



HITSAUSROBOTIN OHJELMOINNIN VR/AR/XR-TYÖKALUT
WELDING ROBOT'S VR/AR/XR PROGRAMMING TOOLS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Thomas Kaatranen

Tarkastajat: TkT Sakari Penttilä

DI Hannu Lund

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT Energiajärjestelmät
Konetekniikka

Thomas Kaatranen

Hitsausrobotin ohjelmoinnin VR/AR/XR-työkalut

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

47 sivua, 17 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastajat: TkT Sakari Penttilä ja DI Hannu Lund

Avainsanat: XR, VR, AR, MR, robottihitsaus, robotin ohjelmointi

Tässä kandidaatintyössä perehdytään hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointiin XR-applikaatioilla. Työ tehtiin LUT-yliopiston hitsaustekniikan laboratoriolle, jotta saataisiin kerättyä ajankohtaista tietoa XR-applikaatioiden soveltuvuudesta ja käytettävyydestä robotin ohjelmoinnissa. Työssä käsitellään robottihitsauksen perusteita ja sen tuottavuutta yleisellä tasolla. Tämän lisäksi työssä perehdytään robotin ohjelmointiin virtuaalitodellisuuden (VR), lisätyn todellisuuden (AR) ja sekatomallisuuden (MR) avulla.

Työn tavoitteena on selvittää, miksi XR-ohjelmointityökaluja kannattaa käyttää hitsausrobotin ohjelmoinnissa ja miten liikeratojen ohjelmointi kyetään suorittamaan kyseisillä työkaluilla. Lisäksi tutkitaan miten ohjelmointimenetelmän valitseminen voi vaikuttaa hitsausteollisuuden tuottavuuteen. Tutkielma sisältää sekä kirjallisuuskatsauksen että kokeellisen testauksen, jotta aineistosta saadaan mahdollisimman todenmukainen.

Kirjallisuuskatsaus käsittelee robottihitsausta yleisellä tasolla, sen tuottavuutta ja miten robotin ohjelmointi suoritetaan XR-applikaatioilla. Aineiston reliabiliteetin varmistamiseksi katsauksessa käytettiin montaa tieteellistä tutkielmaa ja verkkojulkaisua. Aineiston perusteella XR-applikaatiot soveltuvat hyvin hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointiin niiden yksinkertaisten ja intuitiivisten ohjelmointityökalujen takia.

Työn kokeellinen testaus suoritettiin hyödyntämällä virtuaalitodellisuusympäristöä ja sen tarjoamia ohjelmointityökaluja. Testauksen tarkoituksena oli selvittää miten täysin kokematon ohjelmoija voi suorittaa robotin liikeradan luomisen virtuaalitodellisuusympäristössä. Tulosten perusteella hitsausrobotin ohjelmointi VR-ympäristössä osoittautui todella yksinkertaiseksi ja nopeaksi menetelmäksi sekä kokeesta saadut tulokset vastasivat kirjallisuuskatsauksen tuloksia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Mechanical Engineering

Thomas Kaatranen

Welding robot's VR/AR/XR programming tools

Bachelor's thesis

2022

47 pages, 17 figures and 2 tables

Examiners: D.Sc Sakari Penttilä and DI Hannu Lund

Keywords: XR, VR, AR, MR, robotic welding, robot programming

This bachelor's thesis introduces the programming of a welding robot's trajectories with the use of XR-applications. The thesis was done for the Department of Welding technology of LUT University in order to gather up-to-date information on the suitability and usability of XR applications in robot programming. The thesis deals with the basics of robot welding and its productivity at a general level. In addition, it focuses on robot programming using virtual reality (VR), augmented reality (AR) and mixed reality (MR).

The aim of this thesis is to discuss why XR programming tools should be used to program a welding robot and how the programming is done with the different applications. In addition, the aim is to figure out if a programming method can affect the productivity of the welding industry. In order to meet the objectives, the thesis has undergone both a literature review and an experimental testing to make the material as accurate as possible.

The literature review deals with robot welding in general, its productivity, and how robot programming is performed with XR applications. To ensure the reliability of the material, many different scientific dissertations and online publications were used in the review. Based on the data, XR applications are well suited for programming the paths of a welding robot due to their simple and intuitive programming styles.

Experimental testing of the work was performed utilizing the virtual reality environment and the programming styles it provided. The purpose of the test was to find out how an inexperienced programmer can perform the creation of a robot's trajectory in virtual reality. Based on the results, programming the welding robot in a VR environment proved to be a really simple and fast task, and the results obtained from the experiment corresponded to the results of the literature review.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

AR lisätty todellisuus (Augmented Reality)

CAD tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer-aided design)

HMD päälle puettavat lasit (Head Mounted Display)

MR sekatodellisuus (Mixed Reality)

VR virtuaalitodellisuus (Virtual Reality)

XR laajennettu todellisuus (Extended Reality)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Hitsausrobotit hitsausteollisuudessa.....	8
2.1	Robottihitsaus.....	9
2.1.1	Railonhaku.....	10
2.1.2	Railonseuranta.....	10
2.2	Turvallisuus.....	11
3	Hitsausrobotin ohjelmointi.....	13
3.1	Virtuaalitodellisuus.....	14
3.2	Lisätty todellisuus.....	16
3.3	Sekatodellisuus.....	19
3.4	Yhteenveto ohjelmointimenetelmistä.....	21
4	Hitsausteollisuuden tuottavuus.....	23
4.1	Hitsausteollisuuden tuottavuuden parantaminen.....	23
4.2	Ohjelmointimenetelmän vaikutus tuottavuuteen.....	24
5	VR-ohjelmointimenetelmien testaus.....	26
5.1	Koejärjestelyt.....	26
5.2	Tulokset.....	29
6	Pohdinta ja johtopäätökset.....	34
6.1	Päätulokset.....	34
6.2	Tutkimuskysymyksiin vastaaminen.....	36
6.3	Tulosten uutuusarvo ja yleistettävyys.....	37
6.4	Tutkimuksen luotettavuus.....	38
6.5	Jatkotutkimusaiheet.....	39
7	Yhteenveto.....	41
	Lähteet.....	42

1 Johdanto

Tiukentuvan kilpailun ja ammattitaitoisten hitsaajien puutteen takia koneteollisuudessa on laajennettava hitsausautomaation määrää. Automatisoiduilla hitsausroboteilla pyritään supistamaan työvoimakustannuksia ja parantamaan alan tuottavuutta sekä kilpailukykyä. Hitsausrobottien avulla saadaan luotua joustava ja tehokkaampi työympäristö, sillä robotti pystyy suorittamaan työkierron eri tehtäviä suurilla nopeuksilla ja toistotarkkuuksilla. Näiden lisäksi robotti pystyy olemaan jatkuvassa työkäytössä, jonka avulla saadaan kasvatettua tuotannon tehokkuutta. (Kah et al. 2015, 2: Rout et al. 2019.) Tavanomaisesti hitsausroboteilla on yhteensä kuusi liikeakselia, ne mahdollistavat robotin toimintaan joustavuutta ja ulottuvuutta (Lin & Luo 2015, 2425). Pienissä sarjamäärissä ja geometrisesti monimutkaisissa kappaleissa hitsausrobottien hyödyntäminen ei kuitenkaan ole kannattavaa, sillä ammattitaitoinen hitsaaja kykenee sopeutumaan olosuhteiden vaihteluihin robottia paremmin (Hohn, Holmes 1982).

Jotta hitsausrobotti kykenee suorittamaan sille asetettuja työtehtäviä, on robotille ohjelmoitava erilaisia liikeratoja. Nämä mahdollistava robotin itsenäisen työskentelyn ilman operaattorin ohjausta. Ohjelmointi on siis hyvin tärkeä osa-alue robottihitsaustuotannossa. Tämän takia hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointiin tarvitaan luotettavia, yksinkertaisia ja nopeita menetelmiä, jonka takia laajennetun todellisuuden (Extended reality, XR) applikaatioita tutkitaan työssä. Ohjelmoinnin lisäksi, jotta robottihitsauksen laatu saadaan pidettyä korkealla tasolla, on robottien kanssa käytettävä laadunvarmistusteknologiaa, kuten railonhakua ja railonseurantaa.

Työn tutkimusongelmana on oleellisen ja ajankohtaisen tiedon etsiminen siitä, miten XR-applikaatioita voidaan hyödyntää hitsausrobotinohjelmoinnissa. Tutkittavat ohjelmointimenetelmät virtuaalitodellisuuden (Virtual reality, VR), lisätyn todellisuuden (Augmented reality, AR) ja sekatomellisuuden (Mixed reality, MR) avulla ovat vielä hyvin uutta teknologiaa, jonka takia oleellisen ja hyödyllisen informaation löytäminen aiheista voi osoittautua ongelmalliseksi. Tämän lisäksi, koska työ on rajattu hitsausrobotin liikeratojen ohjelmoin-

tiin, tiedonhaun yhteydessä aiheeseen on liitettävä teollisuusrobottien ohjelmointia, jotta tietoa saadaan kerättyä laajemmalla alueella.

Kandidaatintyön tavoitteena on käsitellä, miten hitsausrobotin ohjelmoinnissa käytettäviä XR-työkaluja hyödynnetään ja miksi menetelmät ovat tulossa hitsausalalle. Työssä tarkastellaan hitsausrobotin ohjelmointia virtuaalitodellisuuden (VR), lisätyn todellisuuden (AR) ja sekatomellisuuden (MR) näkökulmista. Työssä tutkitaan myös hitsausrobotin tuottavuutta XR-ohjelmointitekniikoilla. Työn aikana pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miksi VR/AR/MR-teknologioita kannattaa käyttää hitsausrobottien ohjelmoinnissa?
- Millaisia ohjelmointitekniikoita XR-aplikaatiot tarjoavat hitsausrobotin ohjelmointiin?
- Miten ohjelmointimenetelmän valitseminen vaikuttaa hitsausteollisuuden tuottavuuteen?

Työn tarkoituksena on myös koota yhteen ajankohtaista tietoa LUT-yliopiston hitsaustekniikan laboratoriolle siitä, miten virtuaalitodellisuuden, lisätyn todellisuuden ja sekatomellisuuden ohjelmointitekniikoita voidaan hyödyntää hitsausrobotin ohjelmoinnissa.

Opinnäytetyö on jaoteltu kirjallisuuskatsaukseen ja kokeelliseen tutkimukseen. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään yleisesti hitsausrobotin virtuaalitodellisuuden, lisätyn todellisuuden ja sekatomellisuuden ohjelmointitekniikoita sekä sitä, miten robotisointi vaikuttaa hitsauksen tuottavuuteen. Tämän lisäksi käsitellään hitsausrobotin konenäköä ja työturvallisuutta yleisellä tasolla. Työn kokeellisen tutkimuksen tarkoituksena on käsitellä virtuaalitodellisuutta yhtenä hitsausrobotin ohjelmointimenetelmänä. Kokeellisessa osiossa testataan, miten virtuaalitodellisuuden eri ohjelmointityylejä voidaan hyödyntää hitsausrobotin ohjelmoinnissa ja miten ne eroavat toisistaan. Kokeellinen tutkimus suoritetaan LUT-yliopistossa.

2 Hitsausrobotit hitsausteollisuudessa

Entistä enemmän manuaalista työtä korvataan kehittyneillä robottijärjestelmillä, jotta saadaan parannettua tuottavuutta, laatua ja työergonomiaa teollisuuden aloilla. Yksi merkittävimmistä teollisuuden aloista, jossa automatisoituja robotteja on aloitettu hyödyntää, on hitsausteollisuus. Hitsausrobottien käyttöönotto mahdollistaa paremman työturvallisuuden eliminoimalla hitsauksen aikaisia turvallisuusriskejä ja korvaamalla yksitoikkoisen hitsaustyön robotisoidulla menetelmällä. Hitsausrobottien avulla voidaan myös parantaa hitsauksen tuottavuutta ja laatua sekä saadaan paikatuksi hitsaajapulaa. (Kah et al. 2015, 2; Rout et al. 2019, 12–13.)

Hitsausrobottien hyödyntäminen hitsaustuotannossa ei aina ole kaikkein optimaalisin lähestymistapa. Ennen hitsausrobotin käyttöönottoa on suunniteltava, soveltuuko robotti ylipääntään sille asetettuihin työtehtäviin ja voidaanko robotti ohjelmoida toimimaan niissä tehtävissä. Hitsausrobotti tarvitsee myös työtehtävien suorittamiseen laadunvarmistusteknologiaa, sillä hitsaus vaatii suurta tarkkuutta. Hitsausrobotin on siis täytettävä kaikki sille asetetut vaatimukset ennen sen käyttöönottoa. (Hiltunen, Purhonen 2008, 33–34; Zou et al. 2022, 3–11.)

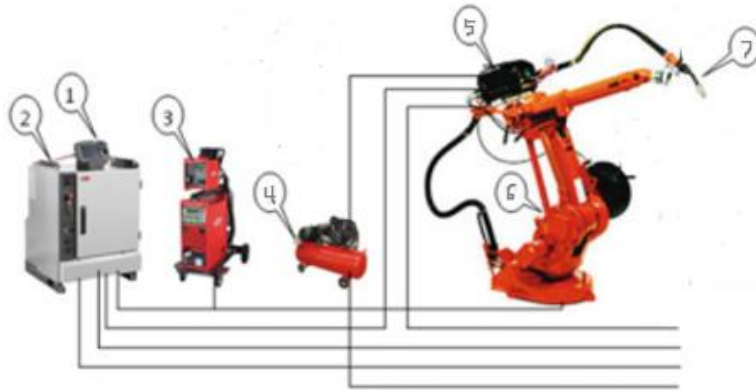
Hitsausrobotille asetettujen vaatimusten lisäksi robotin käyttö asettaa vaatimuksia hitsattavalle kappaleelle. Hitsattavan kappaleen pinnan on oltava puhdas, sillä pinnan puhtaus voi vaikuttaa hitsin laatuun ja robotin toimintaan. Työstettävillä kappaleilla on myös oltava hyvä luoksepäästävyys hitsattavaan railoon, jotta robotti kykenee suorittamaan hitsauksen. Kaiken kaikkiaan hitsausrobotit ovat suuri lisäys hitsausteollisuuteen, mutta suunnitteluvaiheessa on aina mietittävä, soveltuuko robotti kyseessä oleviin työtehtäviin.

