



ETÄTEKNOLOGIOIDEN KÄYTÖN MAHDOLLISTAMINEN ROBOTTIHITSAUKSESSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Tekijä: Juuso Ylinen

Tarkastaja(t): Tutkijatohtori Sakari Penttilä

Nuorempi tutkija Hannu Lund

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Juuso Ylinen

Etäteknologioiden käytön mahdollistaminen robottihitsauksessa

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

43 sivua, 5 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja(t): Tutkijatohtori Sakari Penttilä ja Nuorempi tutkija Hannu Lund

Avainsanat: Industry 4.0, IoT, etäkäyttö, CPS, VR, virtuaalimaailma

Hitsausteollisuuden viimeisimpänä suurena kehitystrendinä on ollut automatisoinnin ja robotiikan lisääntyminen prosessien suorittamisessa. Tämä on seurausta neljännen teollisen vallankumouksen (I4.0) aloittamasta maailman digitalisoitumisesta ja kuluttajien vaatimusten muuttumisesta. I4.0:n yksi paradigmaista on Esineiden Internet (IoT), jonka myötä tuotantoprosesseja siirretään verkkoon ja niitä pystytään hallitsemaan uusilla tavoilla.

Tämän muutoksen ja vuonna 2020 alkaneen koronapandemian myötä, on alettu miettimään, onko töitä mahdollista suorittaa olematta fyysisesti paikan päällä. Tässä työssä selvitetään millaiset teknologiat mahdollistavat hitsausrobottien etäkäytön ja mitä kaikkea etäkäytön avulla voidaan tehdä ja saavuttaa. Työn tavoitteena on kehittää tuotekehityspolku, jonka avulla voidaan luoda laadukas pohja etäkäyttöön siirtymistä varten.

Etäkäytön mahdollistavat teknologiat ovat hyvin pitkälti samoja mitä IoT prosesseilta vaatii. Käyttäjälle on luotava prosessista etänä samankaltainen käsitys minkä hän saisi olemalla paikan päällä. Tämä vaatii laadukkaat tiedonhankintamenetelmät, reaaliaikaiset ja luotettavat viestintäyhteydet sekä tehokkaat datan analysointi ja käsittely menetelmät. Näiden avulla voidaan luoda yritykselle heidän tarpeitaan vastaava etäkäyttöohjelmisto, jossa voidaan hyödyntää niin virtuaalimaailman työkaluja, kuin erilaisia tietokoneelle luotavia applikaatioita. Kehityksen myötä työntekijöiden työolot kehittyvät, hitsauksen imago työnä parantuu, tuotteiden laatu kehittyy ja pystytään välttämään turhaa liikkumista työn perässä erilaisissa tehtävissä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Juuso Ylinen

Enabling the use of remote technologies in robotic welding

Bachelor's thesis

2022

43 pages, 5 figures and 2 tables

Examiners: Postdoctoral researcher Sakari Penttilä and Junior researcher Hannu Lund

Keywords: Industry 4.0, IoT, remote use, CPS, VR, virtual reality

Latest large improvement in welding industry has been the rise of automation and robotics in process execution. This is due to the fourth industrial revolution (I4.0) which has started worldwide digitalization and a change in consumer habits. One of the paradigms in I4.0 is so called Internet of Things (IoT). It has led to moving the industry processes online and that has created changes in the process control and use.

This change and the Covid-19 pandemic have changed the working routines in different fields of work. Traditional on-the-spot jobs such as different industries have started questioning the significance of remote working. The goal of this bachelor's thesis is to realize the technologies that allows the remote use of welding robots and to find out the main goals of using these and what they can accomplish.

Remote use utilizes the same technologies as IoT. Remote use requires that users should gain the same impressions about the process remotely that they could achieve while working on-the-spot. This uses good-quality data collection methods, real-time and reliable communication and data transmission technologies, efficient and powerful data analyzing as well as handling methods. With these technologies it is possible to create a remote solution to match the companies interests which can utilize virtual reality tools or some computer applications. The evolution of working principles grants better working environments, raises the image of the welding industry, product quality improves, and unnecessary traveling can be reduced. These results in large savings and helps workers to perform better in the job.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

AR	Lisätty todellisuus (Augmented Reality)
ARWP	AR-avustettu robotin ohjelmointi menetelmä (Augmented Reality assisted robot welding task programming)
CMMS	Huollonohjaus järjestelmä (Computerized Maintenance Management System)
CPS	Kyber-fysikaalinen systeemi (Cyber-Physical-System)
D2D	Laitteiden välinen (Device-to-Device)
D2E	Laitteen ja kaiken muun välinen (Device-to-Everything)
DT	Digitaalinen kaksonen (Digital Twin)
eMBB	enhanced Mobile Broadband
HMD	Silmikkonäyttö (Head-Mounted-Display)
HRC	Ihmisen ja robotin välinen yhteistyö (Human-Robot-Collaboration)
HRI	Ihmisen ja robotin välinen kanssakäyminen (Human-Robot-Interaction)
I4.0	Neljäs teollinen vallankumous (Industry 4.0)
ICT	Tieto- ja viestintätekniologia (Information and Communication Technology)
IF	vaikuttavuuskerroin (Impact Factor)
IIoT	Teollinen esineiden Internet (Industrial Internet of Things)
IoT	Esineiden Internet (Internet of Things)
LPWA	Low-Power-Wide-Area
M2M	Koneiden välinen (Machine-to-Machine)
mMTC	massive Machine Type Communication
MR	Yhdistetty todellisuus (Mixed Reality)

MRO	Kunnossapito (Machine, Repair, Overhaul)
NFC	Near-Field Communication
PLC	Ohjelmoitava logiikka (Programmable Logic Controller)
RFID	Radiotaajuinen etätunnistus (Radio Frequency Identification)
RT	Reaaliaikainen (Real-Time)
RUL	Jäljellä oleva käyttöaika (Remaining Useful Life)
URLLC	Ultra-reliable low-latency communication
VR	Virtuaalitodellisuus (Virtual Reality)
WLAN	Langaton lähiverkko (Wireless Local Area Network)
WSN	Langaton sensoriverkko (Wireless Sensor Network)
XR	Laajennettu todellisuus (eXtended Reality)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

