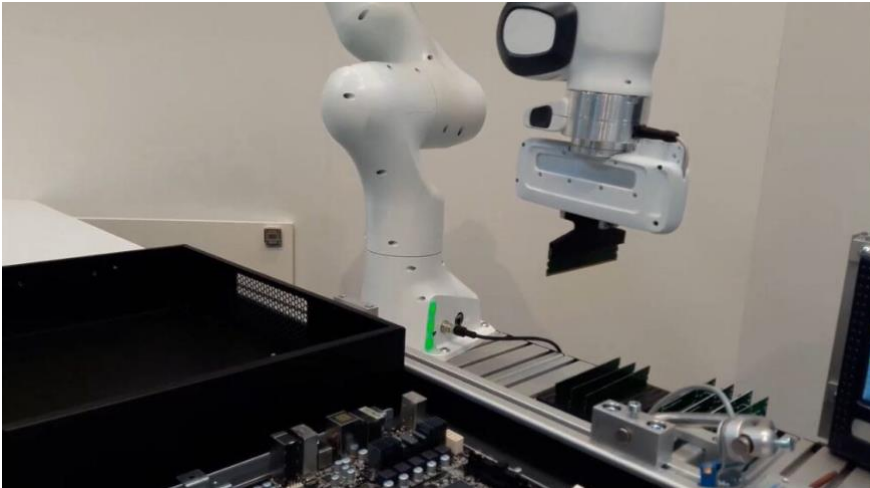


Kuva 12. Universal Robots yhteistyörobotti BMW:n autotehtaassa (Buchert 2021).

Elektroniikkateollisuus

Elektroniikkakomponenttien valmistuksen automatisoinnissa on ollut aina tavallista enemmän haasteita. Valmistus vaatii herkempiä ja tarkempia toimintoja, kuten johtojen juottamista. Tämän toteuttaminen tavallisella teollisuusrobotilla on ollut perinteisesti hankalaa (Buchert 2021.)

Cobotit sen sijaan ovat olleet kiinnostava vaihtoehto elektroniikkateollisuuden valmistajille. Moni valmistaja on todennut cobotit luotettavaksi ratkaisuksi tuotannon tehostamisessa. Hyvin ohjelmoidut cobotit pystyvät tekemään tarkkoja liikkeitä korkealla toistuvuudella. Tämän seurauksena elektroniikkateollisuudesta on tullut toiseksi suurin cobottien markkina-alue, 35 %:n markkinaosuudella vuonna 2018. Kuvassa 13 on yhteistyörobotti elektroniikkateollisuuden työtehtävissä (Buchert 2021.)



Kuva 13. Franka Emika yhteistyörobotti elektroniikkakomponenttien kokoonpanossa (Buchert 2021).

Terveydenhuolto ja lääketeollisuus

Terveydenhuolto on ollut yksi edelläkävijöistä valmistus- ja tuotantolinjojen automatisoinnissa, ja se yleisesti ruokkii uusien innovaatioiden kehittämistä. Ei siis tule yllätyksenä, että lääkeyhtiöt ovat ottaneet myös cobotit käyttöön nopealla tahdilla. Cobotteja käytetään lääketeollisuudessa esimerkiksi kokoonpanoon, pakkaamiseen, lääkkeiden annosteluun ja hyllyjen täyttämiseen. Kuvassa 14 lajitellaan lääkkeitä yhteistyörobotin avulla (Buchert 2021.)



Kuva 14. Universal Robots yhteistyörobotti lajittelemassa lääkkeitä (Buchert 2021).

Tuotteiden pakkaus ja lavaus

Tuotteiden pakkauksesta ja lavaamisesta on tullut yhä tärkeämpi osa globaalissa maailmantaloudessa. Valmistajat tarvitsevat yhä enemmän luotettavia ja mukautettuja pakkauksia ja kuormalavoja tuotteilleen. Vuonna 2017 robottien käyttö pakkaamisessa oli arviolta 4,7 miljardia dollaria ja vuoteen 2025 mennessä maailmanlaajuisen liikevaihdon ennustetaan nousevan 11,3 miljardiin dollariin (Buchert 2021.)

Cobotit ovat hyviä käsittelemään pieniä ja herkästi rikkoutuvia tuotteita, kuten esimerkiksi kananmunia. Tämän kaltaisten tuotteiden valmistajille cobotti on suosittu vaihtoehto tuotteiden pakkaamisessa. Kuvassa 15 on esimerkki pakkauscobotin työtehtävistä (Buchert 2021.)



Kuva 15. Techman yhteityörobotti pakkaamassa tuotteita (Buchert 2021).

Metalliteollisuus

Metalliteollisuudessa on ollut jo pidempään yleistä useiden työvaiheiden automatisointi, kuten hitsaus, metallin muokkaus, viimeistely, kokoonpano ja koneistus. Viimeisen vuosikymmenen aikana cobotit mahdollistivat automatisoinnin tuomat edut isommassa mittakaavassa kaikenkokoisille metalliteollisuuden yrityksille (Buchert 2021.)

Cobotit ovat todellinen voimavara metalliteollisuuden yrityksille tuotannon tehostamisessa, laadun parantamisessa ja tuotantokulujen pienentämisessä. Cobotit ovat erityisen hyviä liikaisten, vaarallisten tai toistuvia liikkeitä omaavien prosessien automatisoinnissa (Buchert 2021.)

Cobotteja on käytetty metalliteollisuudessa aina vuodesta 2007 lähtien, mutta niiden käyttö on lisääntynyt räjähdysmäisesti viime vuosina. Tutkimusyhtiö IHS:n tekemän tutkimuksen mukaan cobotteja otettiin käyttöön metalliteollisuudessa yli 100 000 kappaletta vuonna 2015. Kuvassa 16 on esimerkki hitsauksesta cobotin avulla (Buchert 2021.)



Kuva 16. Universal Robots yhteistyörobotti hitsaamassa metalliosia (Buchert 2021).

Tutkimus ja koulutus

Robotit ovat yleistyneet laajasti useilla eri tieteenaloilla. Robotteja käytetään useissa tehtävissä, jotka on perinteisesti tehty ihmisvoimin. Näitä tehtäviä voivat olla esimerkiksi koeputkien lajittelu ja merkitseminen, laboratorionäytteiden kuljettaminen ja erilaisten kemiallisten yhdisteiden sekoittaminen (Buchert 2021.)

Coboteista on tulossa myös välttämätön osa koulutusympäristössä. Cobottien ollessa helppokäyttöisiä ja turvallisia oppilaiden käytettäväksi, niistä on tullut suosittu työkalu teknisten- ja tieteenalojen kouluprojekteissa. Kuvassa 15 on erään ruotsalaisen yliopiston koulutuskäytössä oleva yhteistyörobotti (Buchert 2021.)



Kuva 17. ABB:n yhteistyörobotti avustaa erään ruotsalaisen yliopiston tutkijoita (*Buchert 2021*).

Logistiikka ja varastointi

Globalisaation myötä kaupankäynnistä on tullut dynaamisempaa kuin koskaan aikaisemmin. Samaan aikaan toimitusketjusta on tullut entistä monimutkaisempi ja hajautetumpi. Sopeutuakseen muutokseen varastot alkavat käyttämään yhä enemmän robotteja keräily-, pakkaus- ja lähetystoimintoihin. Vaikka robotit ja ohjelmistot mahdollistavat varastojen paremman tuottavuuden, ne vaativat myös tarkkaa logistiikkaa ja kuljetussuunnittelua. Tämä johtuu siitä, että kuljetus- ja logistiikkaverkoston pitää pystyä yhdistämään varastot ja jälleenmyyjät asiakastarpeen täyttämiseksi (Buchert 2021.)

Tiukkojen toimitusaikojen takia logistiikkayritykset ovat siirtymässä cobotteihin, voidakseen automatisoida varastojaan entistä monipuolisemmin. Varaston työntekijät voivat ohjelmoida Cobotteja helposti uusiin tehtäviin, jotta pystytään käsittelemään tilaukset tiukkojen aikatauluvaatimusten mukaan. Kuvassa 18 on esimerkki varaston hallintaan käytettävästä yhteistyörobotista (Buchert 2021.)



Kuva 18. Universal Robots yhteistyörobotti hallinnoimassa varastoa (Buchert 2021).

5 Hitsaus

Hitsauksella tarkoitetaan kappaleiden liittämistä toisiinsa lämmön tai puristuksen avulla. Liitettävien metallien rakeet tai muovien molekyylit liittyvät toisiinsa ja lämpötilan laskiessa osat muodostavat kiinteän liitoksen. Hitsauksen apuna voidaan käyttää lisäainetta, jonka sulamispiste on suunnilleen sama kuin hitsattavalla perusaineella (ESAB, [Viitattu 28.4.2022]; Lepola & Makkonen 2001, 12.)

Useimmissa hitsausprosesseissa liitettävien osien railopinnat ja mahdollinen hitsauslisäaine sulatetaan lämmön avulla. Lämmönlähteenä hitsausprosesseissa käytetään muun muassa valokaarta, kaasuliekkiä, fokusoitua sädettä (laser- tai elektronisuihku), mekaanista energiaa ja diffuusiota. Yleisimmin käytetty lämmönlähde on valokaari, ja näitä hitsausprosesseja kutsutaan kaarihitsausprosesseiksi (ESAB, [Viitattu 28.4.2022].)