2.1 Robottihitsaus

Jatkuvan teknologian kehityksen ja korkean tuottavuuden ansiosta teollisuusroboteista on tullut iso osa hitsausteollisuutta (Laiping et al. 2005). Ominaisuuksien monipuolisuuden ja tehokkaan työkierron ansiosta robotit ovat nousseet valmistusteollisuudessa alan kärkipaikalle. Robottihitsauksen avulla voidaan saavuttaa hitsauksen tuottavuuden kasvu, laadun parantuminen, tuotantokapasiteetin kasvaminen ja hitsaajapulan paikkaaminen. Tämän lisäksi hitsausroboteilla saadaan parannettua alan työturvallisuutta ja työergonomiaa paikkaamalla käsinhitsausta robotisoiduilla menetelmillä. Hitseistä saadaan tasalaatuisia, sillä hitsausrobotit pystyvät yhtäjaksoisesti ja väsymättä hitsaamaan monimutkaisia rakenteita sekä tavanomaisia liitoksia. (Kah et al. 2015, 2; Ong et al. 2019; Rout et al. 2019, 2.) Hitsauksen valmistuskustannukset eivät kuitenkaan vähene automaattisesti hitsausrobotin käyttöönoton vaikutuksesta. Ennen käyttöönottoa on harkittava robotin ja tuotteiden soveltuvuutta keskenään. Tähän vaikuttavat mm. työstettävien kappaleiden geometriat, hitsaustyyli, tuotantomäärät ja liitostyytit.

Tyypillinen hitsausrobotti on kuuden vapausasteen kiertyvänivelinen robotti. Kuuden vapausasteen kiertyvänivel mahdollistaa robotille kattavan joustavuuden ja ulottuvuuden. Robotin nivelvarsien ohjaamisessa hyödynnetään servomooottoreita, jotka mahdollistavat tarkkojen liikeratojen luomisen. Tällöin työstettävien kappaleiden hitseistä saadaan virheettömiä ja tasalaatuisia. Toiminnallisuudeltaan hitsausrobotin toiminnot perustuvat siihen, miten kyseinen robotti on ohjelmoitu (Kempfi 2022). Robotin toiminta voidaan sopeuttaa moniin erilaisiin työtehtäviin ohjelmoimalla sille tarvittuja liikeratoja. (Lin & Luo 2015, 2418–2425.)

Robottihitsauksen pääkomponenttina on hitsausvirtalähde, joka vastaa valokaaren sytyttämisestä ja ylläpitämisestä hitsauksen aikana. Ennen hitsauksen aloittamista robotin on saatava tieto hitsausarvoista suorittaakseen hitsauksen. Operaattori voi syöttää tietyt parametrit robotille, joiden avulla robotti kykenee kutsumaan sen tiettyä kanavaa, joka sisältää olennaiset hitsausarvot. Hitsausrobotti koostuu monesta eri komponentista, jotka ovat kuvattu alla olevassa kuvassa 1. (Hiltunen et al. 2008, 34.)



Kuva 1. Hitsausrobotin komponentit: (muokattu kuva) 1) Opetusohjain, 2) ohjausyksikkö, 3) virtalähde, 4) ilmakompressori, 5) Langansyöttö, 6) robotti, 7) hitsauspoltin (Lin & Luo 2015, s. 2429)

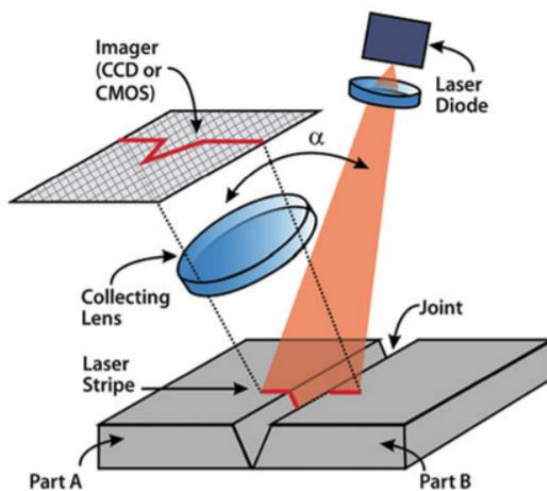
2.1.1 Railonhaku

Robotin tarkkuus on yksi tärkeimmistä tekijöistä robottihitsauksen aikana, sillä hitsauksen tulee tapahtua millimetrin tarkkuudella. Jotta voidaan varmistaa hitsauksen tarkkuus, käytetään hitsausroboteissa railonhakuteknologiaa. Railonhakuteknologian avulla robotti kykenee todentamaan railon todellisen sijainnin. Railon sijainti on varmistettava ennen hitsausta, sillä valmistuksessa kappaleiden geometriat ovat alttiita muutoksille esimerkiksi lämmöntonin takia. Railonhaun avulla pystytään siis havaitsemaan hitsin aloitus- ja lopetuskohdat. Tämän avulla robotti pystyy suorittamaan tarvittavat paikannussäädöt ennen hitsauksen aloittamista sekä suorittamaan tarkan hitsauksen. Tyypillisesti railonhakua suoritetaan kontaktiin perustuvalla menetelmällä, jossa railon paikka todennetaan koskettamalla railoa hitsauslangalla tai hitsauspoltinrennalla, mutta optiseen anturointiin perustuvia railonhakumenetelmiä on myös saatavilla. (Kah et al. 2015, 5–10; Lin & Luo 2015, 2434.)

2.1.2 Railonseuranta

Railon paikantamisen lisäksi robottihitsauksessa voidaan käyttää railonseurantateknologiaa, joka perustuu hitsattavan kappaleen railon seuraamiseen ja sen geometrian mittaamiseen. Railonseurannan aikana mitatut tiedot mahdollistavat robotin liikeradan muuntamisen tar-

peen vaatiessa. Railon seurannassa voidaan käyttää lasersensoria, joka kiinnitetään hitsauspolttimen läheisyyteen, mikä mahdollistaa tarkan railon seurannan. Tämä voi kuitenkin vaikeuttaa hitsausprosessia, sillä hitsauspolttimen luoksepäästävyys hitsattavaan kappaleeseen huononee. Tämän tyyppinen railon seuranta perustuu siis laserin tuottamaan valoon, joka projisoidaan hitsauskohdan edelle valonsäteeksi niin kuin kuvassa 2 on esitetty. Laserin luoman valonsäteen avulla pystytään määrittämään robotille railon geometriset muodot ja sen sijainti. Tämän lisäksi railon seurantaan voidaan käyttää valokaariantuointia, jossa hitsauspoltinta vaaputetaan hitsauksen aikana. Tällöin virran ja jännitteen muutosarvon perusteella polttimen paikkaa voidaan ohjata hitsattavassa railossa. Railon seuranta ei kuitenkaan aina käytetä hitsausroboteissa, sillä lyhyiden hitsisarjojen kanssa reaaliaikaista seuranta ei välttämättä vaadita, vaan voidaan hyödyntää vain railonhakua. (Lin & Luo 2015, 2434–2435; Ong et al. 2019, 40–42; Rout et al. 2019, 2.)



Kuva 2. Railon seurannan toimintaperiaate (Lin & Luo 2015, s. 2436)

2.2 Turvallisuus

Ihmistyövoiman korvaaminen teollisuusroboteilla tuottaa korkeamman turvallisuuden muun muassa hitsausteollisuudessa. Hitsausrobotin käyttö vähentää mahdollisia hitsauksen aikaisia turvallisuusriskejä kuten säteilyä, saastunutta ilmapiiriä, palovammoja tai sähköiskuja. Robottien avulla luodaan hitsausteollisuuteen parempi työergonomia, mutta työskennellessä robottien läheisyydessä on otettava huomioon robotin toiminta. Robotti kykenee

aiheuttamaan hengenvaarallisia tilanteita virheellisissä olosuhteissa. Tämän takia robottien käytössä on seurattava olennaisia turvallisuusstandardeja, jotka ovat esitetty kuvassa 3. (Lin & Luo 2015, s. 2432–2433.)

Standard number	Description
AWS D16.1	Robotic arc welding safety
ANSI Z49.1	Safety in welding, cutting, and allied processes
CAN/CSA-W117.2-06 (R2011)	Safety in welding, cutting, and allied processes
ISO 1021801-1: 2011	Robots and robotic devices – safety requirements for industrial robots – part 1: robots
ISO 1021801-2: 2011	Robots and robotic devices – safety requirements for industrial robots – part 2: robot systems and integration
DIN EN 775	Manipulating industrial robots – safety

Kuva 3. Robottihitsaukseen liittyviä turvallisuus standardeja (Lin & Luo 2015, s. 2433)

Jotta voidaan taata turvallinen työympäristö hitsausrobotin ja sen operaattorin välille, täytyy ennen robotin käyttöönottoa poissulkea kaikki turvallisuuteen vaikuttavat häiriötekijät. Hitsausrobottien kanssa hyödynnetään erotettujärjestelmä yhteistyömallia. Yhteistyömallissa robotti ja sen operaattori ovat erotettu toisistaan robotin toiminnan aikana. Robotin ympärille asennetaan aitaus, jotta estetään ihmisten pääsy robotin läheisyyteen. Tarvittaessa hitsausverho voidaan asentaa robotin työaseman ympärille, minkä avulla voidaan estää mahdollista säteilyä ja hitsauksen aikana syntyviä roiskeita. Työpisteeseen voidaan myös lisätä savunpoistolaite, joka vähentää hitsauksesta syntyviä hitsaussavuja. (Lin & Luo 2015, s. 2433.)

Turvallisuus on myös käytön lisäksi otettava huomioon hitsausrobotin ohjelmoinnissa. Robotin liikeratojen määrittämisessä voi esiintyä mahdollisia vaaratilanteita riippuen siitä, mitä ohjelmointimenetelmää käytetään. Robotin online-ohjelmointi ja valmiin ohjelman testaus ovat tilanteita, joissa robotti voi käyttäytyä yllättävästi ja aiheuttaa mahdollisia vaaratilanteita esim. törmäyksen tai puristukseen jännin. Tyypillisesti juuri ohjelmoinnin ja liikeratojen testauksen aikana normaalit turvatoimenpiteet eivät päde, koska robottia on ohjelmoitava ja testattava lähietäisyydeltä hitsausohjelmia tehdessä. Tämän takia on kannattavaa ohjelmoida robotin liikeradat etäohjelmointimenetelmällä, jolloin voidaan välttyä ohjelmoinnin aikaisilta vaaratilanteilta. (Bolano et al. 2020, 1; Ong et al. 2020, 4.)

3 Hitsausrobotin ohjelmointi

Robottien käyttöönotto on viimeisten vuosikymmenten aikana yleistynyt hitsausteollisuuden alalla nopealla vauhdilla uusien teknologioiden kehitysten ja robottiaseman hankintakustannusten laskemisen ansiosta. Teknologian kehitys on laskenut robottijärjestelmien valmistuskustannuksia ja helpottanut robotin ohjelmointia. Ohjelmoinnin tarkoituksena on luoda robotille sen toimintamekanismit, joiden avulla robotti kykenee toimimaan eri tilanteissa. Robottien ohjelmointiin ei ole tällä hetkellä universaalia lähestymistapaa, vaan robottia voidaan ohjelmoida hyvin monella eri tavalla.

Robotin ohjelmointimenetelmät voidaan jaotella kahteen eri osaryhmään: online-ohjelmointiin ja offline-ohjelmointiin eli etäohjelmointiin (Ong et al. 2020, 1; Villani et al. 2018, 3). Online-ohjelmoinnin aikana robotti ei voi olla jatkuvassa työkäytössä, sillä kyseinen ohjelmointimenetelmä perustuu robotin ja operaattorin väliseen vuorovaikutukseen. Online-ohjelmointimenetelmiä ovat muun muassa johdattamalla- ja opettamalla-ohjelmointi. Näissä prosesseissa operaattori ohjaa robottia, joko suoraan kosketuksen välityksellä tai siirtämällä sitä ihmisen ja koneen välisen käyttöliittymän avulla. Robotti ohjataan tiettyihin pisteisiin, jotka tallennetaan robotin ohjelmaan. Ohjelmointiprosessin jälkeen robotti osaa suorittaa sille opetetut liikeradat. Iso haittapuoli online-ohjelmoinnissa on, että ohjelmointivaiheen aikana tarvitaan fyysinen robotti. Lisäksi, jos robotti on kooltaan suuri, sen ohjelmointi saattaa osoittautua vaikeaksi etenkin johdattamalla-ohjelmoinnissa. (Kah et al. 2015, 3–4; Thoo et al. 2021; Villani et al. 2018.)