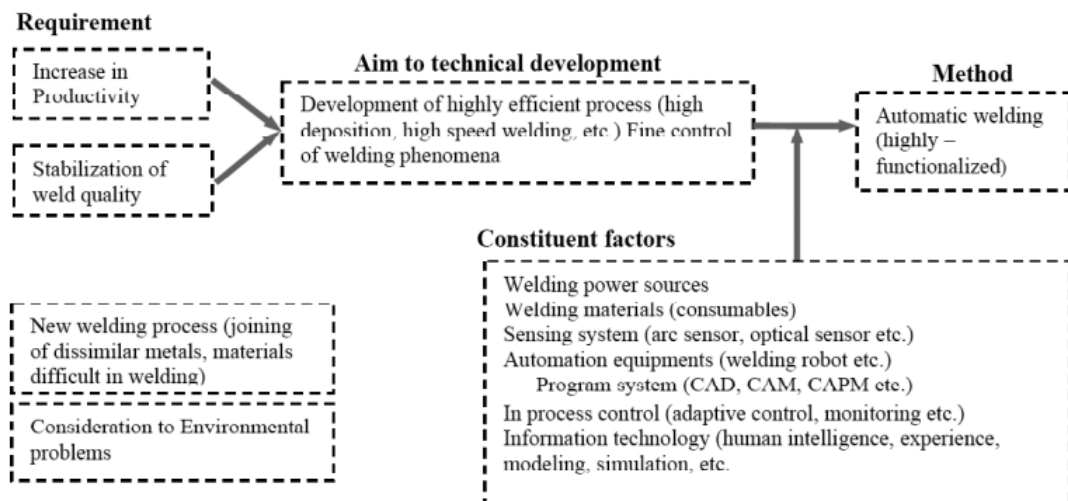
Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
1.1	Tutkimusongelma.....	8
1.2	Työn tutkimuskysymykset, tavoitteet ja rajaus	9
1.3	Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen rakenne	9
2	Robottihitsaus ja I4.0.....	10
2.1	IoT robottihitsauksessa.....	10
2.2	Hitsausteollisuuden kehittyminen	12
2.3	Hitsausrobotti	12
3	Etäkäytön mahdollistavat tekniikat	14
3.1	IoT:n tieto- ja viestintäteknologia	15
3.2	Etäkäyttö mahdollisuudet.....	19
3.2.1	Etävalvonta ja -kontrollointi	20
3.2.2	Jatkuva ja ennakoiva huolto.....	20
3.2.3	Etäohjaus.....	21
4	Etäkäytön hyödyntäminen	23
4.1	Prosessin hallinta- ja valvontamenetelmät	24
4.2	Laajennettu todellisuus XR	26
4.2.1	Robotin ohjelmointi ja prosessin testaus	27
4.2.2	Ohjaus	29
4.2.3	Huolto	31
5	Etäkäytön käyttöönoton vaiheet	33
6	Pohdinta.....	35
7	Johtopäätökset	37
	Lähteet	38

1 Johdanto

Hitsausteollisuudessa automaation lisääminen on yksi viimeaikojen tärkeimmistä kehityskohteista. Automaatiolla saavutetaan tehokkaamman tuotannon lisäksi myös hitsaajien työolojen kohentumista, työturvallisuuden lisääntymistä ja työympäristöjen paranemista. Automatisointi ja robotisointi ovat saavuttamassa vankkaa asemaa tuottavuuden ja tasalaatuisuuden tuottajina hitsauksessa. (Farkas 2018, 4) Hitsattavien materiaalien kehittyessä ja muutuessa, älykkäiltä roboteilta vaaditaan entistä enemmän sopeutumiskykyä tasaisen hitsauslaadun varmistamiseksi. Hitsaustekniikka sisältää runsaasti erilaisia muuttujia ja sitä myöten asettaa tekniikalle runsaasti teknisiä vaatimuksia näiden havaitsemiseksi. Kuva 1 esittää mitä vaatimuksia automatisoinnille asetetaan, millaista teknistä kehitystä se vaatii ja mitä muuttujia kehityksessä tulee ottaa huomioon. (Kah & Martikainen 2012, 195–196) Talouden ja ympäristön kannalta prosessien ja tuotannon simuloimisen käyttäminen ja prosessien reaaliaikainen valvominen on siis yhä tärkeämpää. Tämä herättää myös kysymyksen siitä, onko nykyinen työskentelytapa enää toimivin ratkaisu näiden vaatimusten täyttämiseksi.



Kuva 1. Automatisoinnin tavoitteet ja vaatimukset hitsausteollisuudessa. (Kah & Martikainen 2012)

Tekninen kehitys ja digitalisaatio on edennyt siihen pisteeseen, että monet nykyisistä tuotantoprosesseista olisivat pääasiassa suoritettavissa etäteknologioiden avulla. Etäteknologioiden käyttöönottoa puoltaa vuonna 2020 alkanut koronapandemia, joka sai monet alat muuttamaan työskentelytapojaan pysyvästi ja nopeasti (Wang et al. 2021, 17–18). Monet teollisuuden alat kuten perinteisten hitsausprosessien suorittaminen vaatii edelleen hitsaajan läsnäoloa. Robotisoidun hitsauksen jatkuva yleistymisen on lisännyt tutkimuskiinnostusta siitä, kuinka välttämätöntä ihmisen läsnäolo on ja kuinka siitä irtautumista voitaisiin edistää. Hitsausrobottien ollessa korkean teknologian laitteita, vaativat ne käytössään runsaasti korkeakoulutettujen asiantuntijoiden apua. Etäteknologioiden avulla asiantuntijat pystyvät seuraamaan robottien kuntoa ja toimintaa etäältä, minkä avulla voidaan suorittaa ennaltaehkäiseviä huoltoja ennen vikojen ilmaantumista.

Vuonna 2015 teollisuuteen myytiin vuoden aikana robotteja kansainvälisen robottijärjestön IFR:n mukaan lähes 254 000 kappaletta ja vuonna 2018 luku saavutti jo 400 000 myydyin kappaleen rajapyykin (IFR, 2021). Tämä asettaa etäteknologioiden käytölle haasteita teknologioiden erilaisuuden vuoksi. Tämä johtaa siihen, että on hyvin vaikea luoda ratkaisua, joka mahdollistaisi niiden käytön jokaisessa laitteessa. Tämän vuoksi olisi hyvä selvittää, millaiset teknologiat mahdollistavat etäteknologioiden käytön, sekä mihin erilaisiin työtehtäviin robottihitsauksessa niitä voitaisiin hyödyntää.

1.1 Tutkimusongelma

Nopea teknologian kehitys, digitalisaatio ja vuonna 2020 alkaneen koronapandemian aiheuttama muutos työskentelytottumuksiin on lisännyt kiinnostusta teollisuuden prosesseihin etäkäyttömahdollisuuksien selvittämiseen. Teollisuudessa tapahtunut automaation ja robotisoinnin lisääntyminen on jo muuttanut aloja modernimpaan suuntaan, sekä herättänyt tutkimuskiinnostusta teollisuusprosessien etäkäytön mahdollistamiseksi. Tutkimusongelmana on näiden etäkäyttö mahdollisuuksien selvittäminen ja niiden teknologisten vaatimusten tutkiminen hitsausrobotiikassa. Hitsaustekniikan ollessa hyvin poikkeava vaatimuksiltaan muista teollisuusprosesseista, on tehtävä kattava selvitys vaadituista teknologioista ja niiden mahdollisuuksista, sekä erilaisten etäkäyttömenetelmien soveltuvuudesta hitsausrobotiikkaan.