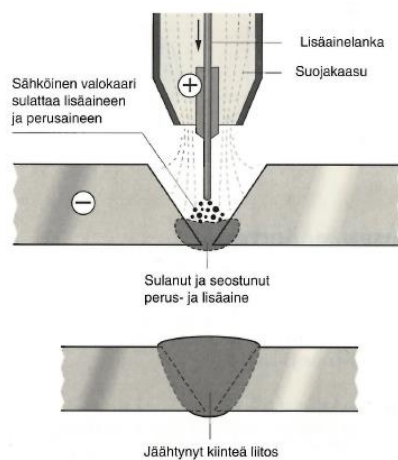
Valokaarella tarkoitetaan kaasussa tapahtuvaa sähköpurkausta. Valokaaren avulla pystytään kehittämään nopeasti todella korkeita lämpötiloja, jotka voivat olla jopa kymmeniä tuhansia asteita. Valokaaren lämpötila vaihtelee eri hitsausprosesseissa, esimerkiksi puikkohitsauksessa valokaaren ytimen lämpötila on noin 5000-6000 °C (ESAB, [Viitattu 28.4.2022].)

Hitsaustapahtumaa tulee suojata ympäröivältä ilmalta, koska ilmassa oleva typpi ja happi tekevät hitsistä hauraan. Hitsisulan suojaamiseen on useita eri keinoja hitsausprosessista riippuen:

- suojakaasu: MIG/MAG- ja TIG-hitsaus
- suojakaasu ja kuona: MAG-täytelankahitsaus
- kuona: puikko- ja jauhekaarhitsaus
- tyhjiö: elektronisuihkuhitsaus
- mekaaninen puristus: vastushitsaus (ESAB, [Viitattu 28.4.2022].)

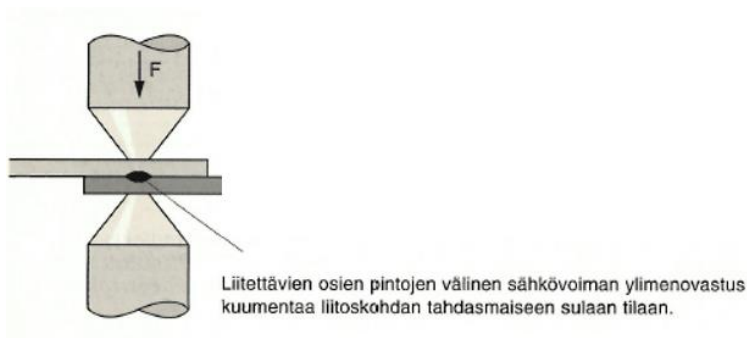
5.1 Sula- ja puristushitsaus

Hitsausmenetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään, joita ovat sulahitsaus ja puristushitsaus. Sulahitsausmenetelmässä kuumennetaan hitsattavien osien rajapinnat sekä mahdollinen lisäaine sulamislämpötilaansa. Tämän prosessin tuloksena hitsausrailoon syntyy hitsisula, joka jäähtyessään liittää osat kiinni toisiinsa ilman puristusta. Sulahitsaus voidaan tehdä ilman lisäainetta tai lisäaineen kanssa. Kuvassa 19 on esitetty sulahitsauksen toimintaperiaate (ESAB, [Viitattu 28.4.2022]; Lepola & Makkonen 2001, 12.)



Kuva 19. Sulahitsauksen toimintaperiaate (Lepola & Makkonen 2001, 12).

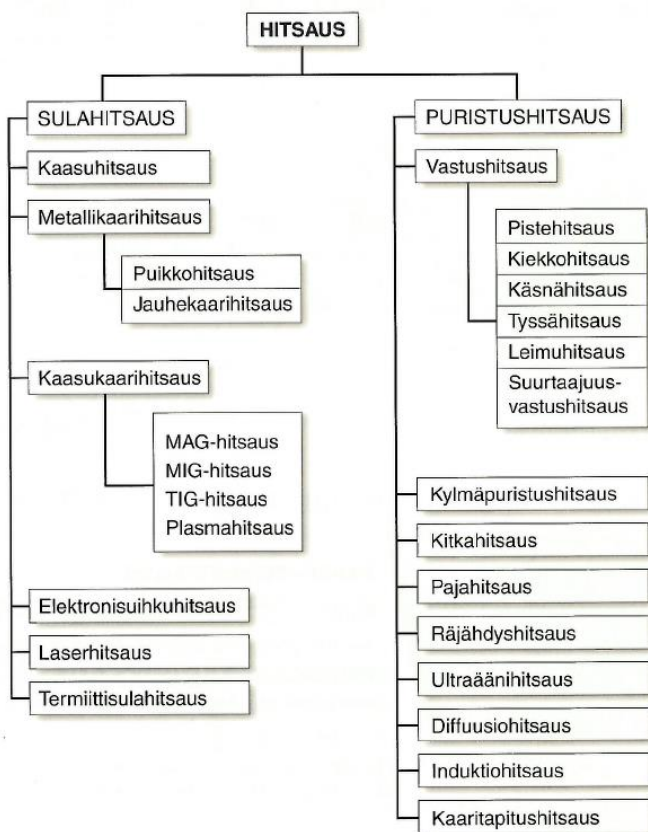
Puristushitsausmenetelmässä ei käytetä apuna lisäainetta osien yhteen liittämiseen. Liitoskohtien rajapinnat kuumennetaan tahdasmaiseen lämpötilaan, jonka jälkeen osia puristetaan yhteen määrättyllä voimalla, joka saa aikaan kiinteän hitsausliitoksen. Kuvassa 20 on puristushitsauksen toimintaperiaate (Lepola & Makkonen 2001, 12.)



Kuva 20. Puristushitsauksen toimintaperiaate (Lepola & Makkonen 2001, 12).

5.2 Hitsausprosessit

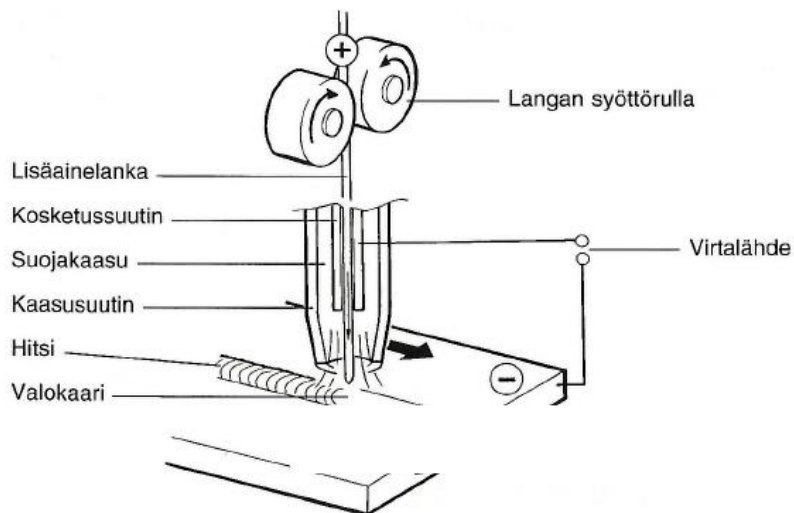
Sula- ja puristushitsausmenetelmiin kuuluu useampia eri hitsausmenetelmiä, jotka on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Hitsausprosessit (Lepola & Makkonen 2001, 13).

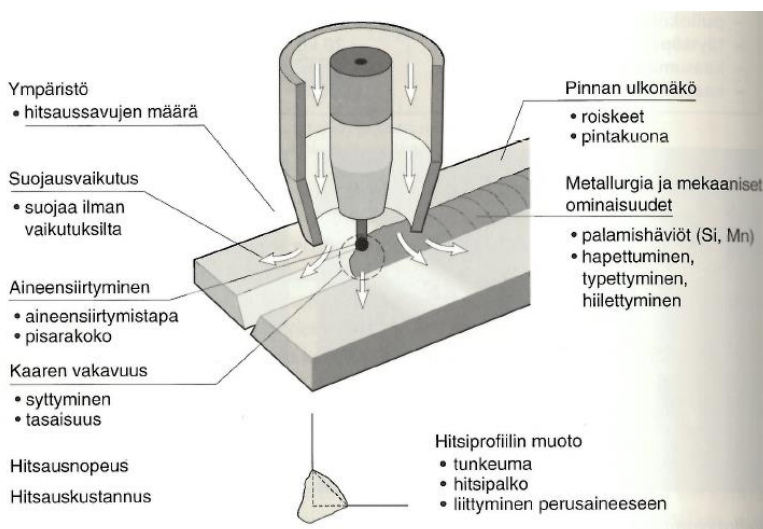
5.2.1 MIG- ja MAG-hitsaus

MIG- ja MAG-hitsausprosessit ovat kaasukaarihitsausprosesseja, joissa valokaari muodostuu lisäainelangan kärjen ja perusaineen välille. Lisäainelankaa syötetään vakionopeudella suoja kaasun suojaamaan hitsauskohtaan, ja aineiden sulattamiseen tarvittava lämpö tuotetaan valokaaren avulla. Kuvassa 22 on esitetty MIG- ja MAG-hitsauksen toimintaperiaate (Lepola & Makkonen 2001, 127.)