Toisin kuin online-ohjelmoinnissa etäohjelmoinnin aikana robotti voi olla kokoaikaisessa käytössä, sillä ohjelmointi ei perustu robotin ja operaattorin väliseen vuorovaikutukseen (Thoo et al. 2021). Etäohjelmointimenetelmiä on erilaisia, tunnetuimpia menetelmiä ovat mallipohjainen, piirrepohjainen ja tekstipohjainen ohjelmointi. Mallipohjainen ja piirrepohjainen ohjelmointi perustuvat 3D-malleihin robotin työasemasta ja työkappaleesta, missä hyödynnetään CAD-mallien (Computer-aided design, CAD) muototietoja ohjelmoinnin suorittamiseen. Mallipohjaisessa menetelmässä ohjelmointi suoritetaan paikoituspisteiden

avulla, kun taas piirrepohjaisessa ohjelmoinnissa kyetään tunnistamaan hitsejä automaattisesti CAD-mallista, joka mahdollistaa tehokkaan tavan ohjelmoida robotin liikeradat. (Delfoi; Neto et al. 2012, 2–5.) Tekstipohjaisessa ohjelmoinnissa robotille luodaan erilaisia komentoja, joita voidaan suorittaa tietokoneohjelman välityksellä. Tämä vaatii kuitenkin ohjelmoijalta korkeatasoista osaamista (Fennel et al. 2022, 1).

Ohjelmointiprosessin helpottamiseksi ja korkeatasoisen ohjelmointi osaamisen välttämiseksi on hitsausrobotin ohjelmoinnissa aloitettu käyttämään laajennetun todellisuuden applikaatioita. Hyödyntämällä XR-applikaatioita: virtuaalitodellisuutta lisättyä todellisuutta, sekatomodellisuutta ohjelmoijan on helpompi ymmärtää robotin toimintaympäristöä. (Chang, Devine, Klitzing 2020, 1–2.) Lisäksi ohjelmointi voidaan suorittaa ihmisille tutuilla ja intuitiivisilla tavoilla (Ong et al. 2020, 1).

3.1 Virtuaalitodellisuus

Virtuaalitodellisuus on tietokoneohjelman avulla luotu keinotekoinen ympäristö. Luodun ympäristön avulla voidaan simuloida todellisen ympäristön toimintaperiaatteita täysin kuvitteellisessa ympäristössä. Toisin kuin perinteisissä käyttöliittymissä virtuaalitodellisuuden avulla operaattori sijoitetaan osaksi kokemusta. Sen sijaan, että operaattori ohjelmoisi robotia tietokoneen välityksellä, hänet voidaan asettaa keinotekoiseen 3D-ympäristöön. Uppoutuneena ympäristössä operaattori kykenee olemaan vuorovaikutuksessa ympäristöön luotujen virtuaalisten objektien kanssa. Jotta virtuaalitodellisuus ympäristö saadaan luotua mahdollisimman todenmukaiseksi, simuloidaan ihmisille tärkeitä aisteja kuten näköä ja kuuloa sekä mahdollisilla lisäosilla myös kosketusta. (Burghardt et al. 2020, 2; Wohlgenannt, Simons, Stieglitz 2020, 455–457.)

Virtuaalitodellisuuteen uppoutumisen mahdollistamiseksi on käytettävä VR-laitteistoa. VR-laitteisto koostuu kahdesta eri ohjaimesta sekä virtuaalilaseista, jotka peittävät käyttäjän näkökentän. VR-laitteisto on esitetty kuvissa 4a ja 4b. Virtuaalilasien avulla operaattori pääsee uppoutumaan keinotekoiseen virtuaaliympäristöön. (Wohlgenannt et al. 2020, 457; Wonsick

& Padir 2020, 9.) Ympäristössä operaattori kykenee liikkumaan ja olemaan vuorovaikutuksessa keinotekoisien virtuaaliympäristön kanssa, joka voidaan luoda vastaamaan todellista tuotantoympäristöä. Ohjaimien avulla operaattori voi kontrolloida itseään sekä simuloida todellisia vuorovaikutustilanteita esimerkiksi virtuaalirobotin kanssa. (Bolano, Roennau, Dillmann 2020, 1)



Kuva 4. VR-laitteiston virtuaalilasit ja ohjaimet (Craig 2020; InstaVR Inc. 2015)

Ohjelmointimenetelmänä VR-ohjelmointi on yksinkertainen ja se vaatii vähemmän älyllistä vaivaa ohjelmoijalta verrattuna muihin tyypillisimpiin etäohjelmointimenetelmiin, sillä 3D-mallia on helpompi ymmärtää virtuaaliympäristössä kuin tietokoneen näytöltä. Robotin ohjelmoija pystyy navigoimaan virtuaaliympäristössä luonnollisemmin liikkumalla robotin läheisyydessä, kun taas tietokoneen näytöltä 3D-mallin ymmärtäminen on haastavampaa. VR-ohjelmointi antaa erityisesti vähemmän kokemusta omaaville ohjelmoijille intuitiivisemmän tavan määrittää robotille erilaisiin työtarkoituksiin liittyviä liikeratoja. (Bolano et al. 2020, 1, 5; Chang et al. 2021, 39–40; Wonsick et al. 2020, 4.)

Virtuaalitodellisuus hyödyntää sekä online- että etäohjelmointimenetelmän hyviä osa-alueita. Koska VR-ohjelmointi suoritetaan etämuodossa, ei fyysistä robottia tarvita ohjelmointivaiheen aikana ollenkaan. Tämä mahdollistaa robotin jatkuvan työkäytön, jonka avulla saadaan parannettua esimerkiksi tuottavuutta ja turvallisuutta. (Bolano et al. 2020, 1.) Ohjelmoinnin aikana operaattori ei siis ole vuorovaikutuksessa fyysisen robotin kanssa ollenkaan. Ohjelmointi virtuaalimaailmassa suoritetaan opettamalla robotille erilaisia liikkeitä esimerkiksi simuloimalla ohjelmoijan käden liikkeitä robotin liikkeiksi tai liikuttamalla robottia

manuaalisesti ohjaimen välityksellä kuten kuvassa 5 on esitetty. VR-ohjelmointi muistuttaa siis johdattamalla ohjelmointia, jossa on lisänä VR:n tuomat ominaisuudet. Ohjelmointia voi myös suorittaa hyödyntämällä pisteestä pisteeseen -menetelmää, jossa operaattori määrittää robotin polun merkitsemällä pisteitä virtuaalitodellisuuteen. (Bolano et al. 2020, 3–5; Chang et al. 2021, 34–40; Wang et al. 2020, 799–801; Wonsick et al. 2020, 7.)



Kuva 5. Kuvitteellista virtuaaliympäristöä kuvaava otos, jossa suoritetaan robotin ohjelmointi (Simon 2017)

Ihanteellisessa hitsausrobotin ohjelmoinnissa ohjelmoijan käden liikkeet ovat tasaisia ja robotin hitsauspoltin liikkuu sen mukaisesti. Ihmisten käsien luonnollisesta ja väistämättömästä värähtelystä johtuen tämä ei kuitenkaan ole mahdollista. Kiertääkseen värähtelyn aiheuttamia epätarkkuuksia, operaattori kykenee hienosäätämään robotin polkua liikeradan määrittämisen jälkeen. Tämä mahdollistaa hyvän lopputuloksen robotin liikeradalle. (Chang et al. 2021, 40; Wang et al. 2020, 800.)

3.2 Lisätty todellisuus

Lisätty todellisuus mahdollistaa tehostetun näkymän reaali maailmasta, laajentamalla tai täydentämällä sitä tietokoneella tuotetuilla virtuaalisilla objekteilla. Tämä mahdollistaa käyttäjän toiminnan fyysisessä maailmassa virtuaalisten objektien kanssa. AR ei siis luo täysin keinotekoisia ympäristöä, johon käyttäjä uppoutuu, vaan hyödyntää VR-maailmasta

tuttuja graafisesti luotuja objekteja, joita voidaan hyödyntää reaali maailman objektien kanssa robotin ohjelmoinnissa. (Bogue 2020, 789; Ong et al. 2019, 40–41.)

Lisätyn todellisuuden järjestelmät hyödyntävät intuitiivisia vuorovaikutusmenetelmiä. Tämä on suuri etu robotin ohjelmoinnissa, sillä korkeatasoinen koulutus ei ole tarpeellista. Samalla ohjelmointimenetelmän käyttö vähentää ohjelmoijan henkistä kuormitusta, parantaa turvallisuutta sekä kaiken kaikkiaan lisää teollisuusalan tuottavuutta vähentämällä robotin ohjelmointiin vievää aikaa. (Ong et al. 2020, 1–2; Papkostas et al. 2022, 792, 798.) Lisättyä todellisuutta voidaan käyttää joko päälle puettavien lasien muodossa (Head Mounted Device, HMD) tai mobiilikameran avulla (Ong et al. 2020, 2; Thoo et al. 2021, 2). Mobiilikameran kautta operaattori pystyy seuraamaan todellista ympäristöä, johon on lisätty virtuaalisia objekteja kuten kuvassa 6a on esitetty. Tämä kuitenkin rajoittaa operaattorin toimintaa, sillä hänen on jatkuvasti käsiteltävä kameran kuvakulmaa. Kiertääkseen tämän ongelman operaattori voi käyttää HMD-laseja, jotka mahdollistavat tehokkaamman vuorovaikutuksen operaattorin ja lisätyn todellisuuden ympäristön kanssa kuten kuvassa 6b on esitetty. (Makhataeva & Varol 2020, 4–6.)



a)

b)

Kuva 6. Kädessä pidettävän tabletin (a) ja hologrammi lasien (b) AR-palvelut (Gestalt Robotics 2018; Gestalt Robotics 2019)

Hitsausrobotin ohjelmointi lisätystä todellisuudessa voidaan suorittaa joko online- tai etäohjelmointina. Verrattuna VR-ympäristöön AR-ympäristö antaa ohjelmoijalle paremman mielikuvan, miten robotti tulee toimimaan todellisessa ympäristössä. AR-ohjelmointi voi-

daan suorittaa suoraan robotin työympäristössä virtuaalista robottia hyödyntäen. Tämä vähentää vaikeasti ennustettavia tilanteita, joita voi syntyä VR-ympäristön muuttamisesta reaaliaikaiseen ympäristöön. (Thoo et al., 2021, 1–3.)

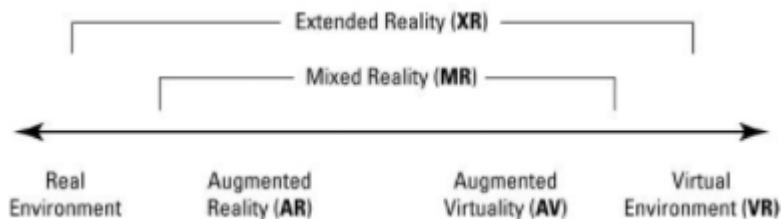
Hitsausrobotin ohjelmointi voidaan suorittaa puhelimeen ladattavalla AR-sovelluksella, jonka kautta virtuaalirobottia kyetään liikuttamaan. Virtuaalirobotin liikkeet voidaan simuloida fyysisen robotin liikkeiksi ohjelmoinnin aikana. Online-ohjelmoinnissa käyttäjä kykenee johdattamaan virtuaalirobottia ja fyysistä robottia samanaikaisesti eri paikkoihin. Vastaavasti etäohjelmoinnissa käyttäjän on määritettävä pisteitä lisättyyn todellisuuteen, mitkä muodostavat robotin polun. (Thoo et al., 2021.) Tämän lisäksi Ong et al. (2020, 2–6) suorittivat hitsauspolun ohjelmoinnin HMD-lasien avulla, jossa operaattori kykeni määrittämään pisteitä lisättyyn todellisuuteen AR-ohjelmistoon kytketyn tietokone hiiren avulla.

Yllä mainitussa AR-sovelluksessa virtuaalirobottia pystytään liikuttamaan raahaamalla robotin hitsauspoltinta sen x- ja y-koordinaatistossa. Tämän lisäksi robotin niveliä ja hitsauspolttimen orientaatiota kyetään muuttamaan eri asemiin. Nämä säätömahdollisuudet mahdollistavat hyvän luoksepäästävyuden erilaisiin kappaleisiin, mitä tarvitaan varsinkin hitsauksessa. Ohjelmoinnin suorittamisen jälkeen ohjelmoitu polku pystytään lähettämään suoraan fyysiseen robottiin simuloitavaksi. (Thoo et al., 2021, 3–7.)

Robotin ohjelmointi AR-teknologian avulla toimii siis hyvin samantyyllisillä tavoilla kuin VR-ohjelmointi. Robotin polku voidaan määrittää pisteestä pisteeseen menetelmällä ja johdattamalla robottia käyttöliittymän välityksellä. Ohjelmointimenetelmänä AR ei kuitenkaan ole aina paras mahdollinen valinta, sillä siihen liittyy syvyshavainto ongelmia ja puhelimen kautta luodut robotin liikkeet voivat olla epätarkkoja. (Thoo et al., 2021, 3.)

3.3 Sekatodellisuus

Sekatodellisuudessa, joskus kutsutaan myös yhdistetty todellisuus, virtuaalista ja todellista maailmaa sulautetaan keskenään muodostaen ympäristö, jossa fyysiset ja digitaaliset objektit elävät rinnakkain. Periaatteessa VR-ympäristö asetetaan todellisen ympäristön päälle, jonka seurauksena käyttäjä voi nähdä virtuaalisia objekteja reaaliympäristössä ja olla vuorovaikutuksessa niiden kanssa. Sekatodellisuus hyödyntää siis AR-ympäristöstä ja samanaikaisesti VR-ympäristöstä hyviä osapuolia, joiden avulla saadaan muodostettua vakaa ja interaktiivinen uusi ympäristö. Sekatodellisuus ei tapahdu vain virtuaalisessa tai fyysisessä maailmassa vaan on pikemminkin näiden kahden hybridimuotoinen yhdistelmä, joka kuvattu kuvassa 7. (Doolani et al., 2020, 4, 8–9; Neves, Serrario, Pires, 2018, 785.)