1.2 Työn tutkimuskysymykset, tavoitteet ja rajaus

Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin. Millaista teknologiaa laitteilta vaaditaan, että niiden etäkäyttö on mahdollista? Mihin tarkoitukseen etäteknologioita käytetään? Miksi yritysten kannattaisi harkita niihin investoimista? Tämän kandidaatintyön tavoitteena on luoda kattava selvitys teknologisista ratkaisuista, jotka mahdollistavat eri etäkäytön, sekä selvittää eri etäteknologioiden käyttömahdollisuuksia robotisoidussa hitsauksessa. Tavoitteena on myös luoda systemaattinen kehityspolku robottihitsausprosessille, jonka avulla etäkäyttö voitaisiin mahdollistaa. Työ rajataan käsittelemään lähtökohtaisesti vain robottihitsaukseen soveltuvia ratkaisuita, vaikka ratkaisuja haetaan yleisesti kaikkialta teollisuudesta. Etäkäyttöä voi tapahtua myös useiden eri koneiden välityksellä, mutta työssä selvitetään sellaisia käyttökohteita, joissa ihminen on mukana työskentelyssä. Työssä ei myöskään tutkita yksittäisiä teknologioita, joita voidaan käyttää, vaan pyritään luomaan yleiskuva nykytilanteesta, jonka pohjalta voidaan suorittaa lisätutkimuksia siitä, mitä yksittäisiä laitteita niissä voitaisiin käyttää.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen rakenne

Tutkimusmenetelmänä työssä käytetään kirjallisuuskatsausta. Kirjallisuuskatsauksessa lähdeaineistona käytetään tieteellisiä artikkeleita, joissa on luotu aiheen pohjalta ratkaisuita tutkimusongelmaan. Tutkitaan myös aiheeseen liittyvää tietokirjallisuutta, aihetta käsitteleviä konferenssijulkaisuja sekä tutkimuskohteeseen liittyviä standardeja. Tulosten ajantasaisuuden varmistamiseksi kirjallisuuskatsauksessa käytetään vain tuoreita, enintään 10 vuotta vanhoja lähteitä. Niiden laadun varmistamiseksi pyritään käyttämään vain vertaisarvosteltuja lähteitä, sekä tarkastellaan artikkelien julkaisseiden lehtien vaikuttavuutta esim. IF luvun avulla. Työssä ensimmäisenä perehdytään hitsausteollisuuden kehitystrendeihin ja robottihitsaukseen. Tämän jälkeen tutkitaan, millaisia teknologioita tarvitaan, että etäkäyttö voidaan mahdollistaa. Tutkimuksen viimeisessä osassa käsitellään, millaisia etäkäyttömahdollisuuksia robotisoidussa hitsauksessa on ja kuinka ne ovat toteutettavissa. Lopuksi analysoidaan saatuja tuloksia ja luodaan alustava kehityspolku etäteknologioiden käyttöön otolle. Viimeisenä käydään läpi tutkimuksen suorittamista ja sen varteenotettavuutta, sekä käydään läpi jatkotutkimustarpeita.

2 Robottihitsaus ja I4.0

Maailman digitalisoituminen ja jo pitkälle kehittynyt informaatiotekniikka ovat johtaneet perusteellisiin muutoksiin yhteiskunnan ja teknologian saralla. Teollisuuden on seurattava tätä muutosta ja kehityttävä muiden yhteiskunnan osa-alueiden mukana. Tämä kehittyminen on johtanut niin kutsuttuun neljanteen teolliseen vallankumoukseen (I4.0, Industry 4.0), mikä on saanut alkunsa Saksasta ja keskittyy etenkin perinteisten prosessien digitalisoimiseen ja nykyaikaistamiseen. Muutosta ajavat niin maailman digitalisoituminen kuin kuluttajattomusten muuttuminen. Halutaan entistä enemmän digitaalisia palveluita ja tuotteen täytyy täyttää entistä enemmän yksilöllisiä tarpeita. Tämä johtaa kokonaisen toimitusketjun muuttumiseen, jonka vuoksi kuluttajat suuntaavat kulutustottumuksiaan entistä nykyaikaisempiin tuotteisiin. Tämän myötä teollisuuden on panostettava tuotannossaan kuluttajien tarpeiden täyttämiseen, joka vaatii taas täysin uudenlaista teknologiaa, laitteita ja systeemeitä. Tuottaja haluaa uusien järjestelmiensä prosessin suorittamisen lisäksi tuottavan jotta-kin lisäarvoa itselleen ja asiakkailleen tuotannon yhteydessä. (Reisgen et al. 2019, 1122)

2.1 IoT robottihitsauksessa

Etäkäyttö eri muodoissaan on yksi I4.0:n paradigma. Sen vaikutuksia robotisoituun hitsaukseen on tutkinut Farkas (2018). Työssään hän erittelee yhdeksän I4.0:n ”teknistä pilaria”, jotka tulevat lisääntymään ja kehittymään muutoksen myötä. Hän erittelee sekä kehityksen tuomia hyötyjä, mutta myös haittoja ja kehitykseen liittyviä riskejä, sekä miten kehitys tulee näkymään robotisoidussa hitsauksessa. Reisgen et al. (2019) menevät työssään syvemmälle kaasukaarihitsausmenetelmien tekniseen kehitykseen I4.0:n myötä. Työssä perehdytään erityisesti digitalisaation ja laitteiden verkottumisen tekemään muutokseen ja esitellään kyberfysikaalisten systeemien ja data-analytiikan toimintaa hitsausympäristössä.

Yksi I4.0:n esittelemistä tekniikoista on Esineiden Internet (IoT, Internet of Things), joka yhdistää sekä digitalisaation, että laitteiden verkottumisen ja verkostoitumisen. IoT:n toteuttaminen vaatii laitteilta sitä tukevia teknologioita ja nämä teknologiat ovat myös

avainasemassa etäkäytön luomisessa. Borgia (2014) esittelee työssään kattavasti IoT:n mahdollistavat tiedonhankinnan, -siirron ja -käsittelyn teknologiat. Hän käy yksityiskohtaisesti läpi eri teknologioiden ominaisuudet ja käyttökohteet, sekä esittelee IoT:n sovellusmahdollisuudet eri toimialoilla. Collin & Saarelainen (2016) vuorostaan luovat työssään oppaan yrityksille IoT:stä johdetun Teollisen Internetin (IIoT, Industrial Internet of Things) käytölle ja sovelluksille, sekä sen teknologisten haasteiden ratkaisemiseksi. Erityisesti työssä keskitytään IIoT:n luomiseen teolliseen ympäristöön, sekä sen tuomiin hyötyihin.

IoT:n tärkeimpiä työkaluja ovat eri tiedonkeruumenetelmät, joita Borgia (2014) työssään luettelee. Sensorien käyttöä tiedonkeruumenetelmänä robotisoidussa hitsauksessa käy työssään läpi Xu & Wang (2021). Työssä tutkitaan etenkin erilaisten visuaalisten sensorien käyttöä robottihitsauksessa, joiden hyödyntäminen etävalvonnassa ja -ohjaamisessa, konenäön käytössä, sekä älykkäiden robottien luomisessa on suuressa roolissa. Uutena nousevana tekniikkana ovat myös langattomat sensoriverkot (WSN, Wireless Sensor Network), joiden käyttöä IoT:ssä Lazarescu (2013) työssään tutkii.

Suuren tietomäärän myötä tiedonsiirtomenetelmien on kehityttävä. Ungurean & Nicoleta (2020) esittelevät työssään nykyisiä tiedonsiirtomenetelmiä sekä luovat uusien teknologioiden vaatimukset täyttävän tietojärjestelmäarkkitehtuuriratkaisun IIoT:n käyttöön, jossa haetaan ratkaisua suurten tietomäärien käsittelyyn ja siirtämiseen reaaliajassa. Ratkaisu on mahdollista suorittaa vanhoilla Internet teknologioilla tai hyödyntää 5G:n luomia mahdollisuuksia. 5G:tä, sen käyttöä ja kykyjä IoT ja IIoT ratkaisuisa Castellón et al. (2020) esittelee työssään.