Kuva 22. MIG/MAG-hitsauksen toimintaperiaate (Lepola & Makkonen 2001, 16).

MIG- ja MAG-hitsauksen erona on hitsausprosessissa käytettävä suojakaasu. Suojakaasun pääasiallinen tehtävä on suojata valokaaren tilaa ja hitsisulaa ympäröivältä ilmalta. Suojakaasu vaikuttaa merkittävästi aineen siirtymistapaan, hitsin tunkeumaan, palon muodostumiseen sekä tuottavuuteen. Suojakaasun tehtävät on esitetty kuvassa 23 (Ionix, [Viitattu 30.4.2022].)



Kuva 23. Suojakaasun vaikutukset kaasukaarihitsauksessa (Lepola & Makkonen 2001, 136).

MIG-hitsauksessa käytetään inerttiä suojakaasua, joka on reagoimaton eli passiivinen kaasu. Näitä suojakaasuja ovat jalokaasut kuten argon tai argonin ja heliumin kaasuseos. MIG-hitsausta käytetään ei-rautapohjaisten metallien hitsaukseen, ja näitä materiaaleja ovat esimerkiksi alumiini, titaani ja kupari (Ionix, [Viitattu 30.4.2022].)

MAG-hitsauksessa käytetään aktiivista suojakaasua, joka reagoi hitsisulassa olevien aineiden kanssa. MAG-hitsauksessa käytetyt suojakaasut ovat tyypillisesti argonin ja hiilidioksidin, argonin ja hapen, argonin, hapen ja hiilidioksidin seos tai puhdas hiilidioksidi. MAG-hitsausta käytetään terästen hitsaamiseen (Ionix, [Viitattu 30.4.2022].)

MIG- ja MAG-hitsauksen edut

- lisäaineensyöttö on jatkuvaa, jolloin hitsiin ei tule katkoja lisäaineen vaihtojen takia.
- lisäaine ei muodosta kuonaa, joten kuonanpoistamista jälkikäteen ei tarvita ja kuonasulkeumien vaara on vähäinen.
- tunkeuman syvyys säädettävissä virran avulla.
- hyvä tuottavuus ja laaja hitsaustehojen säätömahdollisuus.
- hitsaus mahdollista kaikissa asennoissa.
- edullinen lisäaine
- prosessin automatisointi helppoa.

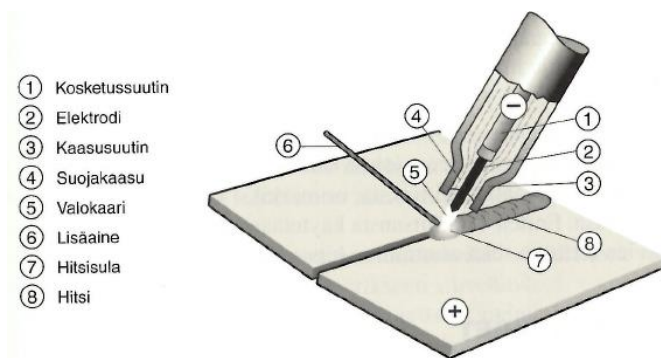
MIG- ja MAG-hitsauksen huonot puolet

- arka vedolle ja tuulelle
- ulottuvuus ja luokse päästävyys hitsauskoneeseen rajoittunut

(Lepola & Makkonen 2001, 127.)

5.2.2 TIG-hitsaus

TIG-hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari muodostuu sulamattoman volfrاميةlektrodin ja perusaineen välille. Perusaine ja mahdollinen lisäaine sulatetaan valokaaren avulla, joka muodostaa hitsausrailoon hitsisulan. Elektrodi ja hitsisula suojataan ympäröivältä ilmalta passiivisen suojakaasun avulla, joka on argonia, heliumia tai näiden yhdistettä. TIG-hitsauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 24 (Lepola & Makkonen 2001, 197,215.)



Kuva 24. TIG-hitsauksen toimintaperiaate (Lepola & Makkonen 2001, 197).

TIG-hitsauksen tärkein ero muihin kaasukaarihitsausprosesseihin on sulamaton volfrاميةlektrodi, poikkeuksena plasmahitsaus, jossa käytetään myös tyypillisesti volframista valmistettua elektrodia (Lepola & Makkonen 2001, 198.)

TIG-hitsausta voidaan tehdä ilman lisäainetta tai lisäaineen kanssa. Käsien suoritettavassa TIG-hitsauksessa lisäaine syötetään toisella kädellä valokaareen, kuten esimerkiksi kaasuhitsauksessa. Lisäaine on tavallisesti 1000 mm pitkä ja suora lisäainelanka, jonka kemiallinen koostumus vastaa yleensä hitsattavaa perusainetta. TIG-hitsaus voidaan suorittaa myös mekanisoidusti, tällöin lisäaine syötetään koneellisen langansyöttölaitteen avulla (ESAB, [Viitattu 4.5.2022]; Lepola & Makkonen 2001, 12.)

TIG-hitsaus soveltuu lähes kaikkien metallien hitsaamiseen ja prosessia käytetään pääasiassa ohuilla ainepaksuuksilla. Tavallisimmat ainepaksuudet TIG-hitsausprosessille ovat 0,5–6 mm. Yleisimmät käyttöalat TIG-hitsaukselle ovat vaativat putkistot, ruostumattomat putket, putkipalkit, ohuet materiaalit, alumiinit ja erikoismetallit. Eniten TIG-

hitsausta käytetään ruostumattomien ja haponkestävien terästen sekä alumiinien hitsaamiseen (ESAB, [Viitattu 4.5.2022]; Lepola & Makkonen 2001, 198.)

TIG-hitsauksen edut

- soveltuu lähes kaikkien metallien hitsaamiseen
- hitsausarvojen säätö helppoa
- hyvä sulan ja tunkeuman hallinta
- hitsaus mahdollista ilman lisäainetta
- ei kuonaa
- ei hitsausroiskeita
- kevyt hitsauspistooli ja ohuet kaapelit
- hyvänmuotoinen hitsaussauma

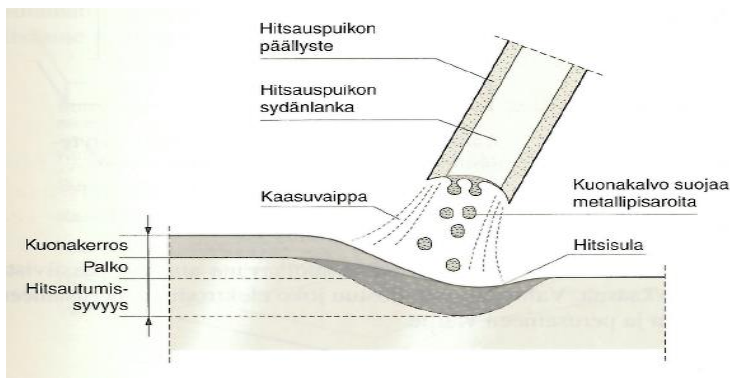
TIG-hitsauksen huonot puolet

- arka vedolle ja tuulelle
- pieni hitsausnopeus paksuilla materiaaleilla
- arka epäpuhtauksille
- hitsin juuri täytyy suojata hapettumiselta

(Lepola & Makkonen 2001, 199.)

5.2.3 Puikkohitsaus

Puikkohitsaus on sulahitsausmenetelmä, jossa valokaari muodostuu perusaineen ja hitsauspuikon pään välille. Perusaine ja lisäainepuikko sulatetaan valokaaren avulla, joka muodostaa hitsisulan hitsausrailoon. Hitsauspuikon päällysteestä vapautuvat kaasut ja kuona suojaavat hitsisulaa ympäröivän ilman vaikutuksilta. Jähmettynyt kuona poistetaan hitsipalon päältä jälkepäin. Puikkohitsaus on aina käsin hitsausta ja sen mekanisoiminen on käytännössä mahdotonta määrämittaisen lisäainepuikon takia. Puikkohitsauksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 25 (ESAB, [Viitattu 3.5.2022]; Lepola & Makkonen 2001, 91,94.)



Kuva 25. Puikkohitsauksen toimintaperiaate (Lepola & Makkonen 2001, 15).

Hitsauspuikon ytimessä on metallilanka, joka on yleisesti samaa metalliseosta kuin hitsattava perusaine. Puikon ydinlangan ympärille on puristettu päällystemassa, jonka seosaineiden koostumus ja päällysteen paksuus antavat puikolle sen hitsausominaisuudet. Yleisimmät päällystetyypit hitsauspuikoilla ovat hapan-, emäs- ja rutiilipäällysteet. Seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen hitsaukseen käytetään yleisesti emäspäällysteisiä puikkoja ja ruostumattomien terästen hitsaamiseen rutiilipäällysteisiä puikkoja. Hapanpäällysteisten puikkojen käyttö on vähäistä (ESAB, [Viitattu 3.5.2022]; Lepola & Makkonen 2001, 97-99.)