Kuva 7. Sekatodellisuuden visuaalinen kuvaus (Mealy, 2018, 14)

Jotta käyttäjä pääsee sekatodellisuus ympäristöön, on hänen käytettävä hologrammilaseja. Yksi käytetyimpiä hologrammilasimalleja, jotka mahdollistavat sekatodellisuuden käyttämisen, on Microsoft HoloLens -lasit. HoloLens-lasit ovat esitetty kuvassa 8. Hologrammilasit mahdollistavat vuorovaikutuksen holografisen käyttöliittymän kanssa, mikä näkyy lasien luomassa sekatodellisuudessa. Ohjelmoinnin aikana operaattori kykenee käyttämään holografista käyttöliittymää robotin ohjelmointiin. Toisin kuin virtuaalitodellisuudessa, jossa operaattori on vuorovaikutuksessa käyttöliittymän kanssa ohjaimien avulla, sekatodellisuudessa operaattori käyttää käsiään käyttöliittymän ja virtuaalisten objektien käsittelemiseen. (Neves et al., 2018, 786.)



Kuva 8. Microsoft HoloLens lasit (BackMarket 2022)

Hitsausrobotin ohjelmointi MR-ympäristössä voidaan suorittaa hyvin samantyyllisillä menetelmillä kuin AR-ympäristössä. Robotti voidaan ohjelmoida joko etä- tai online-ohjelmointina. Suurin ero AR- ja MR-ohjelmoinnin välillä on, että MR-tekniikan avulla operaattori kykenee kontrolloimaan virtuaalisia objekteja käsiensä avulla (Doolani et al., 2020, 4). Lisäksi operaattori kykenee liikuttamaan virtuaalisia objekteja mielivaltaisesti ohjelmointiympäristön sisällä.

Hitsausrobotin ohjelmointi MR-tekniikan avulla voidaan suorittaa pisteestä pisteeseen -menetelmällä. Operaattori kykenee esimerkiksi määrittämään polun aloitus- ja lopetuspisteeseen, minkä jälkeen hitsauspolttimen asento voidaan määrittää liikeradan suorittamiseen sekä valita liikeradan muoto pisteiden välille. (Ostanin et al. 2018, 52–53.) Tämän lisäksi pisteestä pisteeseen -menetelmä voidaan suorittaa johdattamalla virtuaalirobotin hitsauspolttinta haluttuihin paikkoihin ja tallentamalla pisteen koordinaatit ohjelmaan (Mourtzis, Angelopoulos, Panopoulos, 2022, 7). Polun asettamisen jälkeen operaattori voi suorittaa määritetyn liikeradan simulaation virtuaalirobotilla. Kun operaattori on tyytyväinen simulaatiosta saatuihin tuloksiin, määritetty liikerata voidaan siirtää todellisen robotin systeemiin. (Ostanin et al. 2018, 52–53.)

3.4 Yhteenveto ohjelmointimenetelmistä

XR-aplikaatiot soveltuvat hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointiin niiden tarjoamien ominaisuuksien takia. Ohjelmoinnin suorittaminen näillä menetelmillä on hyvin yksinkertaista ja nopeaa. Lisäksi ne tarjoavat varsinkin kokemattomille ohjelmoijille intuitiivisemmän tavan määrittää hitsausrobotin liikeradat. Robotin ohjelmointi VR-, AR- ja MR-ympäristössä suoritetaan hyödyntäen hyvin samantyyllisiä ohjelmointitapoja. Liikeradan ohjelmointi voidaan tehdä pisteestä pisteeseen -menetelmällä tai johdattamalla robottia haluttuihin paikkoihin.

Suurimmat eroavaisuudet kyseisten ohjelmointimenetelmien välillä ovat niiden ohjelmointiympäristöt. VR-ympäristö on täysin keinotekoinen ympäristö, joka luodaan hyödyntäen erilaisia 3D-malleja. Kun taas AR- ja MR-ohjelmointi suoritetaan reaali maailmassa, johon lisätään virtuaalisia objekteja tehostaakseen ohjelmointiprosessia. AR- ja MR-ohjelmoinnin suurimpana erona on, että MR-ympäristössä käyttäjä kykenee omien eleiden ja käsien avulla olemaan vuorovaikutuksessa virtuaalisten objektien kanssa. AR-ympäristössä käyttäjän on hyödynnettävä tietokoneen tai puhelimen käyttöliittymää virtuaalisten objektien kontrolloimiseen. Tämän lisäksi VR-ohjelmointi voidaan suorittaa vain etäohjelmointimuodossa, sillä fyysistä robottia ei voida hyödyntää ohjelmoinnin aikana. AR- ja MR-ohjelmointi voidaan halutessaan suorittaa joko etä- tai online-ohjelmointina. Online-ohjelmoinnissa virtuaalirobotti asetetaan fyysisen robotin tilaan, minkä jälkeen virtuaalirobotin liikkeet simuloidaan fyysisen robotin liikkeiksi liikuttamalla virtuaalirobottia.

Ennen robotin ohjelmoinnin aloittamista kannattaa miettiä, miten ohjelmointi suoritetaan ja mitä ohjelmointimenetelmää käytetään. Etäohjelmoinnin avulla voidaan mahdollisesti kasvattaa tuottavuutta, koska fyysinen robotti kykenee olemaan jatkuvassa työkäytössä, mutta online-ohjelmointimenetelmät saattavat olla nopeampia ja antavat ohjelmoijalle enemmän palautetta. Vaikka VR-, AR- ja MR-ohjelmointi eivät eroa toisistaan suuresti, ne sisältävät keskenään erilaisia vahvuuksia ja heikkouksia, jotka ovat kuvattu seuraavalla sivulla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1: Ohjelmointimenetelmien vahvuudet ja heikkoudet (Bolano et al. 2020; Burghardt et al. 2020; Gadre et al. 2019, 1; Ostanin et al. 2018, 54–55; Thoo et al. 2021, 4)

Ohjelmointimenetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet
VR-ohjelmointi	<ul style="list-style-type: none"> + Etäohjelmointi + Fyysinen robotti ei voi vaurioitua ohjelmoinnin takia + Ympäristön visualisointi on helppoa + Mahdollisuus simuloida ohjelmituista liikeratoja + VR:n tarjoamat ohjelmointimenetelmät ovat yksinkertaisia + Ohjelmointi ei vaadi operaattorilta suurta kokemusta 	<ul style="list-style-type: none"> - VR ympäristön luominen - Ympäristön muutos virtuaalitodellisuudesta reaaliaikaan saattaa tuottaa vaikeuksia - Syvyyssnäkö ongelmia - Virtuaalisilla objekteilla ei ole fyysisiä ominaisuuksia
AR-ohjelmointi	<ul style="list-style-type: none"> + Mahdollisuus suorittaa etä- ja online-ohjelmointina + Ohjelmointi suoritetaan todellisessa ympäristössä + Voidaan suorittaa robotin työpisteessä + Ohjelmointi ei vaadi operaattorilta suurta kokemusta + AR:n tarjoamat ohjelmointimenetelmät ovat yksinkertaisia 	<ul style="list-style-type: none"> - Syvyyssnäkö ongelmia - Epätarkat liikkeet kosketusnäytön tai käyttöliittymän takia - Mobiili kameran käyttö rajoittaa ohjelmoijan näkökenttää - Virtuaalisilla objekteilla ei ole fyysisiä ominaisuuksia
MR-ohjelmointi	<ul style="list-style-type: none"> + Mahdollisuus suorittaa etä- ja online-ohjelmointina + Ohjelmointi suoritetaan todellisessa ympäristössä + Voidaan suorittaa robotin työpisteessä + Ohjelmointi suoritetaan hyödyntäen käyttäjän käsiä + Ohjelmointi ei vaadi operaattorilta suurta kokemusta + MR:n tarjoamat ohjelmointimenetelmät ovat yksinkertaisia + Mahdollisuus simuloida ohjelmituista liikeratoja virtuaalirobotilla 	<ul style="list-style-type: none"> - Eleiden seuranta ei täydellinen holografisten lasien kanssa - Epätarkat liikkeet mahdollisen viiveen takia - Virtuaalisilla objekteilla ei ole fyysisiä ominaisuuksia - Syvyyssnäkö ongelmia

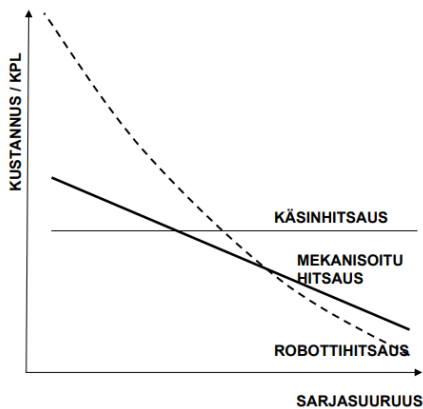
4 Hitsausteollisuuden tuottavuus

Teollisuusroboteista on tullut olennainen osa nykyaikaista maailmaa ja niiden käyttöönotto on avannut uusia ovia eri teollisuuden aloille, sillä useimmiten robotit pystyvät suorittamaan työtehtäviä tehokkaammin kuin ihmiset. Hitsausteollisuus on yksi näistä aloista, missä robotteja on aloitettu käyttämään entistä enemmän, sillä manuaalisen hitsauksen tuotantonopeudet ovat alhaiset ankaran työympäristön ja fyysisten vaatimusten takia. Ennen hitsausrobotin käyttöönottoa on kuitenkin harkittava parantaako ihmistyön korvaaminen robotilla alan tuottavuutta, sillä hitsausrobotit eivät aina sovellu työtehtäviin paremmin kuin ihmiset. (Kah et al. 2015)

4.1 Hitsausteollisuuden tuottavuuden parantaminen

Hitsausteollisuuden tuottavuuden parantamisen tarkoituksena on tehostaa koko hitsaustuotantoprosessia vähentämällä ylimääräistä työtä sekä nopeuttamalla työkiertoa. Oikein käytettynä hitsausrobotit parantavat hitsausteollisuuden tuottavuutta, sillä robotit kykenevät olemaan jatkuvassa käytössä. Tämä mahdollistaa ihmistyövoiman käyttämisen alan muissa tehtävissä, mikä nopeuttaa itse hitsauksen työkiertoa. Tuottavuuden lisäksi hitsausrobotit parantavat hitsien laatua, sillä robotit eivät väsy samalla tavalla kuin ihmiset, mikä voi johtaa hitsien epätarkkuuksiin ja mahdollisiin vaaratilanteisiin. (Chandankar 2016, 251–252; Kah et al. 2015, 1–2, 13.)

Niin kuin aikaisemmin jo mainittiin hitsausrobotit eivät välttämättä ole aina oikea ratkaisu tuottavuuden kasvattamiseksi. Hitsausrobotit soveltuvat tehtäviin, joissa tuotantomäärät ovat korkealla ja työtehtävät ovat toistettavissa, jolloin hitsaukseen kuluvat resurssit laskevat kuten kuvassa 9 on esitetty. Toistaiseksi hitsien piensarjatuotannossa ja geometrisesti vaativissa hitsauksissa ammattitaitoiset hitsaajat ovat tehokkaampia, sillä he pystyvät sopeutumaan erilaisiin hitseihin, kun taas robotti osaa vain sille opetetut liikeradat. (Hiltunen 2005; Kah et al. 2015 1–2.) Jotta hitsausteollisuuden tuottavuutta saataisiin parannetuksi, on harkittava mihin työtarkoituksiin hitsausrobotia tullaan käyttämään.



Kuva 9. Visuaalinen esitys hitsausrobotin soveltuvuudesta eri tuotantomäärissä (Hiltunen 2005)

4.2 Ohjelmointimenetelmän vaikutus tuottavuuteen

Hitsausrobotin ohjelmointi voidaan jakaa kahteen päämenetelmään: online-ohjelmointiin ja etäohjelmointiin (Ong et al. 2020, 1; Villani et al. 2018, 3). Riippuen siitä, mitä ohjelmointimenetelmää käytetään robotin ohjelmoinnissa voi robottihitsauksen tuottavuus joko kasvaa tai laskea. Online-ohjelmoinnissa fyysisen robotin täytyy olla käytettävissä, sillä ohjelmointimenetelmä perustuu fyysisen robotin ohjaamiseen. Etäohjelmoinnissa puolestaan fyysistä robottia ei tarvita vaan robotti pystyy suorittamaan sille jo opetettuja työtehtäviä ohjelmointiprosessin aikana. Jotta robottihitsauksen tuottavuutta voidaan kasvattaa, on tehokkaampaa käyttää etäohjelmointia. (Ong et al. 2020, 1.) Tämä ei kuitenkaan aina ole tehokkaampi menetelmä, sillä robotin täytyy jo ennestään osata erilaisia liikeratoja suorittaakseen työtehtäviä.