Työssä tutkitaan etäkäyttöä kolmessa tilanteessa: etävalvonta ja -kontrollointi, etäohjaus ja etähuolto. Yksi etävalvonta ja -kontrollointi ratkaisu esitellään Kobzan et al. (2018) tutkimuksessa, jossa normaali kontrollointi systeemi korvataan pilvipalveluun yhdistetyllä PLC:llä. Työssä luodaan tätä ratkaisua tukeva systeemiarkkitehtuuri ja testataan sen toimintaa käytännössä. Etähuoltoon perehtyy Roy et al. (2016) tutkimuksessaan, jossa käydään läpi siihen liittyviä teknisiä ongelmia ja ratkaisuja niihin. Robotin etäohjaus vaatii toimiakseen ihmisen ja robotin välille käyttöjärjestelmän (HRI, Human-Robot-Interface). Doisy et al.

(2014) selvittävät työssään millainen vaikutus toimivalla HRI:llä on robotin käytössä ja kuinka sen avulla noviisi voi oppia laitteen käytön.

2.2 Hitsausteollisuuden kehittyminen

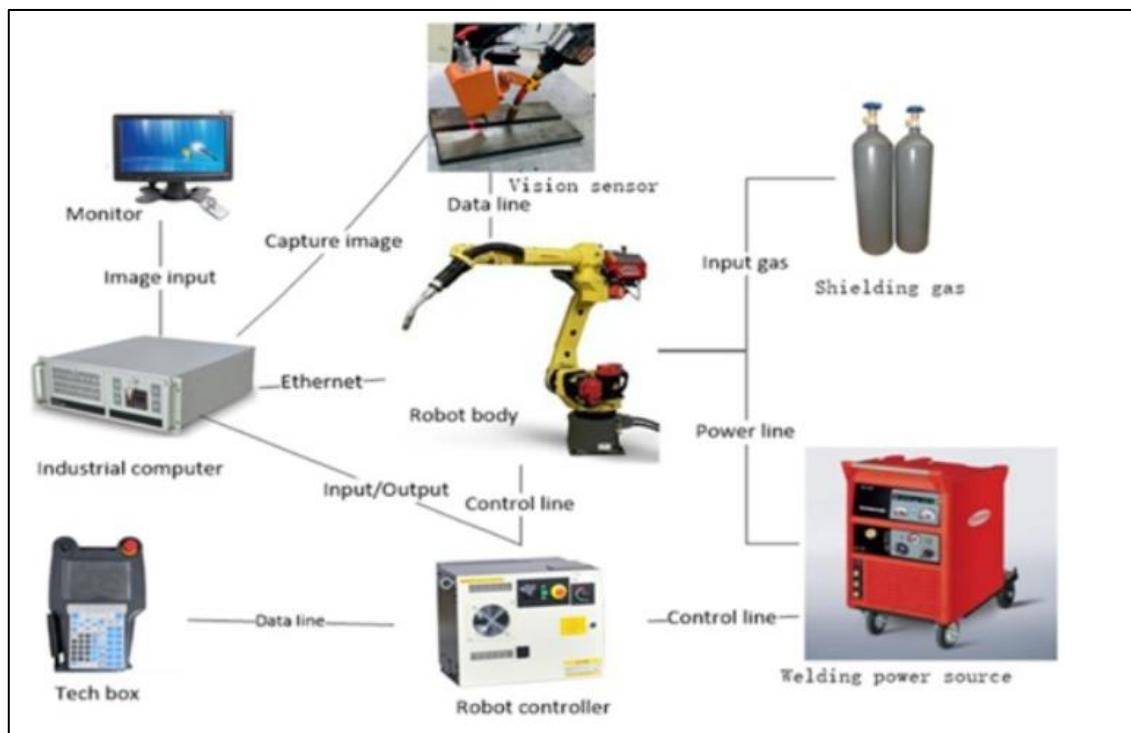
Hitsausteollisuus itsessään on kokenut monia sitä kehittäviä trendejä, joista viimeisimpänä automaation tuominen teollisuuteen robottien muodossa. Ensimmäisenä robotteja käytettiin lähinnä autoteollisuudessa pistehitsauksessa, minkä jälkeen sen hyödyt etenkin hitsin laadussa ja hitsausnopeudessa huomattiin ja se alkoi yleistymään muillakin teollisuudenaloilla. Viimeisimpänä trendinä on havaittu älyllinen hitsaus digitaalisten työkalujen avulla, mikä entisestään pystyy vähentämään ihmisen tuomaa virhettä, lisäämään hitsauksen laadunvalvontaa, mahdollistamaan robottien reaaliaikaista kunnan tarkkailua ja analysoimaan dataa entistä laajemmin. Näitä älykkäitä robotteja, jotka pystyvät itsenäiseen ajatteluun ja päätöksentekoon, kutsutaan kolmannen sukupolven roboteiksi (Xu & Wang, 2021, 1). Hitsauksen robotisoinnilla pyritään eliminoimaan ihmisen tuomaa virhettä, vähentämään prosessiparametrien vaihtelua takaisinkytkentä systeemin avulla, saamaan hitsin laadusta ylivertaista käsin hitsaukseen verrattuna ja samalla kehittämään tuottavuutta. (Posch et al. 2017)

2.3 Hitsausrobotti

Älykkään hitsausrobotin tavoitteena on korvata osittain tai kokonaan hitsaajan fyysiset toiminnot sekä hitsaajan suorittama ajattelutyö. Uusimpana kehitystrendinä on luoda kokonaan autonomisia hitsausrobotteja, jotka pystyvät suorittamaan työn ilman ihmisen apua. Nykyiset mallit ovat lähinnä opetettavia robotteja, jotka eivät kykene itsenäiseen ajatteluun. Tällaisten robottien käyttö hitsausteollisuudessa ei ole kannattavaa hitsaustyön vaihtelevuuden ja työn aikana tapahtuvien epäsäännöllisten muutosten takia. (Chen & Lv 2014, 109–110) Tällaisia voivat olla esimerkiksi kappaleiden esityöstössä tapahtuneet muutokset, hitsattavien kappaleiden lämpölaajeneminen ja hitsiaineen tunkeuman muutokset. Näiden ongelmien välttämiseksi nykyiset hitsausrobotit on varustettu älykkäillä teknologioilla. Robotin liikettä seurataan liikesensoreilla ja samalla muilla sensoreilla luodaan kuvaa hitsaustapah- tumasta eli hitsausympäristöstä, hitsisulan käyttäytymisestä, tunkeutumisesta ja

ohjaamisesta. Näiden sensorien ja älykkäiden reaaliaikaisten kontrollereiden avulla saadaan aikaiseksi hitsausteollisuuden laatuvaatimuksia vastaava robotti. (Chen & Lv 2014, 110–111)

Kuvassa 2 näkyy tyypillinen konstruktio kaarihitsausrobotiasemasta. Kaarihitsauslaite itsessään toimii samalla tavoin kuin käsinhitsauksessa, hitsilangan syöttöä ja muita hitsausparametrejä kontrolloi robotti. Prosessia seuraa hitsipuikon päässä olevat sensorit, jotka keräävät tietoa esimerkiksi hitsin a-mitasta, tunkeumasta, materiaalin ja kappaleen asennon muutoksista sekä mahdollisista muista huomioitavista asioista. Tämä kerätty tieto yhdistetään tietokoneessa muihin parametreihin, minkä perusteella tietokone luo kokonaiskuvan prosessista ja niiden perusteella ohjaa reaaliaikaisia korjauskäskyjä robotin kontrollerille. (Chen S.B. 2015, 3–34)