Hitsauspuikon päällysteen tehtävät

- tuottaa kuona ja kaasut, jotka suojaavat hitsisulaa ja valokaarta ympäröivältä ilmalta

- parantaa tunkeumaa
- muotoilla ja tukea hitsisulaa kuonan avulla
- helpottaa valokaaren syttymistä ja palamista
- korottaa valokaaren lämpötilaa
- vakauttaa valokaarta ja helpottaa valokaaren suuntaamista
- tuottaa hitsiin seosaineita ja parantaa hitsin lujuutta
- lisätä puikon riittoisuutta
- lisätä sulamisnopeutta
- asentohitsausominaisuudet

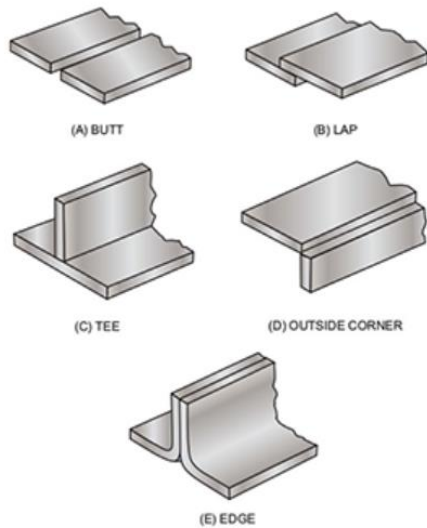
(ESAB, [Viitattu 3.5.2022]; Lepola & Makkonen 2001, 97.)

Puikkohitsausta käytetään edelleen paljon kaikkialla, vaikka MIG/MAG-hitsaus on ajanutkin sen edelle lisäainekulutuksessa. Puikkohitsausta voidaan käyttää lähes kaikenlaisissa olosuhteissa, joten se on edelleen suosittu hitsausmenetelmä teollisuudessa. Laitteiden hyvän ulottuvuuden takia puikkohitsaus on suosittu hitsausmenetelmä erityisesti asennustyömailla, joissa työskennellään monesti ulkoilmaolosuhteissa. Puikkohitsausta voidaan käyttää myös vedenalaisissa hitsauksissa käyttäen niihin olosuhteisiin suunniteltua lisäainelankaa (ESAB, [Viitattu 3.5.2022]; Kemppi puikkohitsaus. [viitattu 2.5.2022].)

5.3 Hitsausrailotyypit ja valmistus

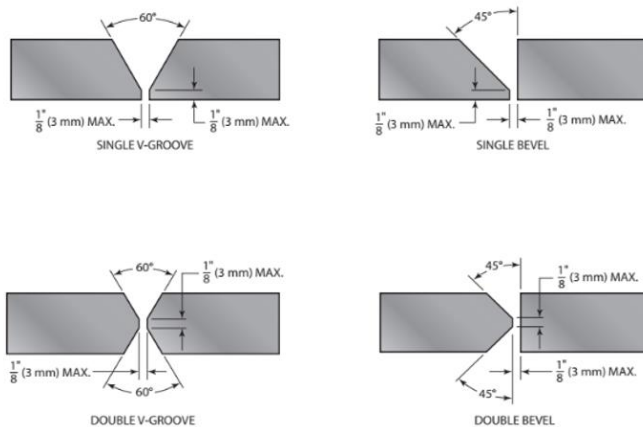
Termillä "hitsausliitosten suunnittelu" viitataan tapaan, jolla materiaalit liitetään toisiinsa kiinni tai tapaan, miten osat on aseteltu toisiinsa nähden hitsausliitosta varten. Oikealla railovalinnalla on suora yhteys hitsin hintaan ja laatuun. AWS:n (American Welding Society) mukaan teollisuudessa käytetään yleisesti viittä eri liitostyyppiä, joita ovat päittäisliitos (butt),

T-liitos (tee), liittäisliitos (lap), nurkkaliitos (outside corner) ja reunaliitos (edge). Yleisimmät liitostyypit on esitetty kuvassa 26 (Universal Technical Institute 2020.)

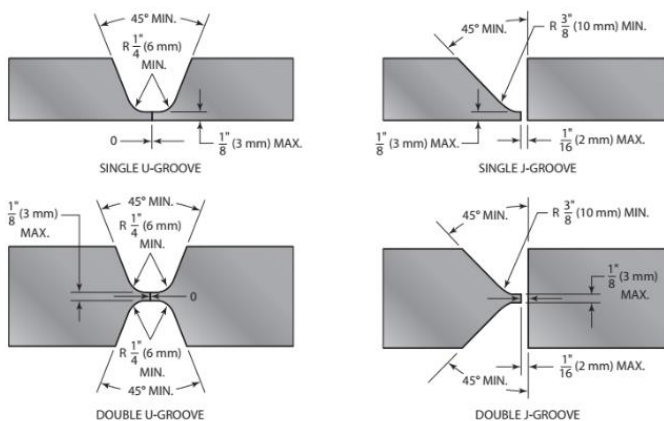


Kuva 26. Hitsauksen yleisimmät liitostyypit (Universal Technical Institute 2020).

Päittäisliitos on yleisin liitostyyppi rakenteiden ja putkistojen valmistuksessa. Läpihitsaus on mahdollista toteuttaa ohuilla materiaaleilla pelkällä I-railolla, jossa materiaalien hitsauspinnat ovat suoria ja ne asetetaan toisiaan vasten. Paksummissa osissa hitsattava pinta pitää muotoilla ennen hitsauksen aloittamista, poistamalla materiaalia läpihitsauksen takaamiseksi. Yleisimpiä railotyyppejä päittäisliitokselle ovat I-, V-, K-, X-, J- ja U-railotyyppit ja näiden eri variaatiot tai molemmin puolin levyä. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty erilaisia railotyyppejä päittäisliitoksille. Astekulmien ja juuripintojen mitat sen sijaan voivat vaihdella hitsausohjeesta riippuen (Universal Technical Institute 2020; Amarine, [Viitattu 2.5.2022].)



Kuva 27. V-, puoli V-, X- ja K-railotyypit 3 mm juuripinnalla (Amarine, [Viitattu 2.5.2022]).



Kuva 28. Eri variaatiota U- ja J-railotyypeistä 3 mm juuripinnalla (Amarine, [Viitattu 2.5.2022]).

Oikea railovalinta tuo säästöä lisäaineiden käytössä, mutta railon valmistukseen käytettävät laitteet saattavat olla niin kalliita pienten erien valmistukseen, että railovalinnasta saatu etu menetetään. Tällöin kannattaakin kääntyä raaka-aineiden toimittajien tai raaka-aineiden leikkauspalveluja tuottavien yritysten puoleen. Näillä yrityksillä on railonvalmistukseen investoidut laitteet, ja kustannukset on saatu valmistusmäärien myötä kohtuullisemmiksi. Railon valmistuksessa käytettäviä menetelmiä ovat muun muassa:

- polttoleikkaus
- plasmaleikkaus

- laserleikkaus
- vesisuihkuleikkaus
- suuntaisleikkuri
- nakertajat
- jysintä ja sorvaus
- hionta
- talttaus

(Lepola & Makkonen 2001, 486.)

6 Testien tulokset

Testien tarkoituksena oli tutkia robotin soveltuvuutta hitsausviisteiden tekemiseen ja särmäysapupalojen poistamiseen. Keskeisimpänä tavoitteena oli nopeuttaa ja nykyaikaistaa viiste- ja apupalanpoistoprosessia, sekä löytää monipuolisia ratkaisuja erilaisten hitsausviisteiden tekemiseen.

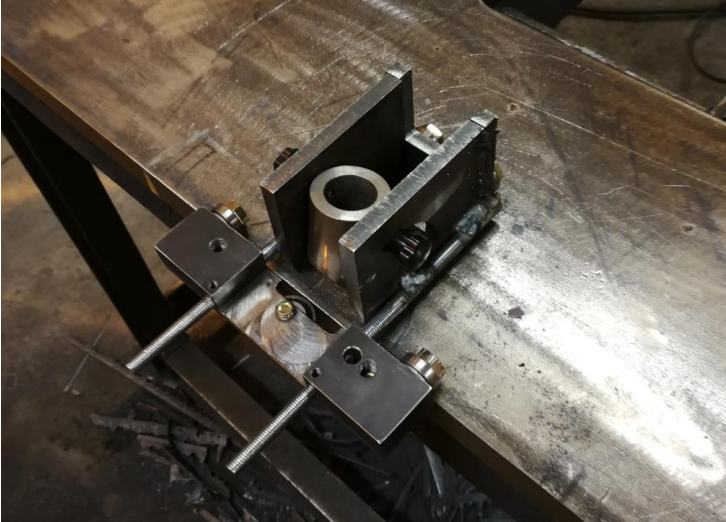
Testeihin pyrittiin valitsemaan mahdollisimman monipuolisia tuotannon osia, joiden avulla pystyttiin päättämään, millaisia hitsausviisteitä oli mahdollista valmistaa robotin avulla, sekä arviomaan prosessin nopeutta verrattuna nykytilanteeseen. Särmäysapupalojen poiston osalta testit jätettiin hieman suppeammiksi, koska plasmapoltin on suorassa apupalaa poistettaessa, joten niiden osalta voitiin todeta nopeasti, että yhteistyörobotti soveltuu työhön monipuolisesti.