Ohjelmointimenetelmän valitsemisen lisäksi tuottavuuteen vaikuttaa myös ohjelmointiprosessin nopeus. Verrattaessa etäohjelmointimenetelmiä toisiinsa tekstipohjainen ohjelmointi on prosessina hidas ja vaatii suurta ammattitaitoa, kun taas piirrepohjainen- ja mallipohjainen etäohjelmointi sekä XR-applikaatiot ovat suorituskyvyiltään nopeita. XR-applikaatioiden sisältämien ominaisuuksien takia ohjelmointiin kuluva aika laskee ja tuottavuutta saadaan kasvatetuksi. (Chang et al. 2020; Ong et al. 2020, 1.) Kun käsitellään

tuottavuutta ohjelmointimenetelmän näkökulmasta, tuottavuuden kasvu perustuu myös ohjelmitavan liikeradan monimutkaisuuteen. Mitä monimutkaisempi liikerata halutaan ohjelmoida, sitä enemmän aikaa sen ohjelmointiin kuluu, minkä aikana fyysinen robotti kykenee olemaan työkäytössä. Riippuen siis ohjelmitavan liikeradan monimutkaisuudesta tuottavuuden kasvu etäohjelmointimenetelmien avulla voi kasvaa muutamista minuuteista useampiin tunteihin. Ong et al. (2020, 6) suorittivat kokeellisen testauksen, jossa hitsauspolun ohjelmointi suoritettiin AR-ohjelmointina ja online-ohjelmointina. AR-ohjelmoinnin avulla liikerata ohjelmoitiin 63 sekunnissa ja online-ohjelmointina ohjelmointi suoritettiin 347 sekunnissa. Tämän lisäksi Ong et al. (2019, 45–46) suorittivat samantyyllisen testauksen, jossa AR-ohjelmoinnin nopeus hitsauspolun määrittämisessä oli 47 sekuntia ja online-ohjelmoinnissa 434 sekuntia.

5 VR-ohjelmointimenetelmien testaus

Tämän kandidaatintyön kokeellisessa osuudessa tutkittiin kolmea eri ohjelmointimenetelmää hitsausrobotin liikeradan määrittämisessä. Pääluvun sisältö on esitetty seuraavassa järjestyksessä, ensin on kuvailtu tutkimuksen koejärjestelyt, jonka jälkeen on esitetty kokeista saadut tulokset. Hitsausrobotin liikeradan määrittäminen suoritettiin vain hyödyntämällä VR-ohjelmoinnin eri ohjelmointimenetelmiä.

5.1 Koejärjestelyt

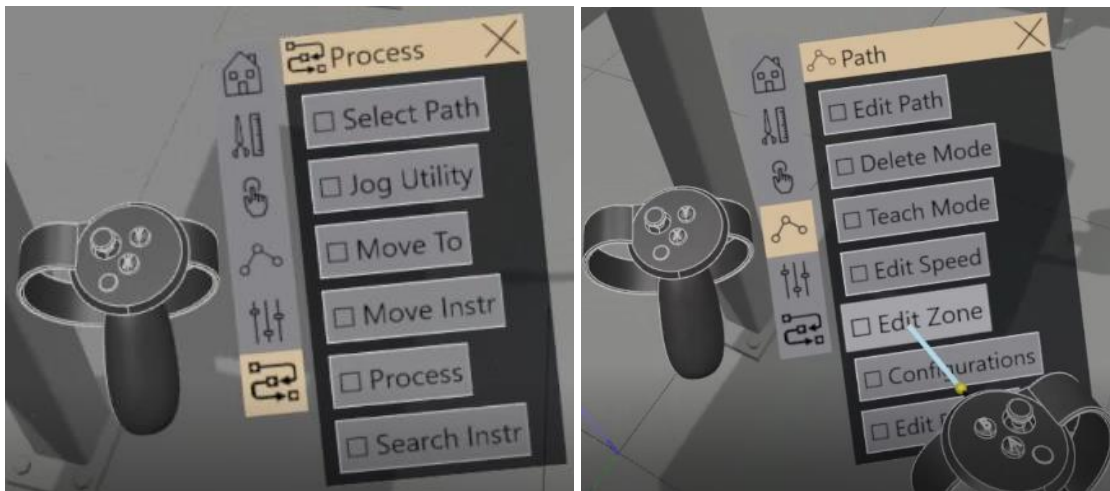
Suoritettuna kokeellisen osion tarkoituksena on testata, miten ammattitaidoton sekä täysin kokematon käyttäjä kykenee suorittamaan hitsausrobotin polun ohjelmoinnin hyödyntämällä VR-ohjelmointimenetelmiä. VR-ohjelmointimenetelmien testaus suoritettiin täysin keinotekoisessa virtuaaliodellisuusympäristössä, johon käyttäjä pääsi vain VR-laitteiden avulla. Jotta kokeellinen osio kyettiin suorittamaan, kokeen toteutuksessa käytettiin seuraavia komponentteja:

- VR-laitteisto
 - o VR-lasit (Oculus Quest 2)
 - o VR-ohjaimet
- VR-laseihin kytketty tietokone, joka sisälsi
 - o ABB RobotStudio
 - o Virtuaaliympäristön 3D-malli.

VR-ohjelmoinnin ensimmäisenä vaiheena oli luoda turva-alue. Tällä pyrittiin estämään mahdollisia tapaturmia, joita voi tapahtua virtuaaliympäristössä, esimerkiksi käyttäjän törmäys reaali maailman esineisiin. VR-ympäristön rajat luotiin piirtämällä pisteitä reaali maailmaan ohjaimien avulla. Piirretyt pisteet määrittivät alueen, jossa virtuaaliympäristö sijaitsee todellisessa ympäristössä. Mikäli määritetyn rajan ulkopuolelle astuttaisiin, käyttäjä näkisi

ainoastaan reaali maailman normaalisti virtuaalilasien kautta. Rajojen määrittäminen ehkäisi mahdollisia tapaturmia ja paransi yleisesti ottaen turvallisuutta ohjelmoinnin aikana.

Ohjelmointi suoritettiin virtuaalitodellisuudessa VR-käyttöliittymän välityksellä, mikä on esitetty kuvissa 10a ja 10b, sekä tarvittaessa liikuttamalla virtuaalirobottia. Käyttöliittymä koostui kuudesta eri valikosta, jotka sisälsivät erilaisia valittavia toimintoja. Tärkeimmät osa-alueet käyttöliittymässä olivat alla olevissa kuvissa korostetut ”Process” ja ”Path” ikkunat, jotka sisälsivät kaiken tarvittavan hitsausrobotin ohjelmointiin. VR-käyttöliittymä oli kytketty seuraamaan vasemman käden ohjaimen sijaintia ja ohjelmointikäskyjen valitseminen sekä virtuaalirobotin liikuttaminen tapahtui oikean käden ohjaimella.

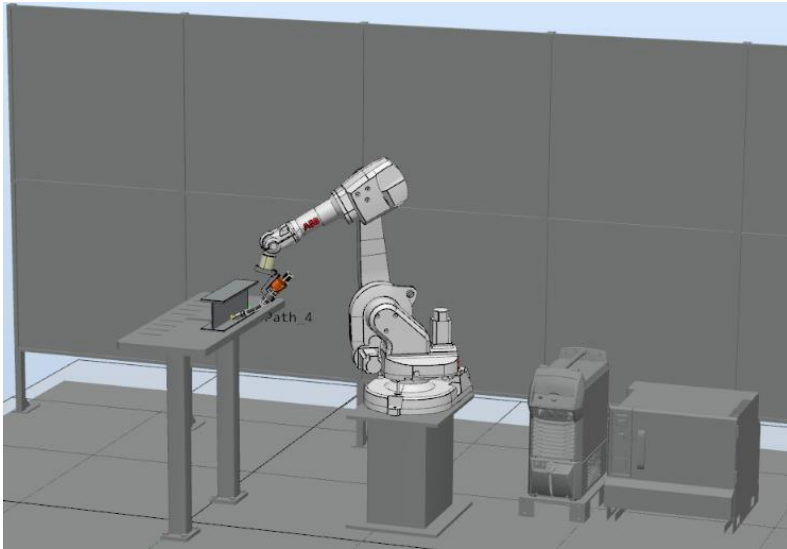


a)

b)

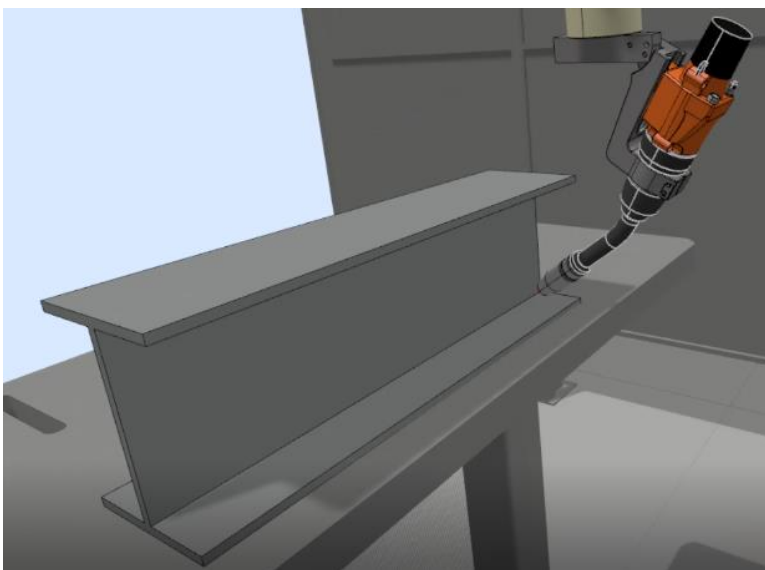
Kuva 10. VR-käyttöliittymän Process- ja Path-ikkuna

Virtuaalirobotti oli luotu oikean hitsausrobotin 3D mallista eli sen ominaisuudet, ja käyttäytyminen vastasivat fyysisen robotin ominaisuuksia. Käyttäjä ei siis kyennyt suorittamaan ohjelmointia, jos hitsattava kappale ei ollut robotin työalueella. Oikean ohjaimen avulla käyttäjä kykeni liikuttamaan robottia sen eri työkalusta sekä muuttamaan esimerkiksi hitsauspolttimen orientaatiota, joka mahdollisti hyvän luoksepäästävyuden hankalien kappaleiden hitsaukseen. Kokeellisen testauksen VR-ympäristö, joka on esitetty kuvassa 11, oli identtinen malli todelliseen LUT-yliopiston hitsauslabran työympäristöön.



Kuva 11. Kokeellisen testauksen VR-ympäristö

Hitsausrobotin polun ohjelmointi suoritettiin kuvassa 11 olevalle virtuaalirobotille kolmella eri ohjelmointimenetelmällä. Testatut ohjelmointimenetelmät hitsausrobotin polun määrittämiseksi olivat pisteestä pisteeseen -menetelmä, robottia johdattamalla -menetelmä ja automaattinen railonhakumenetelmä. Kaikki edellä mainitut ohjelmointitavat suoritettiin samalle kappaleelle sekä samalle lineaariselle hitsille, jotka ovat esitetty kuvassa 12.

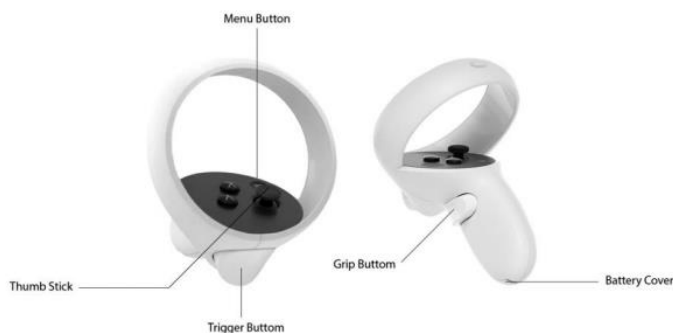


Kuva 12. Virtuaaliympäristössä hitsattavan kappaleen geometria sekä robotin hitsauspoltin.

5.2 Tulokset

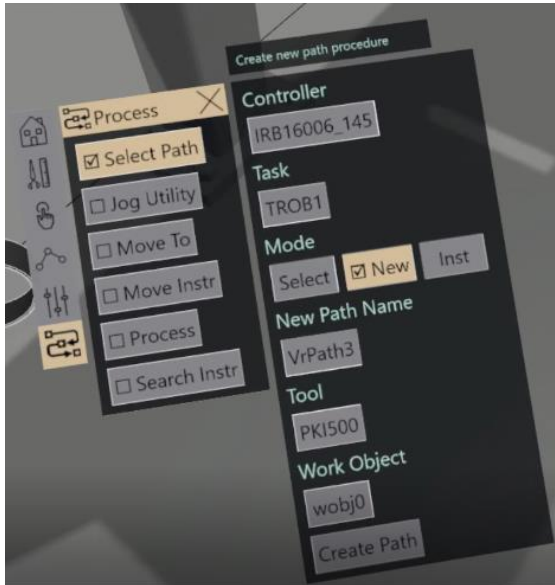
Kuten koejärjestelyt kappaleessa mainittiin, hitsausrobotin lineaarisen polun ohjelmointi suoritettiin kolmella erilaisella menetelmällä. Ensimmäisenä ohjelmoija määrittäi robotin polun pisteiden avulla, tämän jälkeen virtuaalirobottia johdatettiin railon mukaisesti ja viimeisenä ohjelmointimenetelmänä käytettiin automatisoitua railonhakumenetelmää. Ennen ohjelmoinnin aloittamista käyttäjälle annettiin mahdollisuus tutustua virtuaalitodellisuusympäristön toimintaperiaatteisiin kuten kappaleiden ja robotin fysiikkaan sekä niiden liikkuvuuteen. Tutkimuksen aluksi ohjelmoija varoi virtuaalisia objekteja ollessaan virtuaaliympäristössä. Hyvin nopeasti ohjelmoija kuitenkin tottui virtuaaliympäristöön huomattuaan, etteivät virtuaaliobjektit sisällä samoja fyysisiä ominaisuuksia kuin reaali maailman objektit.

VR-ympäristössä käyttäjä kykeni kontrolloimaan virtuaalirobottia helposti oikeassa kädessään olevan VR-ohjaimen avulla, joka on esitetty kuvassa 13. Ohjaimen ohjaussauvalla käyttäjä kykeni kontrolloimaan ohjelmoidun polun simulaationopeutta. Ohjaussauvan viereisistä X- ja Y-painikkeesta käyttäjä sai halutessaan lisäinformaatiota esimerkiksi hitsauspolttimen orientaatiosta ja polun pisteiden koordinaateista. Käytetyimmät painikkeet, joita käyttäjä tarvitsi ohjelmoinnin suorittamiseen, ovat kuvassa 13 esitetyt painikkeet ”Grip Button” sekä ”Trigger Button”. Grip-painikkeen avulla käyttäjä kykeni tarpeen tullen kontrolloimaan hitsauspolttimen orientaatiota ja trigger-painikkeen avulla poimimaan ja liikuttamaan virtuaaliobjekteja sekä määrittämään halutun polun pisteitä virtuaalitodellisuuteen.