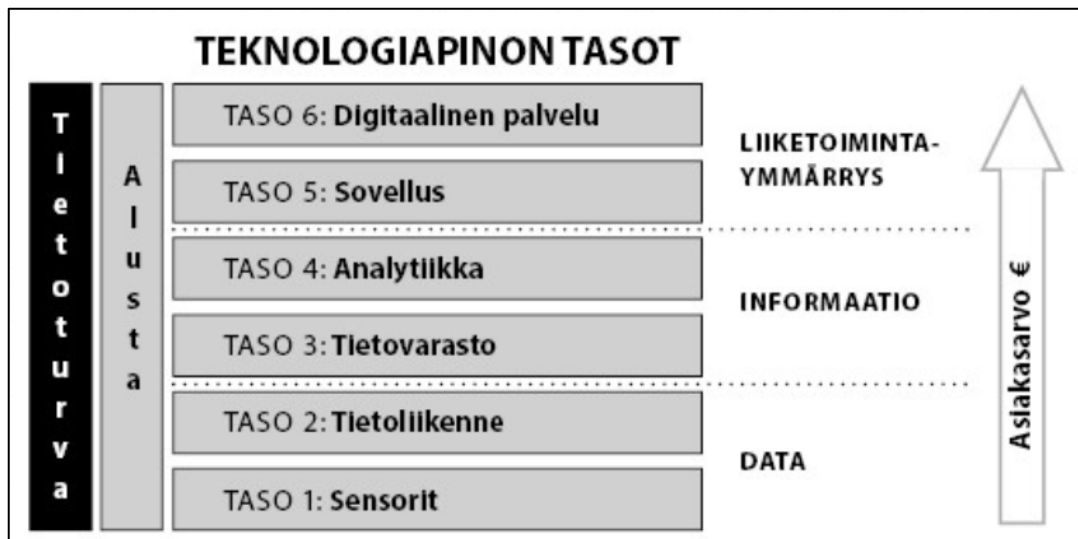


Kuva 2. Tyypillinen kaarihitsausrobotiasema. (Xu & Wang 2021)

3 Etäkäytön mahdollistavat tekniikat

Digitaalinen transformaatio eri teollisuuden aloilla, on tärkeimpiä kehityssuuntauksia etäteknologioiden käyttöönoton tukemisessa. Tämä kehitys nojaa vahvasti I4.0:n tuomien uuden sukupolven viestintä- ja yhteysteknologioiden käyttöönottoon, sekä niillä vanhojen teknologioiden korvaamista. Tällä kehityksellä pyritään luomaan niin kutsuttua esineiden internetiä, IoT:tä. (Furjan et al. 2020, 127) Yhteys- ja viestintäteknologioiden tärkeys korostuu etenkin korkean teknologian laitteissa, kuten robottihitsausasemissa, joissa laitteen toiminta on pitkälti riippuvainen jatkuvasta käytön seuraamisesta, järjestelmällisestä huoltamisesta, sekä osaavien insinöörien tuesta. On arvioitu, että korkean teknologioiden laitteiden kunnossapidon (MRO, Machine, Repair, Overhaul) markkinat ovat kansainvälisesti noin 50–75 miljardin dollarin suuruiset (Roy et al. 2016, 669).

IoT:n ja IIoT:n yleistymisen ja kehityksen myötä, on herännyt kysymys, millaisia teknisiä vaatimuksia teollisuuden prosesseille on asetettava, jotta kyseiset toiminnot olisivat mahdollisia toteuttaa ja hyödynnettävissä etäteknologioiden käytössä. Lähtökohtaisesti ongelma ei ole teknologian puutteessa, vaan uuden ja vanhan teknologian yhteensovittamisessa, sillä yksi IoT:n pääpointeista on nimenomaan kaikkien laitteiden liittäminen internettiin. Tämä vaatii toimiakseen uudenlaisen teknologisen infrastruktuurin. Haasteena on olemassa olevan teknologian erilaisuus. Sen sijaan, että luotaisiin yksi kaiken kattava paketti, on helpompi luoda monista osakokonaisuuksista koostuva systeemi, jota voidaan soveltaa eri kohteisiin. (Collin & Saarelainen 2016, 139) Kuvassa 3 on esitettyä yksi ratkaisu osakokonaisuuksista, joista yritys voi valita omaan tarpeeseensa sopivan kokonaisuuden, joka luodaan heille yksityisesti. Tässä kappaleessa perehdytään syvemmin näihin osakokonaisuuksiin ja jo olemassa oleviin tai kehitettäviin ratkaisuihin, joita voidaan hyödyntää IoT-ratkaisuissa.



Kuva 3. IoT:n osakokonaisuus tasot. (Collin & Saarelainen 2016)

3.1 IoT:n tieto- ja viestintäteknologia

Etäteknologioiden tulee pystyä tuottamaan käyttäjälleen tietoa siten, että se vastaa tasoltaan sitä kuin käyttäjä olisi paikan päällä. Tämän toteuttamisen mahdollistaa I4.0:n luoma IoT trendi, jossa kyber ja fyysisen maailman välistä eroa pyritään pienentämään. Tämä onnistuu yhdistämällä uusia ICT systeemeitä perinteisiin laitteisiin, jossa informaatio fyysisen laitteen toiminnasta kerätään sensoreilla, käsitellään ja siirretään digitaaliseen muotoon. Tällaisia systeemeitä kutsutaan cyber-fysikaaliseksi systeemeiksi (CPS, Cyber-Physical-System). Prosessissa itsessään tiedon keruu ja käsittely tapahtuu kolmessa eri vaiheessa:

1. Tiedonkeruu
2. Tiedonsiirto
3. Prosessointi, hallinta ja käyttö

Tiedonkeruu-vaiheessa analysoidaan prosessissa tapahtuvia fyysisiä muutoksia. (Borgia 2014, 3–5) Fysikaalisia kappaleita ja parametrien muutoksia, kuten lämpötila, ilmankosteus, etäisyys, seurataan esimerkiksi eri sensoreilla. Robotisoidussa hitsauksessa sensorit seuraavat visuaalisia muutoksia, hitsauskaaren käytöstä, ääntä ja värinää. Visuaalisten sensoreiden käyttöä robotisoidussa hitsauksessa tutkiin runsaasti, sillä niiden avulla on havaittu olevan eniten hyötyä robotin kontrolloinnin parantamisessa. (Xu & Wang 2021, 1–4) Sensorien lisäksi tietoa laitteista ja esimerkiksi tuotteista voidaan lukea radiotaajuus etätunnistimen

(RFID, Radio Frequency Identification) avulla. Tunnistimet toimivat radioaalloilla ja niitä on kahdenlaisia, aktiivisia ja passiivisia, joissa aktiivisessa on oma energianlähteensä. Yksinkertaisen rakenteensa vuoksi RFID:llä on rajaton määrä käyttökohteita ja siihen kohdistuva jatkuva tutkimus myös lisää niitä, sekä tekee siitä hyvin tärkeän IoT-systeemeille. (Perret 2014, 1–4)