Robotiksi testeihin valikoitui Universal Robots UR10e yhteistyörobotti. Robotin valintaan vaikuttivat pääasiassa turvallinen työskentely ihmisen läheisyydessä, kevyt rakenne, helppo liikuteltavuus ja helppokäyttöinen ohjaus ja ohjelmointi. Aluksi harkinnassa oli myös normaali teollisuusrobotti, mutta yhteistyörobotti todettiin parhaaksi vaihtoehdoksi edellä mainittujen ominaisuuksien takia.

6.1 Kelkan suunnittelu ja versiot

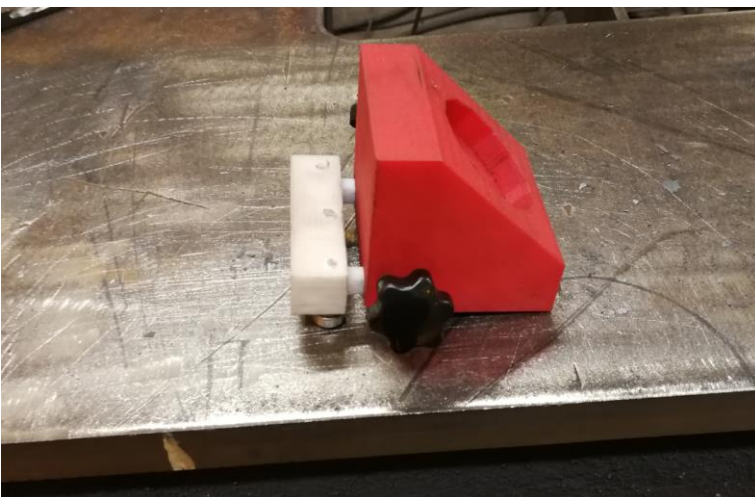
Kelkan mallit suunniteltiin Solid Works 3D-suunnitteluohjelmiston avulla. Kelkan tarkoitus oli antaa viisteille oikea astekulma sekä koko. Kelkan avulla plasmapoltin saadaan pidettyä määritetyssä astekulmassa ja oikean etäisyyden päässä levyn reunasta. Johdattamalla ohjelmoinnissa kelkkaa vedetään levyn reunaa pitkin, josta liikerata tallennetaan robotin muistiin. Suoralle pinnalle tehtävän viisteen tekeminen olisi todennäköisesti onnistunut ilman apuvälinettä, joko ohjelmallisesti tai astekulmalla mittaamalla. Muotoviisteen ohjelman tekeminen sen sijaan on käytännössä mahdotonta ilman kelkkaa, koska muotoa leikattaessa useiden akselien tulee liikkua samanaikaisesti. Kelkasta tehtiin projektin aikana kolme versiota, joista yksi valmistettiin teräksestä ja kaksi muuta muovista 3D-tulostamalla.

Ensimmäisen mallin raaka-aineena oli teräs. Osat valmistettiin laserleikkaamalla ja koneistamalla. Osat liitettiin toisiinsa kiinni hitsaus- ja ruuviliitoksilla. Kelkan ensimmäisessä versiossa oli säädettävä astekulma ja viisteen syvyysäättö. Kuvassa 30 on kelkan versio 1.



Kuva 29. Kelkan versio 1

Kelkan toinen versio valmistettiin 3D-tulostamalla muovista. Tästä kelkan versiosta poistettiin säädettävä astekulma, koska se todettiin ongelmalliseksi. Toisessa versiossa astekulma oli vakio ja viisteen syvyys oli säädettävä. Astekulma tehtiin 45 asteiseksi, mutta plasman säde muokkasi viisteestä noin 48–49 asteisen. Kuvassa 31 on kelkan versio 2.



Kuva 30. Kelkan versio 2.

Kelkan kolmas versio oli täysin sama kuin versio kaksi, mutta astekulmaa korjattiin kaksi astetta, jolloin päästiin lähemmäs haluttua 45 asteen kulmaa. Kolmanteen versioon lisättiin myös lukitusrengas, jonka tarkoitus oli estää plasmapolttimen nouseminen kelkan pidikkeestä. Muovista valmistettu lukitusrengas ei kumminkaan joutanut tarpeeksi, joten se murtui kiristysvaiheessa. Todettiin, että lukitusrengas tulisi valmistaa joustavammasta materiaalista, mutta uutta lukitusrengasta ei valmistettu kiireen takia.

6.2 Ohjelman tekeminen robotille

Ohjelma robotille tehtiin robotin omalla käyttöliittymällä. Robotin ohjelmointi on mahdollista tehdä myös CAM-ohjelmiston avulla, mutta tämän työn tarkoitus oli tehdä ohjelmoinnista mahdollisimman yksinkertainen, ettei ohjelmointiin tarvitse käyttää liikaa resursseja. Esimerkkiohjelma nähtävissä liitteessä 1. Esimerkkiohjelmassa käytetään pääasiassa johdattamalla ohjelmointia. Robotille näytetään siis liikerata Path-komennon avulla. Valmistettavassa osassa viiste on kahdella sivulla.

6.3 Testiajot särmäysapupalan poistoon

Särmäysapupalalla tarkoitetaan materiaalia, joka jätetään osaan kiinni särmäyksen ajaksi. Apupalaa käytetään sellaisissa osissa, joissa on esimerkiksi aukko särmäyslinjan lähellä. Tapauksissa joissa aukon reuna ei ylety särmäyspuristimen alaterän reunan yli tarvitsee apupalan särmäyksen ajaksi, koska aukon kohta osasta ei lähde taittumaan muun osan mukana tasaisesti. Näissä tapauksissa aukko voidaan jättää umpeen särmäyksen ajaksi laadun takaamiseksi. Särmäys apupala poistetaan osasta särmäyksen jälkeen.

Ensimmäisissä testeissä keskityttiin särmäysapupalojen poistamiseen, koska apuvälinettä viisteiden valmistukseen ei vielä ollut. Näissä testeissä ei juurikaan ilmennyt haasteita, koska poltin on kohtisuorassa työkappaleeseen nähden. Muutamilla kerroilla plasmapolttimen astekulma muuttui hieman pisteiden opetuksen välillä, ja se teki leikkauspinnasta vinon. Tämä ongelma saatiin ratkaistua asettamalla plasmapolttin suoraan suorakulman avulla ja tämän jälkeen lukitsemalla tarpeettomien akselien liike robotin käyttöliittymästä. Tässä testissä käytettiin opettamalla ohjelmointia, jossa robotille näytetään

liikkeisiin tarvittavat pisteet. Särmäysapupalojen osalta testit jäivät melko lyhyiksi, koska pystyttiin nopeasti toteamaan cobotin soveltuvuus tähän prosessiin.

6.4 Testiajot kelkan ensimmäisellä versiolla

Näissä testiajoissa liikeradan opettamiseen käytettiin apuna kelkan versiota yksi. Testeissä viisteitä tehtiin suoralle pinnalle, sekä kaarevalle pinnalle. Ensimmäisten testien tarkoitus oli lähinnä harjoitella liikeradan tekemistä ja tutkia kelkan toimivuutta liikeradan tekemiseen. Ohjelmaan lisättiin Find Surface -käsky, jonka tarkoitus on tunnistaa kappaleen pinta paineanturin avulla. Find Surface -käskyllä robotti liikkuu lineaarisesti alaspäin, kunnes poltinpäähän kohdistuu 10N voima. Pinnan löytyessä robotille määritettiin kahden millimetrin nosto ylöspäin kappaleen pinnasta. Find Surface -käskyn avulla plasmapoltin saatiin pysymään samalla korkeudella koko leikkausprosessin ajan.

Testien perusteella pystyttiin toteamaan, että kelkkaa oli hankala liikuttaa kappaleen pinnalla raskaan rakenteen takia. Leikkausjälkeen tuli koloja, koska kelkka takerteli liikerataa opetettaessa. Kelkka oli myös liian iso monissa tilanteissa, kuten kappaleiden sisä- ja ulkonurkat. Viisteen astekulman säätäminen osoittautui todella hankalaksi, koska poltinpää nousi eri korkeudelle astekulmaa vaihdettaessa. Kelkan ensimmäisessä versiossa poltinpää oli kahden millin päässä kappaleen pinnasta, kun poltinpää oli suorassa. Astekulman säätö 45 asteeseen nosti poltinpään 5 millimetriä pinnan yläpuolelle. Pinnantunnistuskomennon avulla poltinpää seuraa kappaleen pintaa 2 millimetriä kappaleen yläpuolella, mutta liikerataa opetettaessa poltinpää oli eri korkeudella, joten astekulma muuttui lopulliseen liikerataan. Testien perusteella todettiin, että kelkka ei sovellu käyttötarkoitukseen, mutta niiden perusteella saatiin tarvittavaa tietoa uuden kelkan suunnittelua varten.