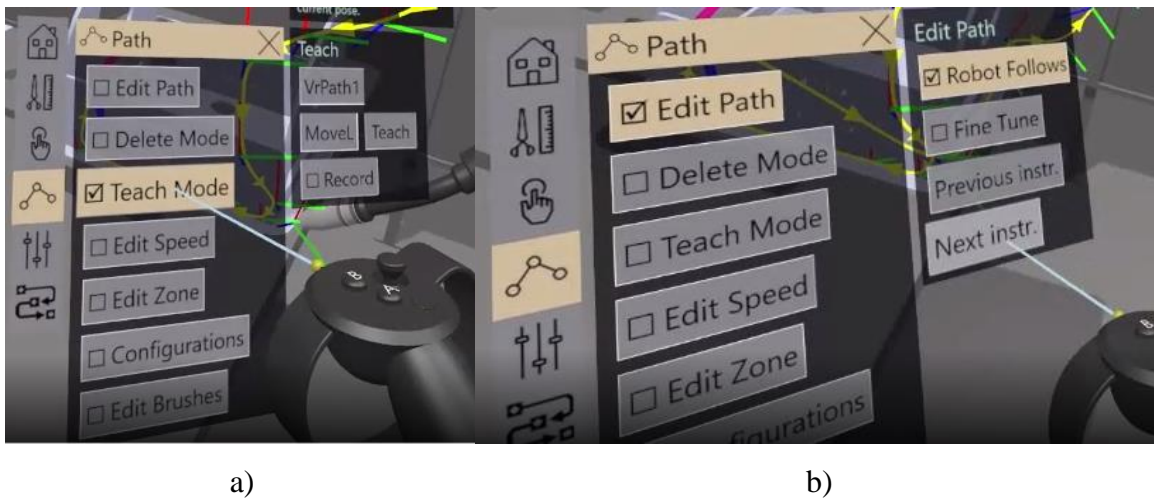
Kuva 13. VR-ohjain ja sen painikkeiden toiminnot (Organon 2021)

Hitsausrobotin ohjelmoinnin aloittamiseksi käyttäjän täytyi luoda täysin uusi polku käyttöliittymän avulla kuvan 14 mukaisesti, valitsemalla Process → Select Path → Mode → New. Edellä mainittujen komentojen suorittamisen jälkeen VR-ohjelmisto muodosti automaattisesti uuden polun, minkä jälkeen robotin liikeratojen ohjelmointi kyettiin aloittamaan.



Kuva 14. Uuden ohjelmointipolun luominen VR-käyttöliittymässä

Käyttäjä aloitti hitsausrobotin lineaarisen liikeradan ohjelmoinnin pisteestä pisteeseen -menetelmällä. Jotta käyttäjä kykeni määrittämään pisteitä virtuaalitodellisuuteen, oli hänen valittava käyttöliittymästä Path → Teach Mode kuvan 15a mukaisesti. Näiden komentojen suorituksen jälkeen oli käyttäjän valittava juuri määritetty polku sekä tyyli, miten robotin liikkeitä tulisi suorittaa. Tässä testauksessa käytettiin vain MoveL tyyliä, joka mahdollisti lineaaristen liikkeiden luomisen. Kuvattujen aloitustoimenpiteiden jälkeen käyttäjä kykeni aloittamaan ohjelmoinnin liikuttamalla robotin hitsauspoltinta haluttuun aloituskohtaan ja määrittämällä polun ensimmäisen pisteen painamalla Teach-painiketta käyttöliittymästä. Määrittääkseen polulle uusia pisteitä käyttäjän oli siirrettävä hitsauspoltinta uuteen paikkaan ja painettava Teach-painiketta. Määritetyt pisteet muodostivat polun virtuaalitodellisuuteen keltaisena viivana, eli käyttäjä kykeni hyödyntämään määritettyä polkua ohjelmoinnin aikana ja sen jälkeen.



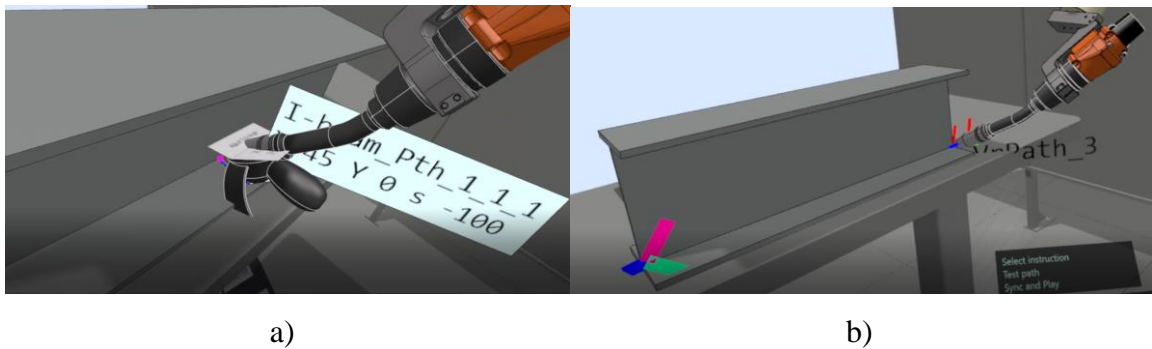
Kuva 15. VR-käyttöliittymän Path-ikkuna

Johdattamalla-ohjelmoinnin käyttäjä suoritti samasta käyttöliittymäikkunasta kuin pisteestä pisteeseen -ohjelmoinnin. Painettuana Record-painiketta VR-ohjelmisto määritteli polun hitsauspolttimen sijainnin perusteella. Ohjelmoidakseen hitsauspolku tällä menetelmällä käyttäjän oli liikutettava hitsauspolttinta haluttuihin paikkoihin ja samanaikaisesti VR-ohjelmisto määritteli polun pisteitä virtuaaliodellisuuteen. Kun käyttäjä oli tyytyväinen polun muotoon, ohjelmoinnin lopettamiseksi oli painettava vielä Record-painiketta uudestaan, minkä jälkeen ohjelmointi oli suoritettu.

Pisteestä pisteeseen -ohjelmoinnissa ja johdattamalla-ohjelmoinnissa käyttäjä kykeni polun luomisen jälkeen vielä hienosäätämään pisteiden sijaintia suorittamalla käyttöliittymässä komennot Path → Edit Path → Fine Tune, jotka ovat esitetty kuvassa 15b. Tämä mahdollistaa tarkkojen liikeratojen luomisen, joita on usein käytettävä näissä ohjelmointimenetelmissä. Koska ohjelmointimenetelmät perustuvat käyttäjän käden liikkeisiin, polun luomisen jälkeen on tyypillisesti hienosäädettävä polkua, sillä ihmisten kädet luonnollisesti värähtelevät ja saattavat aiheuttaa pieniä epätarkkuuksia.

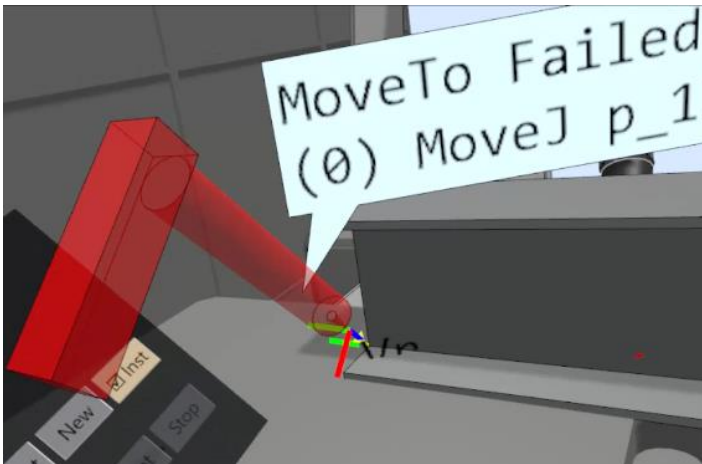
Jotta käyttäjä kykeni aloittamaan automatisoidun railonhaku -ohjelmointitavan, oli hänen valittava VR-käyttöliittymästä Process → Process, minkä jälkeen ohjelmointiprosessi käynnistyi. Todentaakseen Railon sijainnin kappaleessa oli käyttäjän asetettava ohjain railon lä-

heisyyteen ja painettava etusormella sijaitsevaa trigger-painiketta. Tämä asetti robotin hitsauspolttimen railon kohdalle kuten kuvassa 16a on esitetty. Tässä vaiheessa ohjelmointiprosessia käyttäjä kykeni määrittämään hitsauspolttimelle halutun orientaation painamalla ja pitämällä keskisormen kohdalla olevaa grip-painiketta alhaalla. Niin kauan kuin painike oli painettuna, käyttäjän käden liikkeet simuloitiin hitsauspolttimen liikkeiksi. Käyttäjän ollessa tyytyväinen hitsauspolttimen asentoon, painamalla Create process -vaihtoehtoa VR-käyttöliittymästä, saatiin hitsauspolku määritetyksi valitulle railolle, mikä on esitetty kuvassa 16b. Kun kaikki edellä mainitut toimenpiteet oli suoritettu, hitsauspolku oli ohjelmoitu kappaleen railolle. Ohjelmoitu polku voidaan joko simuloida virtuaalitodellisuudessa tai siirtää suoraan fyysiseen robottiin suoritettavaksi.



Kuva 16. Railon sijainnin todentaminen (a) ja ohjelmoidun polun visuaalinen esitys (b)

Suoritettuaan kaikki kolme edellä esiteltyä VR-ohjelmointimenetelmää, käyttäjä kokeili vielä jälkeempään mitä tapahtuisi, jos hän yrittäisi ohjelmoida hitsausrobotin polun kappaleen toiselle puolelle. Käyttäjä yritti suorittaa polun ohjelmoinnin automatisoidulla railonhaku -menetelmällä, joka on esitetty kuvassa 17. Tämä ei kuitenkaan onnistunut, sillä virtuaalirobotin työalue ei mahdollistanut kappaleen toisen puoleisen railon hitsausta. Tämä on hyvä rajoite virtuaalitodellisuusympäristössä, sillä käyttäjä ei kykene ohjelmoimaan fyysiselle robotille polkuja, joita robotti ei kykenisi suorittamaan reaali maailmassa.



Kuva 17. Epäonnistunut hitsauspolun ohjelmointi

Kaikki testatut ohjelmointitavat olivat kokonaisuudessaan helppoja suorittaa eikä polkujen ohjelmointi vienyt runsaasti aikaa. Vaikka ohjelmointi suoritettiin täysin kuvitteellisessa ympäristössä, ei ympäristön muutos reaali maailmasta täysin keinotekoiseen ympäristöön tuottanut ongelmia ohjelmointimenetelmien testauksen aikana. Testatut ohjelmointimenetelmät olivat hyvin nopeasti opittavissa eli virtuaalitodellisuudessa ohjelmointi ei vaatinut käyttäjältä aikaisempaa osaamista. VR-ohjelmointi on siis erityisesti vähemmän kokemusta omaaville käyttäjille hyvä hitsausrobotin ohjelmointitapa.

Verrattaessa testattuja ohjelmointimenetelmiä yksi näistä menetelmistä nousi kahden muun edelle lineaarisen hitsauspolun ohjelmoinnissa, kun tarkasteltiin ohjelmoinnin nopeutta ja tarkkuutta. Automatisoidun railonhakumenetelmän avulla käyttäjän täytyi vain todentaa kappaleen railon sijainti, minkä jälkeen VR-ohjelma tunnisti railon ja määrittä sille tarvittavan ohjelmointipolun. Halutessaan käyttäjä voi muuttaa hitsauspolttimen orientaatiota, simuloida ohjelmoidun polun liikerata virtuaalitodellisuudessa tai välittää suoraan fyysiseen robottiin suoritettavaksi. Koska käyttäjän ei itse tarvitse määrittää ohjelmoitavaa polkua, vältetään ohjelmoinnin aikana ylimääräisiltä viimeistelytoimenpiteiltä. Kun taas johdattamalla-ohjelmoinnissa ja pisteestä pisteeseen -ohjelmoinnissa käyttäjän on varmistettava, että ohjelmoitu polku on tarpeeksi tarkasti luotu railon kohdalle. Näissä kahdessa ohjelmointimenetelmässä syntyy helposti epätarkkuuksia, joita aiheutuu ihmisten käsien värähtelystä, joka on myös mainittu kirjallisuuskatsauksessa.

6 Pohdinta ja johtopäätökset

Tämän pääluvun tarkoituksena on esittää työstä saadut ensisijaiset tulokset tarkastelemalla kirjallisuuskatsauksen aineistoa ja kokeellisen osion tuloksia keskenään. Lisäksi pohditaan tulosten uutuusarvoa, yleistettävyyttä ja tutkimuksen luotettavuutta sekä vastataan työssä asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Tarkastelun kohteena on myös, miten kerätyn aineiston ja kokeellisen testauksen reliabiliteetti ja validiteetti varmistettiin työn aikana. Luvussa pohditaan myös mahdollisia jatkotutkimusaiheita, joita voitaisiin suorittaa tulevaisuudessa. Samalla on tarkoituksena esittää, mitä työssä ei tutkittu ja miten aihetta voisi jatkossa tutkia.