Uusimpana teknologiana tiedonkeruuseen ovat langattomat sensoriverkostot, WSN:t. Niillä pystytään keräämään tietoa laajasti eri alueilta ja niitä pystytään hyödyntämään eri kohteissa. Perinteiset WSN:t ohjelmoidaan havaitsemaan vain jotakin tiettyä ilmiötä, kuten ympäristöolosuhteita, ja sensorit saavat virtansa esimerkiksi pattereista, jonka vuoksi niillä on rajoitettu käyttöikä ja tiedonkäsittely mahdollisuus. Nykyinen kehitys pyrkii kumoamaan juuri näitä ominaisuuksia eli tekemään niistä uudelleen ohjelmoitavia ja virtaratkaisuja sekä tiedonkäsittely tapoja pyritään kehittämään (Lazarescu 2013, 45–47). Kolmas tapa kerätä tietoa on near-field communication (NFC), joka toimii kuten RFID, mutta vain hyvin lyhyeltä, muutama cm, etäisyydeltä. NFC pystyy RFID:stä poiketen siirtämään tietoa molempiin suuntiin, jolloin molemmat yhteydessä olevat laitteet voivat sekä lähettää, että vastaanottaa tietoa (Lazaro et al. 2018, 2–4). Lazaro et al. (2018) käyvät tutkimuksessaan läpi, kuinka NFC laitteiden lukuetaisyttä voitaisiin kasvattaa ja kuinka energiaa voitaisiin siirtää ja varastoida lukulaitteen ja vastaanottimen välillä. Tätä kehitystä pystyttäisiin hyödyntämään esimerkiksi laitteiden vikadiagnostiikassa, laite lataa virhetiedon lähettimeen ja laitteen käyttäjä voi tuoda vastaanottimen koneen läheisyyteen ja saa tiedon ongelmasta. Taulukossa 1 on listattuna päätoiminnot, kuinka IoT systeemeissä voidaan suorittaa tiedonkeruuta.

Taulukko 1: IoT:ssa käytetyt tiedonkeruun päälaitteet ja niiden ominaisuudet

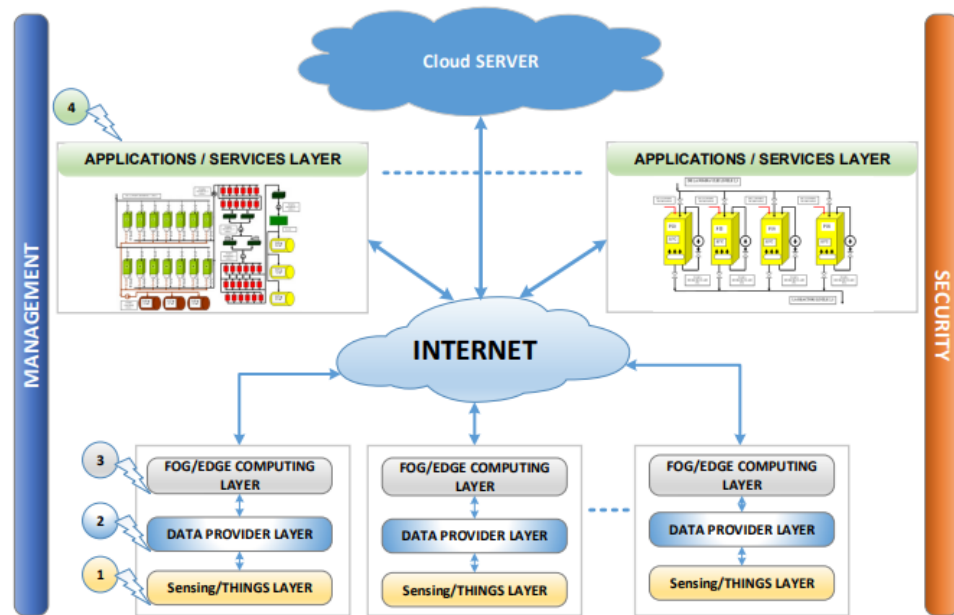
Teknologia	Esimerkkilaitteet	Toiminnot	Maksimi etäisyys
RFID	Passit, kulunvalvontavaimet, eläinten sirutus.	Tunnistus, varastointi, kommunikaatio	3–10 m
Sensorit	Kamerat, etäisyys-, lämpötila-, kosteusanturit.	Suureiden mittaus ja tunnistus, varastointi, prosessointi, kommunikaatio	10–100 m

NFC	Älypuhelimien maksuominaisuus, lähimaksu, kappaleisiin kiinnitetyt tunniste-tarrat, puhelimen ja laitteen paritus.	Kommunikaatio	< 10 cm
-----	--	---------------	---------

Datan keräyksen jälkeen tieto täytyy saada siirrettyä tietoverkkoa pitkin käsiteltäväksi. Voidakseen toimia luotettavasti etätyökalut ja IoT systeemit vaativat nopeaa ja jatkuvaa tiedonsiirtoa prosessin toiminnasta. Tiedonsiirtoa voidaan suorittaa sekä langallisesti, että langattomasti. Langallisista tiedonsiirtomenetelmistä yleisin on standardisoitu Ethernet, joka kykenee tiedonsiirtoon 100Mbits – 100Gbits nopeudella (Borgia 2014, 6). Langallisten tiedonsiirtomenetelmien käyttöä rajaa kuitenkin IoT:n ja etäkäytön vaatimukset reeliaikaiselle kontrollereille ja tiedonsiirrolle, sekä langallisten yhteyksien hintavuus ja huoltamisen haastavuus. Näistä syistä johtuen langalliset reaaliaikaista tiedonsiirtoa tarjoavat systeemit kuten EtherCAT, CANOpen, Profinet, Profibus ja muut kenttäväylä systeemit ovat käytössä langallisissa yhteyksissä. Uusimpina ollessa langattomat kenttäväylät kuten WirelessHart ja erilaiset 5G-teknologiaan pohjautuvat järjestelmät. (Ungurean & Nicoleta 2020, 3) Internetin ja paikallisten WLAN verkkojen käyttö datansiirrossa on myös hyvin yleistä, mikäli dataa keräävät laitteet kyetään yhdistämään niihin.

Mikäli tietoa ja laitteita halutaan käyttää myös etänä joustavasti ja tehokkaasti, ei riitä, että tieto liikkuu vain paikallisessa WLAN verkoissa tai Internetin välityksellä, vaan tarvitaan reaaliaikainen yhteys ja tiedonsiirto pilvipalveluiden välityksellä. Tämä muodostuu ongelmaksi erityisesti, kun vanhempia systeemejä pyritään päivittämään ja erilaisia ICT ratkaisuja yhdistetään. Kansainvälinen datajärjestö IDC on arvioinut, että vuoteen 2025 mennessä jopa 41,6 miljardia IoT-laitetta siirtää 79,4 tsettabittiä dataa (Lucido & Hummels 2020). Tällaisen tietomäärän siirtäminen aiheuttaa ongelmia etenkin tiedonsiirtonopeuden, sekä kaistanleveyden ruuhkautumisessa. Ungurean & Nicoleta (2020) kertovat tutkimuksessaan tähän ratkaisuksi fog ja edge datankäsittely menetelmät, ja uudenlaisen systeemiarkkitehtuurin, jonka olisi tarkoituksena ratkaista em. ongelmat. Kuvassa 4 on esitettyä yksi mahdollinen malli, jossa on esitettyä systeemin eri kerrokset. Fog ja edge menetelmillä dataa karsitaan jo sen luontipaikassa ja ennen sen lähettämistä pilveen, jolloin sinne päätyy vain käytön kannalta hyödyllinen data. Tämä auttaa myös eri tiedonsiirtomenetelmien ja kenttäväylien

yhdistämisessä, sillä menetelmän käsitellessä dataa ennen sen lähettämistä, pystyy se muuntamaan tiedot haluttuun muotoon.