6.5 Testiajot suorille viisteille

Näissä testiajoissa liikeradan opettamiseen käytettiin kelkan versiota 2. Testiajojen pääteemana oli tasaisen liikeradan ja oikean astekulman saavuttaminen. Testejä tehtiin ainoastaan suorille pinnoille ja kelkassa oli kiinteä astekulma 45 astetta.

Testeissä liikerata saatiin pysymään tasaisena jossain kappaleissa. Ongelmaksi kuitenkin osoittautui kappaleiden leikkauspinnan jäysteet ja sinkopuhalletun pinnan epätasaisuus. Tämän ongelman poistamiseksi pöytään valmistettiin uusi kansi, jossa leikkaus- ja levynpinta hiottiin lamellilaikalla sileäksi. Tällä päästiin eroon kelkan takertelusta liikeradan opetuksessa, jolloin viisteestä tuli tasainen koko matkalle. Testeissä liikerata tehtiin koko pöydän matkalle ja viistettävät kappaleet laitettiin tasalle pöydänreunan kanssa. Kappaleen paksuudella ei ollut väliä, koska korkeuden säädölle käytettiin aiemmin mainittua pinnantunnistuskomentoa.

Testeissä pyrittiin saavuttamaan viisteen astekulmaksi 45 astetta, joka on yleisin astekulma yrityksessä valmistettaville hitsausviisteille. Ongelmaksi osoittautui plasmasuihku, joka käänsi astekulmaa n. 4 astetta loivemmaksi. Oikeaa astekulmaa ei pystytty tässä testisarjassa saavuttamaan, mutta testien toistossa astekulman heitto oli aina saman verran, joten ongelman korjaamiseksi päätettiin valmistaa uusi kelkka korjatulla astekulmalla.

6.6 Nopeustestit ja vertailu

Näissä testiajoissa liikeradan opettamiseen käytettiin kelkan versiota 3. Testien pääteemana oli nopeustestit ja nopeuden vertaaminen nyky menetelmään. Testeihin valittiin kolme tuotannon osaa. Valintaperusteisiin vaikuttivat materiaalihukka ja kappaleen monimuotoisuus. Nopeustesteihin valittiin 8x8, 10x10 ja 15x15 viistekoot. Kahta ensimmäistä testiä ei tehty nyky menetelmällä, mutta ohuisiin materiaaleihin laitettiin vertailussa maksiminopeus 7 mm/s. Taulukossa 1 on esitetty nopeustestien tulokset kaikille paksuuksille.

Taulukko 1. Nopeustestien tulokset.

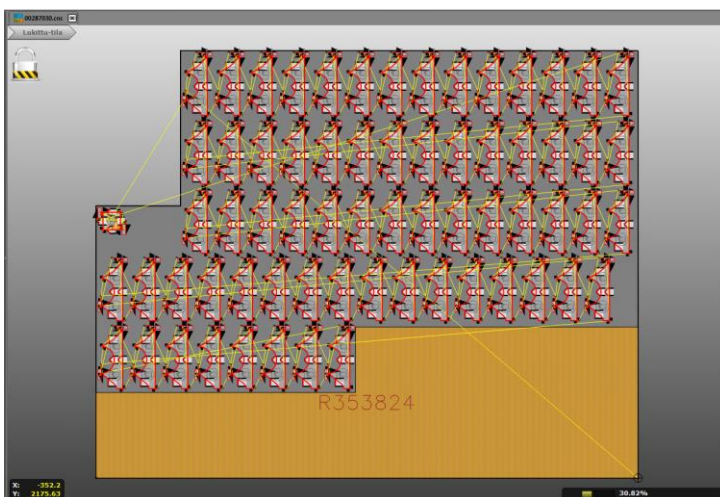
Viiste suoralle pinnalle	Robotti	Nyky menetelmä
Viistekoko	Leikkausnopeus	Leikkausnopeus
8x8	35mm/s	7mm/s
10x10	20mm/s	7mm/s
15x15	8mm/s	7mm/s

Kolmas nopeustesti tehtiin 15x15 viistekoolle. Testissä käytettiin tuotannon kappaletta, jotta aikaa pystyttiin vertaamaan nykyisellä menetelmällä valmistamiseen. Valmistaminen aloitettiin samaan aikaan molemmilla menetelmillä. Nykyinen menetelmä oli hieman aikaisemmin valmiina, mutta merkittävää eroa ei ollut. Cobotilla 15x15 viistekoolle nopeudeksi saatiin 8 mm/s. Nopeus hidastui merkittävästi, koska viisteen leikkausmatka oli kyseisen plasmavirtalähteen äärirajoilla. Nykyisellä menetelmällä leikattiin maksimiteholla 7 mm/s. Kaasuleikkaukselle 15x15 viistekoko oli taas leikkausalueen alarajoilla, joten tässä tapauksessa vanha menetelmä oli parempi.

Nopeustesteissä ei päästy haluttuun lopputulokseen 15x15 viisteen osalta. Testien perusteella pystyttiin kuitenkin toteamaan, että isommalla plasmavirtalähteellä nopeuteen saadaan huomattava parannus 10–30 mm levyvahvuuksille.

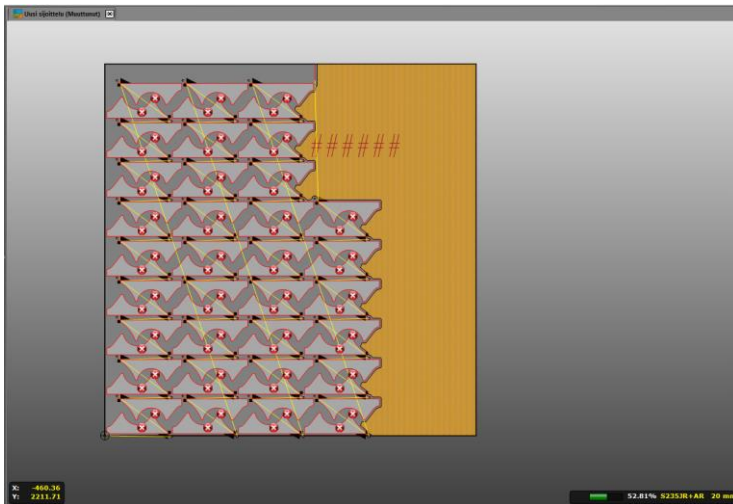
6.7 Tuotannon osan T3-236099-AH viisteiden valmistaminen

Tuotannon osa T3-236099-AH valikoitui testeihin suuren materiaalihukan takia. Toinen vaikuttava asia oli kaarevan viisteen valmistaminen, koska useassa tuotannon osassa on vastaavanlaisia muotoja. Kuvassa 32 on esimerkki osan nestistä, jossa materiaalihukka on 69,18 %.



Kuva 31. Tuotannon osan T3-236099-AH nesti viistettynä plasmaleikkauskoneella.

Kuvassa 33 on samasta osasta tehty nesti ilman viisteitä. Sijoittelun romuprosentti ilman viisteitä on 47,19 %. Kappaleet saadaan leikattua pienemmillä törmäytyksillä, sekä laittamaan limittäin ilman leikkauksen yhteydessä tehtävää hitsausviistettä. Viisteiden tekeminen jälkikäteen säästää materiaalia 22 %.



Kuva 32. Tuotannon osan T3-236099-AH nesti ilman viisteitä.

Osan T3-236099-AH kaariviisteen liikeradan opettaminen robotille oli huomattavasti vaikeampaa kuin suoran. Robotin akselien samanaikainen liike aiheutti takertelua, ja se teki koloja leikkauksen jälkeen. Roboteissa on myös ominaisuus, joka saa robotin akselit jumittumaan, jos akselien suunta oli lineaarisesti samassa linjassa. Tärkeäksi elementiksi osoittautui oikean aloitusasennon löytäminen liikeradan tekemiseen. Tällä saatiin vältettyä akselien samansuuntaisuus kesken liikeradan.

Toinen asia, joka hankaloitti liikeradan tekemistä, oli kappaleen pinnan epätasaisuus ja ruoste. Tämä aiheutti kitkaa kelkan liikkeeseen kappaleen pinnalla. Ongelman poistamiseksi kappaleen pinta hiottiin lamellilaikalla sileäksi. Kaarevan liikeradan tekeminen robotilla onnistui, vaikka se vei huomattavasti enemmän aikaa. Viisteen mitat olivat toleranssien sisällä ja viiste oli tasainen koko matkalla.

Täysin kuvan mukaiseen lopputulokseen ei päästy tässä testissä. Viisteen aloituskohta ei alkanut kaaren alusta, koska kärki oli liian ohut kelkan liikuttamiseen. Tämän ongelman olisi saanut ratkaistua nauhoittamiseen käytettävän apuaihion avulla, tai erilaisen kelkan avulla.