6.1 Päätulokset

Kirjallisuuskatsauksesta saatujen tulosten perustella voidaan sanoa, että hitsausroboteista on tullut tärkeä osa-alue hitsausteollisuutta ja niiden ohjelmointi on hyvin tärkeä vaihe robotin valmistuksessa. Hitsausrobottien avulla saadaan pienennetyksi työvoimakustannuksia ja parannetuksi tuotannon tehokkuutta, sillä robotti kykenee olemaan jatkuvassa työkäytössä. Lisäksi robottihitsaus parantaa hitsausteollisuuden työturvallisuutta korvaamalla fyysisesti rasittavaa käsinhitsausta robotisoidulla menetelmällä. Robottihitsaus ei kuitenkaan ole aina optimaalisin lähestymistapa, sillä ammattitaitoiset hitsaajat sopeutuvat olosuhteiden vaihteluihin robottia paremmin. Suurissa sarjamäärissä ja toistettavissa työtehtävissä robottihitsauksen käyttö on kannattavaa. (Hiltunen 2005; Kah et al. 2015, 1–3; Rout et al. 2019, 12–13.)

Ennen robotin käyttöönottoa on sille ohjelmitava tarvitut liikeradat ja ohjelmoinnin lisäksi robottihitsauksen yhteydessä on kannattavaa hyödyntää laadunvarmistusteknologiaa kuten railonseurantaa ja railonhakua. Railonseurannan avulla saadaan korvatuksi mahdollisia virheitä, joita voi tapahtua hitsaustyön aikana. Näin työtehtävien laatu pysyy korkealla tasolla robottihitsauksessa. Lisäksi robotin on tiedettävä hitsattavan railon todellinen sijainti, jotta robotti kykenee suorittamaan sille ohjelmoidut liikeradat. Railonhaku teknologia on

siten hyvin tärkeää robottihitsauksessa, sillä sen avulla hitsausrobotti voi suorittaa sen työtehtäviään.

Ennen hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointia, on syytä harkita, mitä ohjelmointimenetelmää tulisi käyttää. Online- ja etäohjelmointimenetelmän välillä on hyödyllisempää käyttää etäohjelmointia, sillä sen avulla fyysinen robotti kykenee olemaan jatkuvassa työkäytössä ja työturvallisuutta saadaan parannetuksi ohjelmoinnin aikana. Ohjelmointimenetelmän valitseminen voi siten vaikuttaa suoraan tuotannon tehokkuuteen. Tämän hetken käytetyin etäohjelmointitapa on piirreohjain ohjelmointi, minkä avulla liikeradan määrittäminen saadaan tehtyä hyvin nopeasti hyödyntäen CAD-muototietoja. Työssä tutkitut XR-applikaatiot hyödyntävät piirreohjainohjelmointia, mutta tuovat samalla lisäarvoa niiden intuitiivisuuden, helpon lähestyttävyyden ja todenmukaisuuden kautta. XR-tekniikoiden avulla ohjelmointiprosessia saadaan parannetuksi yksinkertaistamalla ja nopeuttamalla liikeradan määrittämistä.

Ong et al. (2020, 6) ja Ong et al. (2019, 45–46) suorittivat kokeelliset testaukset, missä vertailtiin AR-ohjelmoinnin nopeutta online-ohjelmoinnin nopeuteen. Online-ohjelmointi suoritettiin opetusohjaimen avulla. Ohjelmoitavan hitsausrobotin liikeradan määrittäminen oli huomattavasti helpompaa ja nopeampaa AR-ohjelmoinnilla kuin perinteisellä online-ohjelmoinnilla. AR-ohjelmoinnilla käyttäjät suorittivat liikeradan määrittämisen alle minuutissa, kun taas online-ohjelmoinnilla vastaavan liikeradan ohjelmointiin käyttäjillä meni 6–7 minuuttia.

XR-applikaatiot soveltuvat hitsausrobotin ohjelmointiin erittäin hyvin niiden sisältämien ominaisuuksien takia. Nämä uudet ohjelmointimenetelmät mahdollistavat monta erilaista lähestymistapaa robotin ohjelmointiin. Työn perustella hitsausrobotin liikeradan ohjelmointi voidaan suorittaa XR-applikaatioilla pisteestä pisteeseen -menetelmällä, robottia johdattamalla -menetelmällä ja automatisoidulla railonhaku -menetelmällä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että kaikki XR-applikaatiot voivat hyödyntää näitä ohjelmointityylejä. Alla on kuvattu VR-, AR- ja MR-ohjelmoinnin tarjoamat ohjelmointitavat taulukossa 2.

Taulukko 2: Ohjelmointitavat XR-applikaatioilla

XR-applikaatiot	Virtuaalitodellisuus (VR)	Lisätty todellisuus (AR)	Sekatodellisuus (MR)
Ohjelmointitavat	- Pisteestä pisteeseen - Johdattamalla - Automatisoitu railonhaku	- Pisteestä pisteeseen - Johdattamalla	- Pisteestä pisteeseen

Kun mietitään XR-applikaatioiden soveltuvuutta hitsausrobotin ohjelmointiin, on tärkeää verrata kyseisiä ohjelmointimenetelmiä keskenään. Työn aikana XR-applikaatioista VR-ohjelmointi osoittautui kehittyneimmäksi ohjelmointimenetelmäksi. Tähän näkökulmaan voi hyvin vaikuttaa se, että VR-ohjelmointi oli ainoa menetelmä, josta suoritettiin kokeellinen testaus. VR-laitteet ovat olleet myös markkinoilla kauemmin kuin AR- ja MR-laitteet. Tulosten perustella VR mahdollistaa monta erilaista ohjelmointitapaa liikeratojen määrittämiseen, kun taas AR ja MR tarjoavat vähemmän ohjelmointitapoja. Siitä huolimatta tämä ei tee AR- ja MR-ohjelmoinnista huonoja, sillä nämä XR-applikaatiot sisältävät omia vahvuuksia, joita VR-ohjelmointi ei välttämättä sisällä. Jatkuvan teknologian kehityksen takia etenkin AR-ohjelmointi voi lähitulevaisuudessa osoittautua paremmaksi ja suositummaksi robotin ohjelmointimenetelmäksi sen sisältämien ominaisuuksien takia. Esimerkiksi AR-ohjelmointi suoritetaan reaali maailmassa, mikä voi mahdollistaa robotin ohjelmoinnin sen työympäristössä hyödyntäen reaali maailman ja virtuaali maailman objekteja. Ohjelmointiympäristön luomiseen ei tarvitse käyttää yhtä paljon aikaa, jos ohjelmointi suoritetaan AR-ohjelmointina.

6.2 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

Tässä kandidaatintyössä saavutettiin kaikki sille asetetut tavoitteet ja vastattiin työn alussa esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Ensimmäisen tutkimuskysymyksen tarkoituksena oli saada selville miksi VR-, AR- ja MR-teknologioita kannattaa käyttää hitsausrobottien ohjelmoinnissa. Näiden teknologioiden käyttäminen hitsausrobotin liikeradan ohjelmoinnissa mahdollistavat nopean ja yksinkertaisen ohjelmoinnin niiden sisältämien ominaisuuksien takia. XR-applikaatiot hyödyntävät ihmisille intuitiivisia tapoja ohjelmoida robotin liikeradat,

minkä takia ohjelmoija ei tarvitse suurta ennen aikaista kokemusta määrittääkseen robotin liikeradat.

Toisen tutkimuskysymyksen tarkoituksena oli selvittää, miten robotin liikeradan ohjelmointi suoritetaan XR-ohjelmointityökaluilla. Kaikki XR-applikaatiot eivät kykene hyödyntämään samoja ohjelmointityylejä keskenään, sillä esimerkiksi VR-ohjelmointi on kehittyneempi verrattaessa sitä AR- ja MR-ohjelmointiin. Tämän työn kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen testauksen perusteella VR-ohjelmoinnilla hitsausrobotin liikeradan määrittäminen voidaan suorittaa pisteestä pisteeseen -menetelmällä, robottia johdattamalla -menetelmällä ja automaattisella railonhaku -menetelmällä. AR-ohjelmoinnilla hitsausrobotin ohjelmointi voidaan suorittaa pisteestä pisteeseen -menetelmällä ja robottia johdattamalla -menetelmällä. MR-ohjelmoinnilla robotin ohjelmointi voidaan suorittaa hyödyntäen pisteestä pisteeseen -menetelmää.

Kolmannen tutkimuskysymyksen tarkoituksena oli saada vastaus siihen, miten ohjelmointimenetelmän valitseminen vaikuttaa hitsausteollisuuden tuottavuuteen. Valitsemalla nopea ja yksinkertainen ohjelmointimenetelmä saadaan tuotannon tehokkuutta kasvatetuksi, sillä ohjelmointiin kuluva aika vähenee. Tämän lisäksi valitsemalla etäohjelmointimenetelmä online-ohjelmointimenetelmän sijaan saadaan tuottavuutta parannettua, sillä fyysinen robotti kykenee olemaan jatkuvassa työkäytössä ohjelmoinnin aikana. XR-applikaatioiden avulla saadaan siis tuotannon tehokkuutta kasvatettua, sillä näiden ohjelmointityökalujen avulla ohjelmointiin kuluva aika saadaan vähennettyä ja ne toimivat etäohjelmointimenetelminä. Kappaleessa 4.2 hitsausrobotin liikeradan ohjelmointiin kuluva aika on vertailtu AR- ja online-ohjelmoinnilla.

6.3 Tulosten uutuusarvo ja yleistettävyys

XR-applikaatioiden hyödyntämisestä robotin ohjelmoinnissa on tehty useita erilaisia tutkielmia. Yleisesti ottaen aiheesta tehdyt tieteelliset tutkielmat ovat tutkineet XR-applikaatioiden hyödyntämistä teollisuusrobottien ohjelmoinnissa eikä niinkään hitsausrobottien ohjelmoin-

nissa. Tämä voi johtua siitä, että teollisuusrobotin ohjelmointia voidaan soveltaa moniin eri teollisuuden aloihin, jolloin on kannattavampaa tutkia aihetta laajemmasta näkökulmasta. Toisaalta myös hitsausrobotin ohjelmointia koskevat tutkielmat käsittelevät erilaisten liikeratojen ohjelmointia, mutta eivät välttämättä lineaarista ohjelmointia, jota tutkitaan tässä työssä.

Työstä saadut tulokset ovat pääsääntöisesti yleistettävissä. Suurin tekijä, joka saattaa vaikuttaa tulosten yleistettävyyteen on, mitä VR-laitetta käytetään kokeellisen testauksen aikana. Suorittamalla kokeellinen testaus eri VR-laitteella kuin tässä työssä, saadaan tuloksista hyvin todennäköisesti hieman erilaisia. Koska VR-laitteiden käyttöliittymät eroavat toisistaan, tämän työn kokeellinen osio ei ole täsmälleen toistettavissa eri VR-laitteella. Suorittamalla hitsausrobotin liikeradan ohjelmointi Oculus Quest 2 VR-laseilla on työstä saadut tulokset täysin toistettavissa.

6.4 Tutkimuksen luotettavuus

Työn kirjallisuuskatsauksen reliabiliteetti varmistettiin käyttämällä pääsääntöisesti tieteellisiä lähteitä aineiston hakemiseen. Työssä hyödynnettiin 29 eri tieteellistä lähdettä ja 11 verkkojulkaisua. Tutkittujen lähteiden tekijät olivat yleisesti ottaen alan asiantuntijoita työn eri aihepiireistä ja hyödyntämällä heidän tutkielmiansa pyrittiin vastaamaan työssä esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Samanaikaisesti haluttiin luoda objektiivinen näkökulma hitsausrobotin ohjelmoinnista XR-aplikaatioiden avulla. Kirjallisuuskatsauksen aineiston keräämisessä pyrittiin käyttämään mahdollisimman uusia lähteitä etenkin, kun käsiteltiin XR-aplikaatioita hitsausrobotin ohjelmoinnissa. Vaikka työn aineisto koostui monesta eri tieteellisestä lähteestä, jotka käsitelivät pääsääntöisesti teollisuusrobotin ohjelmointia, kyettiin kerätty tieto liittämään helposti hitsausrobotin ohjelmointiin. Käytetyt tutkielmat ja verkkojulkaisut täydensivät sekä varmensivat toisiaan. Niiden pohjalta saatiin tehdyksi luotettava tutkielma.

Työn kokeellisessa osiossa hitsausrobotin liikerata määritettiin kolmella eri menetelmällä. Tämän avulla pyrittiin varmistamaan VR-ohjelmoinnin soveltuminen hitsausrobotin ohjelmointiin. Kokonaisuudessaan työn kokeellinen testaus suoritettiin kuitenkin vain yhdessä istunnossa. Testauksen suorittaminen olisi voitu tehdä useampaan otteeseen, jotta olisi saatu varmistetuksi tuloksien reliabiliteetti ja validiteetti. Työn kokeellisen osion testauksen ollessa hyvin yksinkertainen, ei sitä ollut syytä toistaa useampaan kertaan.

Kokeellisesta testauksesta saadut tulokset osoittautuivat hyvin samalle linjalle, mitä kirjallisuuskatsauksen perusteella ilmeni VR-ohjelmointiin liittyen. Esimerkiksi Chang et al. (2020) tulivat siihen tulokseen, että VR-ohjelmointi mahdollistaa kokemattomalle ohjelmoijalle helpon ja yksinkertaisen tavan määrittää robotin liikeradat. Tämän lisäksi ohjelmointitavat, joita voidaan käyttää VR-ympäristössä, yhteensopivat kirjallisuuskatsauksesta saatuihin tietoihin. Kokeellisesta testauksesta saatiin myös täysin uutta tietoa, jota ei esiintynyt tutkituissa tutkielmissa kuten automatisoitu railonhaku -menetelmä liikeradan ohjelmointiin. Tämän ohjelmointimenetelmän avulla ohjelmoijan käden liikkeen ja värinän aiheuttamat epätarkkuudet voidaan välttää.