Kuva 4. Edge ja fog järjestelmän systeemiarkkitehtuuri. (Ungurean & Nicoleta 2020)

IIoT:n kehittyessä ja maailman digitalisoituessa vanhat 3G ja 4G verkkotekniikat eivät pysty vastaamaan langattomien teknologioiden vaatimuksiin. Tällaisia ovat esimerkiksi high data rate, low latency, long-distance communication ja low-power-wide-area (LPWA) ominaisuuksien käyttö. Tähän on ratkaisuna viidennen sukupolven langaton yhteys, 5G, joka pystyy tarjoamaan näitä kaikkia (Chettri & Bera 2020, 16). 5G voidaan hyödyntää IoT:ssä kolmella eri tavalla riippuen yhdistettävän teknologian tarpeesta: enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-reliable low-latency communication (URLLC) ja massive Machine Type Communications (mMTC). eMBB:n käyttökohteet ovat alueilla, joissa vaaditaan laajaa kuuluvuutta, joka paikkaan ja suurta tiedonsiirtokykyä. eMBB pystyy tarjoamaan myös tasaisemman ja luotettavamman yhteyden riippumatta siitä, kuinka monta laitetta siihen on yhdistettynä, tämä palvelee erityisesti etäteknologioiden käyttöä, joissa tasainen yhteys on vaatimuksena. URLLC palvelu on tarkoitettu erityisesti teollisuusautomaation käyttöön sen tarjotessa alle 1 ms latenssin, joka lisää erityisesti prosessien kontrolloimisen luotettavuutta. Nämä systeemit vaativat yleensä myös eMBB:n tarjoamaa laajaa kuuluvuutta, jotta etenkin

latenssi herkät laitteet pystyvät toimimaan luotettavasti. mMTC:llä taas kyetään yhdistämään suuria määriä laitteita, jotka tuottavat paljon pienen volyymin ja ei-latenssi riippuvaista dataa. (Castillón et al. 2020, 168–170) Nämä yhteysteknologiat pystyvät mahdollistamaan M2M, D2D, D2E kommunikation ja ratkaisemaan näissä aikaisemmin esiintyneet yhteys ja kommunikatio ongelmat: Näiden yhteyksien kehittyminen ja käyttöönotto on todennäköisesti seuraava IoT:n kehitysaskel (Chettri & Bera 2020, 16).

3.2 Etäkäyttö mahdollisuudet

IoT:n vaatimusten täyttäminen luo hyvän pohjan etäteknologioiden käytölle, mutta se ei vielä täysin riitä niiden luotettavaan toimintaan. Käyttökohteesta ja tavasta riippuen, voi vaatimukset olla hyvin erilaisia. I4.0:ssa on esitetty kolme käyttötapaa, joissa älykkäitä etäteknikoita voitaisiin hyödyntää: Valvonta ja kontrollointi, käyttö, sekä jatkuva ja ennakoiva huolto (Collin & Saarelainen 2016). Vaatimukset ovat hyvin pitkälti käyttökohteesta riippuvia. Lähtökohtaisesti etävalvonnan ja -kontrollon mahdollistaminen on ensimmäinen vaihe, joka tulee suorittaa muiden ominaisuuksien mahdollistamiseksi.

IoT:n runsaat sensoriverkot ja kehittyneet ICT-järjestelmät mahdollistavat prosessi parametrien jatkuvan käytönaikaisen seuraamisen ja kontrolloimisen. Etätyökaluja varten kerättyä dataa tarvitaan runsaasti ja sen lisäksi tarve on myös päästä käsiksi käytettävien laitteiden tietoihin, tuotantosuunnitelmiin, huoltotietoihin ja muihin tuotantoketjun osiin. Näiden ollessa yrityksen kannalta hyvin merkittäviä tietoja, on niiden tietoturvan takaaminen lähtökohtaisesti vaatimuksena jokaisella tasolla. Ongelmana on myös erottaa valtavasta datajoukosta tarvittava data. Tätä kutsutaan Big Dataksi ja sen käsittelyyn on kehitetty eri tiedonlouhinta menetelmiä, joissa pääpaino on louhittavan tiedon yksityisyyden säilymisessä ja sen tietoturvalisessä käsittelyssä. Teollisuusympäristöistä tuleva data on määrällisesti suurta, vaatii nopeaa tiedonkäsittelyä, on hyvin vaihtelevaa, tulee erilaisista lähteistä ja on hyvin arvokasta. (Sangeetha & Sudha Sadasivam 2019, 5–23) Sen saaminen käytettävään muotoon ja eroteltua ei-tarvittavasta datasta on avainasemassa eri etäkäyttö prosessien mahdollistamisessa. Tämän lisäksi eri etäkäyttö menetelmillä on myös yksityisiä vaatimuksia, joita käsitellään tässä kappaleessa.

3.2.1 Etävalvonta ja -kontrollointi

Yleisin kontrollointi systeemi automatiikassa on tänä päivänä suljettu systeemi, jossa sensoreilta kerätty tieto parametrien muutoksesta antaa käskyn esim. PLC-kontrollerille, joka tekee siihen ohjelmoidun ohjelman mukaisen muutoksen, jonka aktuaattori toteuttaa. Etäkontrollointi vaatii myös IoT ratkaisuita, joissa sensorit ja kontrolleri eivät ole fyysisesti yhdistettynä toisiinsa, vaan toimivat internetin välityksellä. Kobzan et al. (2018) esittävät tutkimuksessaan ratkaisun, jossa fyysistä PLC:tä ei olisi ollenkaan, vaan se olisi ohjelmoituna tehtaan IT-palvelimelle tai sen käyttämään pilvipalveluun, joka olisi saavutettavissa laitteilla, joilla on sinne pääsy. Tämä mahdollistaa myös sen, että fyysisiä kontrollereita ei tarvittaisi muissakaan tehtaan käytössä olevissa laitteissa, vaan PLC ohjelmoitaisiin vain jokaiselle verkkoon yhdistettyyn laitteeseen erikseen. Toinen vaihtoehto on, että fyysinen PLC olisi yhteydessä pilveen ja saisi sitä kautta tiedon systeemissä tapahtuvista muutoksista. PLC yhdistetään IoT yhdyskäytävään, joka siirtää tietoa pilven ja PLC:n välillä, pitäen tiedostomuodon aina oikeana riippuen siitä mihin suuntaan tieto liikkuu. Tällainen ratkaisu ei edellytä muutoksia PLC:n ohjelmointiohjelmiin, mutta mahdollistaa edelleen laitteen etäkontrollonin. (Gavlas et al. 2018, 156–158)

Etävalvonta voidaan suorittaa saman datan avulla, jota kontrollerit ja laitteet käyttävät. Etävalvonta antaa nopeasti kattavan kuvan tuotantoprosessin toiminnasta ja helpottaa näin sen suunnittelu ja optimointia. Koko toimitusketjun valvonnan mahdollistavat järjestelmät helpottavat tuotannosuunnittelua, tuotekehitystä, huoltojen suunnittelua, prosessivaiheiden yhteen linkittämistä ja tuotannon turvallisuuden varmistamista. (Gupta 2021, 37–49) Etävalvonnan käyttökohteesta riippuen voivat vaatimukset sen toiminnalle olla hyvin erilaisia eikä niitä tämän työn puitteissa tulla käsittelemään.