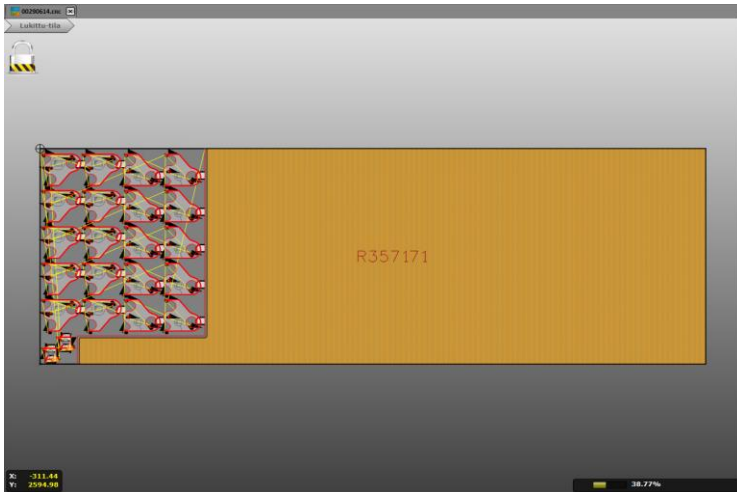
Tähän ei kuitenkaan alettu käyttämään aikaa, koska testin tarkoitus oli pääasiassa kokeilla kaarevan viisteen valmistusta. Lisäksi osan takareunassa olevia suoria viisteitä ei tehty tämän testin yhteydessä, koska suorien viisteiden tekemisen onnistuminen todennettiin jo edellisissä testeissä. Kuvassa 34 on robotilla valmistettu viiste mallikappaleeseen.



Kuva 33. Tuotannon osa T3-236099-AH viistettynä robotilla.

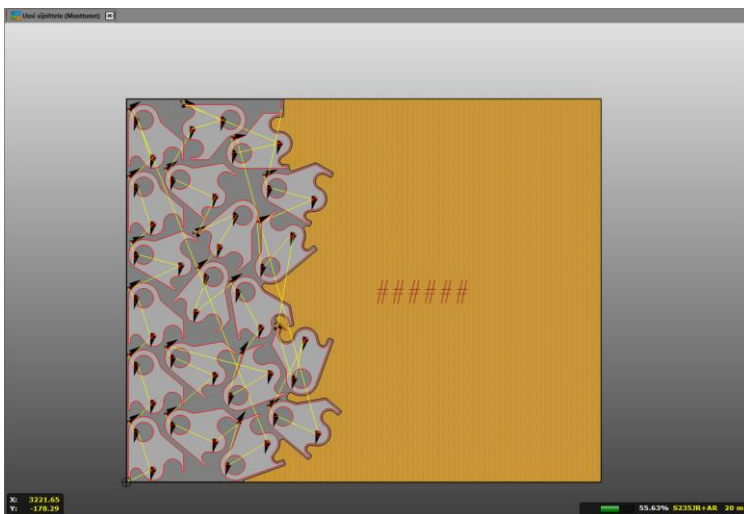
6.8 Tuotannon osan F683266 viisteiden valmistaminen

Tuotannon osa T3-236099-AH valikoitui testeihin suuren materiaalihukan takia. Toinen vaikuttava asia oli muotoviisteen valmistaminen ulkoreunalle, koska useassa tuotannon osassa on vastaavanlaisia muotoja. Kuvassa 35 on esimerkki osan nestistä, jossa materiaalihukka on 61,23 %.



Kuva 34. Tuotannon osan F683266 nesti viistettynä plasmaleikkauskoneella.

Kuvassa 36 on samasta osasta tehty nesti ilman viisteitä. Sijoittelun romuprosentti ilman viisteitä on 44,37 %. Kappaleet saadaan leikattua pienemmillä törmäyksillä, sekä laittamaan epämääräisempään järjestykseen. Viisteiden tekeminen jälkikäteen säästää materiaalia tässä tapauksessa 16,86 %.



Kuva 35. Tuotannon osan F683266 nesti ilman viisteitä.

Osan F683266 viisteiden valmistuksessa robotilla osattiin ottaa huomioon, että kappaleen pinnan hiominen helpottaa huomattavasti kelkan liikuttamista pintaa vasten. Edellisestä testiajasta oppineena kappaleen pinnan hionta suoritettiin ennen testien aloittamista. Ongelmia radan opettamisessa tuotti kappaleen muodossa oleva terävä ulkonurkka.

Ongelma ratkaistiin siten, että leikkausrata tehtiin kahdessa osassa. Ensimmäisenä viiste tehtiin lyhyeen suoraan osaan, jonka jälkeen poltin siirrettiin kappaleen toiselle puolelle ja kierrettiin ympäri. Vaikein osuus radan tekemisessä oli osan kärjessä oleva R80 kaari. Kaaren tekeminen vaati muutaman yrityksen nykyisellä kelkkamallilla, jonka jälkeen se onnistui toleranssien vaatimiin rajoihin.

Kokonaisuudessaan kappaleen viistettä ei saatu tehtyä, koska kappale piti kiinnittää pöytään puristimilla. Kappaleen valmistaminen vaatii pöydän ulkopuolelle ylettyvät oksat, johon kappale saadaan kiinnitettyä pultilla tai puristimella kappaleen keskellä olevasta reiästä. Opinnäytetyöhön liittyvissä testeissä tätä ei kumminkaan nähty tarpeelliseksi, koska kiinnityksen suunnittelu olisi vienyt ainoastaan turhaan aikaa ja materiaalia. Kuvassa 37 on robotilla valmistettu viiste osaan F683266.



Kuva 36. Tuotannon osan F683266 viistettynä robotilla.

7 Pohdinta

Opinnäytetyössä perehdyttiin yhteistyörobotiikan ihmeelliseen maailmaan, joka yllätti positiivisesti monipuolisuudellaan. Yhteistyöroboteille löytyi käyttökohteita lähes jokaiselta kaupalliselta alalta, ja käyttökohteissa oli lähinnä mielikuvitus rajana. Yhteistyörobottien helppo ohjelmoitavuus ja halpa hinta on lisännyt niiden kiinnostavuutta sekä auttanut niiden leviämistä isojen autotehtaiden maalauslinjastoista aina kaupunkien pienpuutarhojen hedelmien poimintaan.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kerätä tarvittavaa tietoa hitsausviisteiden valmistamisesta sekä särmäysapupalojen poistamisesta teollisuusrobotin avulla. Työn sujuvuutta hankaloitti se, että yhteistyörobotti ei ollut yrityksen oma, joten cobotin sijoittaminen työalueella ja työalue itsessään eivät olleet parhaita mahdollisia. Cobotti sijoitettiin pystyasentoon vanhan lattapöydän päälle, joka oli vinossa vähän joka suuntaan. Tämä hankaloitti radan opettamista monellakin tapaa työn edetessä. Nämä olivat kuitenkin tietoisia ratkaisuja, koska työpisteen suunnittelu ja cobotin ideaalin ripustamistavan simulointi päätettiin tehdä investointipäätöksen jälkeen.

Testien tuloksena saatiin kerättyä tarvittavaa dataa, joiden perusteella pystyttiin arvioimaan mahdollisia käyttökohteita cobotille. Suorien viisteiden tekemiseen robotti soveltui erinomaisesti ja oikeanlaisella käyttöliittymällä rataa ei tarvitse muuttaa materiaalivahvuuden tai kappaleen pituuden muuttuessa. Muotoviisteiden tekeminen oli huomattavasti haastavampaa, mutta niidenkin tekeminen onnistui, kun siihen käytti tarpeeksi aikaa. Näiden tekemisestä todettiin, että yksittäisten kappaleiden valmistamiseen tämä menetelmä ei luultavasti sovellu, koska radan tekeminen vie paljon aikaa ja epäonnistumisen riski on suuri ensimmäisellä yrittämällä. Toistuvissa sarjoissa ja oikeanlaisilla kiinnikkeillä tämäkin on varmasti toimiva ratkaisu, koska kerran tehty rata pysyy koneen muistissa.

Särmäysapupalojen poiston osalta testit jäivät melko suppeaksi. Näistä pystyttiin helposti toteamaan, että niiden poistaminen onnistuu robotilla todella helposti. Plasmapolttin saa olla kohtisuorassa levyyn nähden tässä prosessissa, joten useampia niveliä ei tarvitse liikuttaa samanaikaisesti. Cobotin käyttöliittymästä pystyy lukitsemaan eri nivelten liikkeitä, joka

osoittautui hyväksi ominaisuudeksi pisteiden opettamisessa. Plasmapolttimen sai laitettua kohtisuoraan levyyn nähden esimerkiksi suorakulman avulla, jonka jälkeen tarvittavat nivelet lukittiin. Tämän jälkeen liikeradan pisteiden opettaminen sujui helposti, koska poltin pysyi samassa asennossa.