6.5 Jatkotutkimusaiheet

Tässä kandidaatintyössä kerättiin tietoa eri XR-applikaatioiden tarjoamista ohjelmointimenetelmistä ja siitä, miten hitsausrobotin ohjelmointi voidaan suorittaa näiden teknologioiden avulla. Aiheen laajuuden vuoksi tässä työssä suoritettiin kokeellinen osio vain virtuaalitoiminnan avulla. Eri ohjelmointimenetelmien tasapuolinen tutkiminen olisi ollut aiheena liian laaja. Tässä työssä keskitytään enemmän VR-ohjelmointiin kuin AR- ja MR-ohjelmointiin. Jatkotutkimuksena voitaisiin siis tutkia AR- tai MR-ohjelmointia tarkemmin sekä suorittaa siitä kokeellinen testaus.

Myös VR-ohjelmoinnin hyödyntämisestä voisi tehdä jatkotutkimuksen, jossa robotin liikeradan ohjelmointi suoritetaan erilaisille kappaleille. Koska työ käsitteli vain lineaarisen liikeradan ohjelmointia, aihetta voisi jatkojalostaa ohjelmoimalla liikeratoja geometrisesti vaa-

tivimmille kappaleille. Tämän avulla saataisiin parempi näkökulma, miten VR-ohjelmointi oikeasti soveltuisi hitsausrobotin ohjelmointiin.

Pelkän hitsausrobotin ohjelmoinnin lisäksi olisi olennaista tarkastella ohjelmoitujen liikeratojen testausta todellisessa robotissa ja mahdollisesti kappaleiden hitsauksessa. Työstä voisi tehdä jatkotutkimuksen, jossa testataan ohjelmoitujen liikeratojen tarkkuutta hitsauksessa. Tämän avulla saataisiin todellisia tuloksia siitä, miten XR-applikaatiot oikeasti soveltuisivat hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointiin.

7 Yhteenveto

Tämä kandidaatintyö tehtiin LUT-yliopiston hitsaustekniikan laboratoriolle, jotta saataisiin koottua ajankohtaista tietoa uusista hitsausrobotin ohjelmointimenetelmistä. Työn tavoitteena oli käsitellä hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointia XR-applikaatioilla. Työssä pyrittiin vastaamaan, miten robotin ohjelmointivaihe voidaan suorittaa hyödyntäen uutta teknologiaa ja saavutetaanko uuden teknologian käyttämisellä parempia tuloksia yleisimpiin ohjelmointimenetelmiin verrattuna. Työssä suoritettiin kirjallisuuskatsaus robottihitsauksesta ja robotin ohjelmoinnista XR-applikaatioilla. Tämän lisäksi tehtiin kokeellinen testaus siitä, miten VR-ohjelmointi soveltuu hitsausrobotin liikeratojen ohjelmointiin.

Työn alussa esitetty kirjallisuuskatsaus käsitteli robottihitsausta, siihen liittyvää turvallisuutta ja robotin toimintaan liittyviä konenäkömenetelmiä. Tämän jälkeen esiteltiin hitsausrobotin ohjelmoinnin osaryhmät, joiden avulla johdatettiin työ XR-applikaatioiden käsittelemiseen. Hitsausrobotin ohjelmointia tutkittiin VR-, AR- ja MR-todellisuuden näkökulmista sekä käsiteltiin miten näihin liittyvät ohjelmointiympäristöt eroavat toisistaan. Jälkeenpäin XR-applikaatioista koostettiin lyhyt yhteenveto ja taulukko, jossa kuvattiin ohjelmointimenetelmän vahvuudet ja heikkoudet. Kirjallisuuskatsauksen lopussa käsiteltiin robottihitsauksen tuottavuutta ja valitun ohjelmointimenetelmän vaikutusta tuottavuuteen. Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan päätellä, että XR-applikaatioilla saadaan yksinkertaistettua ohjelmointia ja tehostettua hitsausteollisuuden tuottavuutta.

Työn kokeellisen osion alussa esiteltiin suoritettavat koejärjestelyt, joiden avulla kokeellinen testaus kyettiin toteuttamaan. Kokeellisessa osiossa hitsausrobotin lineaarisen liikeradan ohjelmointi suoritettiin VR-ohjelmoinnilla. Kokeessa ohjelmointi tehtiin kolmella eri tavalla: pisteestä pisteeseen -menetelmällä, robottia johdattamalla -menetelmällä ja automatisoidulla railonhaku -menetelmällä. Kaikki ohjelmointitavat osoittautuivat hyvin yksinkertaisiksi ja liikeratojen määrittäminen oli helppoa. Saatujen tulosten perusteella automaattinen railonhaku -menetelmä osoittautui nopeimmaksi ohjelmointityyliksi silloin, kun liikeradasta haluttiin mahdollisimman tarkka.

Lähteet

Alizadehsalehi, S., Hadavi, A., & Huang, J. C. 2020. From BIM to extended reality in AEC industry. *Automation in Construction*, Vol. 116. pp. 103254.

BackMarket 2022. [www-tuotedokumentti]. Viitattu [Viitattu 24.3.2022]. Saatavissa: <https://www.backmarket.fi/microsoft-hololens-vr-lasit-virtuaalitodellisuus-harmaa-kaytetty/316525.html>

Bogue, R. 2020. The role of augmented reality in robotics. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, Vol. 47, Iss. 6. pp. 789-794.

Bolano, G., Roennau, A., Dillmann, R., & Groz, A. 2020. Virtual reality for offline programming of robotic applications with online teaching methods. Paper presented at the 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), pp. 625-630.

Burghardt, A., Szybicki, D., Gierlak, P., Kurc, K., Pietruś, P., & Cygan, R. 2020. Programming of Industrial Robots Using Virtual Reality and Digital Twins. *Applied Sciences*, Vol. 10, Iss 2. pp. 486.

Chandankar, B. 2016. Productivity Improvement in Welding Robot. *Inpressco*, pp. 251-254.

Chang, Y., Devine, K., & Klitzing, G. 2021. Using Virtual Reality for Industrial Robot Programming: A Preliminary Study. *Journal of Engineering Technology*, Vol. 38, Iss. 1. pp. 34-44.

Craig E. 2022. Oculus Rift S Gone – The End of PC only VR Headsets? [www-tuotedokumentti]. Päivitetty 28.9.2020. [Viitattu 27.2.2022]. Saatavissa: <https://www.digitalbodies.net/vr-news/oculus-rift-s-gone-the-end-of-pc-only-vr-headsets/>

Delfoi. Robottien etäohjelmointi. [Delfoi www-sivuilla]. [Viitattu 21.4.2022]. Saatavissa: https://www.delfoi.com/fi/delfoi-robotics/robotiikka/?gclid=Cj0KCQjwgYSTBhDKARIsAB8KukumMxaoHBSBA13MllwOAKW3Fb7WfsgjkQOZYQiFScL8yNVTK5-SF14aA-oksEALw_wcB

Doolani, S., Wessels, C., Kanal, V., Sevastopoulos, C., Jaiswal, A., Nambiappan, H., & Makedon, F. 2020. A Review of Extended Reality (XR) Technologies for Manufacturing Training. *Technologies (Basel)*, Vol. 8, Iss. 77. pp. 77.

Fennel, M., Zea, A., Mangler, J., Roennau, A., & Hanebeck, U. D. 2022. Haptic Rendering of Arbitrary Serial Manipulators for Robot Programming. *IEEE Control Systems Letters*, Vol. 6. pp. 716-721.

Gadre, S. Y., Rosen, E., Chien, G., Phillips, E., Tellex, S., & Konidaris, G. 2019. End-user robot programming using mixed reality. Paper presented at the 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 2707-2713.

Gestalt Robotics 2019. Augmented Reality & Spatial Interaction. [Gestalt Robotics www-sivuilla]. [Viitattu 1.3.2022]. Saatavissa: <https://www.gestalt-robotics.com/technology-modules/augmented-reality>

Gestalt Robotics 2018. Human Robot Collaboration. [Gestalt Robotics www-sivuilla]. [Viitattu 1.3.2022]. Saatavissa: <https://www.gestalt-robotics.com/en/adaptive-assistance-systems>

Hiltunen E. 2005. Hitsauksen automatisointimahdollisuuksien huomiointi. [verkkodokumentti]. [Viitattu 25.3.2022]. Saatavissa: http://webd.savonia.fi/projektit/markkinointi/HIT/users/materials/commonmaterial/seminars/Hitsaustekniikkaa_suunnittelijoille/2005-09-27_Hitsauksen_automatisointi_Esa_Hiltunen.pdf

Hiltunen E., Purhonen T. 2008. Robottihitsauksen laatu-monen tekijän summa [verkkodokumentti]. [Viitattu 28.2.2022]. Saatavissa: http://www.shy-hitsaus.net/portals/shy/iBooklet/2008/HT_4_08/files/assets/basic-html/page36.html

Hohn, RE, & Holmes, JG. 1982. "Robotic arc welding – adding science to the art", in Robots VI. Michigan: Detroit.

InstaVR Inc. 2015. How to Make and Play HTC Vive Apps [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 27.2.2022]. Saatavissa: <https://www.instavr.co/articles/general/how-to-make-and-play-htc-vive-apps>

Kah, P., Shrestha, M., Hiltunen, E., & Martikainen, J. 2015. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, Vol. 10, Iss. 1. pp. 1-16.

Kemppi Oy. 2022. Robotic welding [Kemppi www-sivuilla]. [Viitattu 25.2.2022]. Saatavissa: <https://www.kemppi.com/en-US/support/welding-abc/robotic-welding/#5ca5961c>

Laiping, C. Shanben and L. Tao, 2005. "The modeling of welding pool surface reflectance of aluminum alloy pulse GTAW," Materials Science and Engineering: A, Vol. 394, Iss. 1. pp. 320–326.

Lin, W. & Luo, H. 2015. Robotic Welding. Teoksessa: Nee, A. Y. C. 2015. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. Springer London. pp. 2403-2443

Makhataeva, Z., & Varol, H. 2020. Augmented Reality for Robotics: A Review. Robotics (Basel), Vol. 9, Iss. 2. pp. 21.

Mealy, P. 2018. Virtual & augmented reality for dummies. John Wiley and Sons, Inc.

Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Panopoulos, N. 2022. Closed-Loop Robotic Arm Manipulation Based on Mixed Reality, Vol. 12, Iss. 2972. pp. 2972.

Neto, P., Mendes, N., Araújo, R., Pires, J. N., & Moreira, A. P. 2012. High-level robot programming based on CAD: dealing with unpredictable environments, Vol. 39, Iss. 3. pp. 294-303.

Neves, J., Serrario, D., & Pires, J. N. 2018. Application of mixed reality in robot manipulator programming. Industrial Robot, Vol. 45, Iss. 6. pp. 784-793.

Ong, S. K., Nee, A. Y. C., Yew, A. W. W., & Thanigaivel, N. K. 2019. AR-assisted robot welding programming. Advances in Manufacturing, Vol. 8, Iss. 1. pp. 40-48.

Ong, S. K., Yew, A. W. W., Thanigaivel, N. K., & Nee, A. Y. C. 2020. Augmented reality-assisted robot programming system for industrial applications. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 61. pp. 101820.

Organon 2021. 3D Organon VR Anatomy User Manual for Oculus Quest 1 & 2. [verkkodokumentti]. [Viitattu 2.4.2022]. Saatavissa: <https://www.3dorganon.com/wp-content/uploads/2021/04/3D-Organon-VR-Anatomy-for-Standalone-VR-User-Manual.pdf>

Ostanin, M., & Klimchik, A. 2018. Interactive robot programming using mixed reality. IFAC-PapersOnLine, Vol. 51, Iss. 22. pp. 50-55.

Papakostas, C., Troussas, C., Krouska, A., & Sgouropoulou, C. 2021. User acceptance of augmented reality welding simulator in engineering training. Education and Information Technologies, Vol. 27, Iss. 1. pp. 791-817.

Q. Wang, W. Jiao, R. Yu, M. T. Johnson, & Y. Zhang. 2020. Virtual Reality Robot-Assisted Welding Based on Human Intention Recognition, Vol. 17, Iss. 2. pp. 799-808.

Rout, A., Deepak, B. B. V. L., & Biswal, B. B. 2019. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 56. pp. 12-37.

Simon, M. 2017. Want to Really Teach a Robot? Command it With VR [verkkodokumentti]. [Viitattu 28.2.2022]. Saatavissa: <https://www.wired.com/story/embodied-intelligence-want-to-really-teach-a-robot-command-it-with-vr/>

Thoo, Y. J., Maceiras, J., Abbet, P., Racca, M., Girgin, H., & Calinon, S. 2021. Online and Offline Robot Programming via Augmented Reality Workspaces. arXiv Preprint arXiv:2107.01884,

Villani, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C., & Fantuzzi, C. 2018. Survey on human-robot interaction for robot programming in industrial applications. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, Iss. 11. pp. 66-71.

Wohlgenannt Isabell, Simons, A., & Stieglitz, S. 2020. Virtual Reality. *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 62, Iss. 5. pp. 455-461.

Wonsick, M., & Padir, T. 2020. A Systematic Review of Virtual Reality Interfaces for Controlling and Interacting with Robots, Vol. 10, Iss. 9051. pp. 9051.

Zou, Y., Chen, T., Chen, X., & Li, J. 2022. Robotic seam tracking system combining convolution filter and deep reinforcement learning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 165. pp. 108372.