Muutamia rajoituksiakin tuli vastaan testejä tehdessä. Viisteen tekeminen ympyrän muotoiselle kaarelle osoittautui mahdottomaksi ainakin yhdessä osassa tehtynä. Toki testi tehtiin ainoastaan kohtuullisen pienelle ympyrälle, joka oli halkaisijaltaan 300 mm. Robotin nivelet jumittuivat aina jossain vaiheessa radan opetuksessa, joten tähän ei päätetty käyttää enempää aikaa. Ympyrän kaaren viistäminen voidaan toteuttaa helpommin erillisen apuvälineen, kuten pyörityspöydän avulla. Toinen hankalaksi todettu asia oli erittäin pienet kappaleet, joissa on pieniä 0–15 mm säteitä sisä- tai ulkonurkissa. Näidenkin valmistamiseen voisi löytyä ratkaisu CAM-ohjelmoinnin kautta. Opettamalla ohjelmoinnilla ja koordinaatiston kautta tehtävillä siirroilla cobotti ei tehnyt kaikkia siirtoja oikein, jolloin kappaleesta ei tullut kuvanmukainen. Kolmas rajoittava tekijä oli terävät sisänurkat. Näiden tekemistä ei lähdetty edes yrittämään koska kelkan rakenne ei soveltunut siihen, että rata olisi lopetettu terävään sisänurkkaan. Lisäksi plasmaleikkauksen rajoituksen leikkauspituuden osalta ja cobotin ulottuvuus tuovat omat rajoituksensa, joiden takia nykyiset menetelmiä ei pystytä kokonaisuudessaan korvaamaan.

Työ onnistui kokonaisuudessaan hyvin ja testien perusteella pystyi suosittamaan yhteistyörobotin hankkimista yritykselle. Vaikka cobotilla on myös omat rajoituksensa, niin hyvät puolet kuten leikkausnopeus ja ohjelmoinnin helppous nopeuttavat viisteiden tekemistä lukuisissa kappaleissa. Ensimmäisen cobotin hankintapäätös tehtiinkin todella nopeasti ja sen jälkeen on hankittu kaksi cobottia lisää eri toimipisteisiin.

LÄHTEET

- Abraham, J. 2022. Fiber Laser vs. CO2 Laser – Expert Guide [2022]. [Verkkajulkaisu]. Mellowpine. [Viitattu 27.4.2022]. Saatavana: <https://mellowpine.com/cnc/fiber-laser-vs-co2-laser/>
- Amarine. Ei päiväystä. Groove Design & Bevel Preparation. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavana: <https://amarineblog.com/2019/09/05/groove-design-bevel-preparation/>
- Ansari, S. Ei päiväystä. Fibre vs. CO₂ lasers: Which one you should buy and why? [Verkkajulkaisu]. Nottingham: Esprit Automation Ltd. [Viitattu 27.4.2022]. Saatavana: <https://espritautomation.com/co2-vs-fiber-laser-technology/>
- Artega, F. 2021. CO2 vs. Fiber Laser Technology: Which is right for you? [Verkkajulkaisu]. Illinois: Bystronic Inc. [Viitattu 27.4.2022]. Saatavana: https://www.bystronicusa.com/en/news/technical-articles/130204_CO2-vs-Fiber-Laser.php
- BE Group. Ei päiväystä. Asiakaskunta. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.10.2021]. Saatavana: <https://www.begroup.fi/be-group/tietoa-be-groupista/asiakkaamme>
- BE Group. Ei päiväystä. Historia. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.10.2021]. Saatavana: <https://www.begroup.fi/be-group/tietoa-be-groupista/historia>
- BE Group. Ei päiväystä. Organisaatio. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.10.2021]. Saatavana: <https://www.begroup.fi/be-group/tietoa-be-groupista/organisaatio>
- BE Group. Ei päiväystä. Palvelut. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.10.2021]. Saatavana: <https://www.begroup.fi/palvelut>
- BE Group. Ei päiväystä. Terminen leikkaus. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.10.2021]. Saatavana: <https://www.begroup.fi/palvelut/terminen-leikkaus>
- BE Group. Ei päiväystä. Tuotteet. [Verkkosivu]. [Viitattu 26.10.2021]. Saatavana: <https://www.begroup.fi/tuotteet>
- Buchert, J. 2021. Which Industries can Leverage the Power of Collaborative Robots. [Verkkajulkaisu]. Man plus Machines. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavana: <https://manplasmachines.com/which-industries-use-collaborative-robots/>
- Eagle Group. Ei päiväystä. Laser cutting machines. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.4.2022]. Saatavana: <https://eagle-group.eu/en/laser-cutting-machines>

- ESAB. Ei päiväystä. Hitsausmenetelmät. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.4.2022]. Saatavana: <https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/hitsausmenetelmat.cfm>
- ESAB. Ei päiväystä. Puikkohitsaus. [Verkkosivu]. [Viitattu 3.5.2022]. Saatavana: <https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/puikkohitsaus.cfm>
- ESAB. Ei päiväystä. TIG-hitsaus. [Verkkosivu]. [Viitattu 4.5.2022]. Saatavana: <https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/tig-hitsaus.cfm>
- Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 2003. Valmistustekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Ionix. Ei päiväystä. MIG/MAG-hitsaus. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavana: <https://www.ionix.fi/teknologiat/kaarihitsaus/migmag-hitsaus/>
- Kemppi. Ei päiväystä. Puikkohitsaus. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.5.2022]. Saatavana: <https://www.kemppi.com/fi-FI/tuki/hitsausaapinen/puikkohitsaus/>
- Kuivanen, R. 1999, Robotiikka. Vantaa: Suomen Robotiikkayhdistys Ry.
- Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. 2005. Lasertyöstö. Tampere: Tammer-Paino Oy.
- Laplace, J. Ei päiväystä. Human-robot interaction finally reaches the work floor. [Verkkojulkaisu]. Generation Robots. [Viitattu 25.4.2022]. Saatavana: <https://www.generationrobots.com/blog/wp-content/uploads/2014/01/Lightweight-robots-and-Collaborative-Robotics.pdf>
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2001. Hitsaus ja teräsrakenteet. Helsinki: WS Bookwell Oy.
- Machine Tool. Ei päiväystä. Tehosta tuotantoa yhteistyöroboteilla. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Oy Machine Tool Co. [viitattu 2.5.2022]. Saatavana: https://www.machinetool.fi/hubfs/2019/Esitteet/Tehosta%20tuotantoa%20coboteilla_Machine%20Tool.pdf
- Miller, M. & Miller, R. 2017. Robots and Robotics: Principles, Systems, and Industrial Applications. McGraw-Hill Education.
- Robotiikka 2016. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu 20.4.2022]. Saatavana: <https://docplayer.fi/67729437-Robotiikka-2016-1-johdanto-ja-historiaa.html>
- Shepherd, S. 2019. Welcome to the age of cobots. [Verkkojulkaisu]. Odense: Universal Robots. [Viitattu 25.4.2022]. Saatavana: https://www.universal-robots.com/blog/welcome-to-the-age-of-the-cobots/?utm_campaign=Blogpost&utm_medium=email&hsenc=p2ANqtz-9X6Jwawj8WyZloPFdE-VNNaPz4czBrrSMKxCIIToFM65j1izkQpUubJ31-

[TkV7tQOwcoWweanONFmAcvUab5jTI4FtiiNO2dcfh5gGHqkOcT6svQ&_hsmi=69639991&utm_content=69639991&utm_source=hs_email&hsCtaTracking=8c01fa74-9680-4616-a131-0d17fc8a335f%7C5046270b-d204-44d9-9172-76d2f6ab6084](https://www.industry.siemens.com/cs/document/109770271/motor-sizing-with-nx-mcd?dti=0&lc=en-WW)

Siemens. Ei päivystä. Industry Online Support International. [Verkkosivu]. [Viitattu 10.4.2022]. Saatavana:

<https://support.industry.siemens.com/cs/document/109770271/motor-sizing-with-nx-mcd?dti=0&lc=en-WW>

SSAB. Ei päivystä. Flame cutting. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.10.2021]. Saatavana:

<https://www.ssab.fi/services/processing-services/flame-cutting>

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. 2006. Helsinki: Oriveden Kirjapaino.

Universal Robots. Ei päivystä. Sovellukset. [Verkkosivu]. [Viitattu 11.4.2022]. Saatavana:

<https://www.universal-robots.com/fi/sovellukset/>

Universal Technical Institute. 2020. Welding joint types: Butt joints, lap joints, tee joints & more. [Verkkosivu]. [viitattu 2.5.2022]. Saatavana:

<https://www.uti.edu/blog/welding/joint-types>

LIITTEET

Liite 1. Robotin esimerkkiohjelman

Liite 1. Robotin esimerkkiohjelma

MoveJ (liiketapa, jolla robotti siirtyy pisteeseen nopeinta reittiä pitkin)

Aloituspiste_ylla (aloituspisteen koordinaattitiedot)

Zero FT sensor (force/torque sensorin nollaus)

Find surface (pinnan tunnistus)

If surface found (jos pinta löytyy, robotti suorittaa seuraavan toiminnon)

MoveL (lineaarinen liiketapa)

Irti_pinnasta (2 mm nosto kappaleen pinnasta)

MoveL

Set plasma ON (plasma polttimen käynnistys)

Wait 0,5 (odotus 0,5 sekuntia)

Path_1 (ensimmäisen viisteen leikkaus, rata opetettu johdattamalla)

Set plasma_OFF (plasmapolttimen sammutus)

MoveJ

Waypoint_1 (osan toisen viisteen aloituspisteen koordinaattitiedot)

Zero FT sensor

Find surface

If surface found

MoveL

Irti_pinnasta

MoveL

Set plasma ON

Wait 0,5

Path_2 (toisen viisteen leikkaus, rata opetettu johdattamalla)

Set plasma_OFF

Halt (pysäyttää työkierron)