3.2.2 Jatkuva ja ennakoiva huolto

Tällä hetkellä suurin osa huollosta toimii siten, että vian ilmetessä otetaan yhteys huoltoyhtiöön, joka lähettää huoltajan suorittamaan vianetsintää ja ratkaisemaan ongelman. Tämä toimintatapa on aikaa vievää ja asiantuntijoiden ollessa kaukana, myös hyvin kallista.

Ratkaisuna tähän on laitteiden eliniän kasvattaminen ja huoltopalvelun tehokkuuden lisääminen. Yksi ratkaisusta on etähuolto mahdollisuuden kasvattaminen. Tämän vaatimuksena on huoltoyhtiön pääsy laitteiden tuottamaan dataan ja käyttötietoihin, tietojen analysointi ja vianetsintä etänä, sekä ongelmanratkaisun suorittaminen verkon välityksellä laitteen käyttäjän kanssa, käyttämällä esimerkiksi virtuaalitekniologiaa apuna. Vaarallisissa olosuhteissa myös robottien käyttö on mahdollista, mutta tällä hetkellä etähuollon on todettu toimivan parhaiten ympäristöissä, jotka ovat vakaita ja laitteen tila on tiedossa. (Roy et al. 2016, 678)

Virtuaalisten teknologioiden hyödyn maksimoimiseksi on kehitettävä myös digitaalisia MRO ratkaisuja. MRO:n kehitykselle asetettuja vaatimuksia on runsaasti ja hyvin erilaisten huoltosuunnitelmien vuoksi, on hyvin hankala määrittää yhtä toimivaa ratkaisua kaikille. Vaatimukset liittyvät hyvin pitkälti laitteen omistavan yrityksen tietoihin pääsemistä, joka asettaa vaatimuksia tiedonsiirtokyvylle ja tietosuojalle. Yksi ratkaisu ongelmaan olisi huollon ohjausjärjestelmä (CMMS, Computerized Maintenance Management System), joka voisi toimia omana ohjelmanaan tai tuotannonohjausjärjestelmän lisäosana. Tämä ei kuitenkaan ratkaise kaikkia ongelmia, sillä osa laitteiden tiedoista ei ole sitä käyttävän yhtiön saatavilla ja jaettavissa tai yksinkertaisesti teknologiaa ei ole laitteissa vielä riittävästi kattavan datan tuottamiseksi. Etähuoltoa ja MRO:ta varten tarvitaan myös riittävää ammattitaitoa vian korjausvaatimusten selvittämiseksi ja oikeiden varaosien hankkimiseksi ja valmistamiseksi. Näistä syistä laitteiden kehittyminen CPS:ksi on hyvin tärkeää. IoT:n teknisten vaatimusten täyttämisen tiedonsiirron ja käsittelyn osalta on hyvin tärkeää ennakoivan ja jatkuvan huollon onnistumisen kannalta. Etähuollon toimimisen kannalta myös erilaisten virtuaalimallien työkäytön käyttö on merkittävässä osassa sen kehittymistä. (Roy et al. 2016, 670–680)

3.2.3 Etäohjaus

Hitsausrobotin etäkäyttö vaatii samoja ominaisuuksia kuin aikaisemmat toiminnot. Etäkäytöllä pyritään pienentämään hitsaajaan kohdistuvaa työkuormaa ja lisäämään työturvallisuutta vaarallisissa ja epästabiileissa ympäristöissä. Nykytekniikka ei vielä täysin mahdollista autonomisia ja älykkäitä kolmannen sukupolven robotteja, jotka pystyisivät toimimaan

muuttuvissa ympäristöissä ja vaihtelevissa tehtävissä. Tämän takia robottien toimintaan puuttuminen etänä ja niiden käytön mahdollistaminen hyödyntäen samalla koneoppimista helpottaa niiden kykyä sopeutua eri tilanteisiin. Tämä vaatii toimiakseen käyttöliittymän ihmisen ja robotin välille, joka mahdollistaa sen kontrolloimisen. Näitä human-robot-interaction (HRI) systeemejä kehitetään ja tutkitaan jatkuvasti, sekä sovelletaan eri tilanteisiin. (Doisy et al. 2014, 788)

Yksi etäkäyttö malli on esitetty Liun ja Zhangin (2015) tutkimuksessa, jossa oikean hitsaajan tietoa ja taitoa pyritään mallintamaan hitsausrobottiin. Etäkäytössä hitsaaja kontrolloi hitsausrobottia virtuaalioykalujen avulla, jotka muistuttavat oikeita hitsauslaitteita ja hitsaajan liikkeitä kuvataan Leap-sensorilla. Sensorin keräämät 3D-koordinaatit syötetään tietokoneelle, josta tässä tapauksessa tiedot siirtyvät langallisen Ethernet yhteyden välityksellä robotille. Tällainen systeemi vaatii toimiakseen äärimmäisen tarkkaa liikkeen seuranta ja sen toistamista robotilta, sekä reaaliaikaista tiedonsiirtoa robotin ja tietokoneen välityksellä. Robotin etäkäyttöä voi kuitenkin hankaloittaa hitsaajan puutteellinen näkemys ympäristöstä ja etäisyyksistä 2D-videon perusteella. Tätä ongelmaa varten virtuaalioykalujen käyttöä on tutkittu runsaasti. Virtuaalitodellisuuden luodaan malli hitsauskohteesta ja ympäristöstä, jotka vastaavat täysin oikeaa tilannetta. Virtuaali- ja todellinen robotti ovat yhteydessä toisiinsa ja muutokset virtuaalimaailmassa tapahtuvat myös oikeassa tapauksessa. Näiden ratkaisujen toimintaan perehdytään kappaleessa 4.

4 Etäkäytön hyödyntäminen

Digitalisaation ja CPS:ien yleistyttyä, etäkäytölle on löytynyt käyttömahdollisuuksia lähes jokaisesta tuotannon vaiheesta. Uusilla teknologioilla päästään kustannustehokkaisiin ratkaisuihin, joilla pystytään havaitsemaan tuotannossa tapahtuvia poikkeavuuksia, vähentämään häiriöaikoja, parantamaan tuotannon kannattavuutta, lisäämään sen energiatehokkuutta ja helpottamaan tuotannon optimointia. (Cheng et al. 2016, 407–408) Jatkuva tietoisuus tuotannon tilasta ja sen toiminnasta mahdollistavat tehtaiden 24/7 toiminnan ja laitteiden kestoian kasvamisen. Mahdollisten etäyhteyksien avulla tuotannossa tapahtuviin virheisiin ja poikkeavuuksiin pystytään reagoimaan välittömästi ja reaaliajassa. (Canizo et al. 2019, 52455) Tällainen kehitys vaatii kattavan IoT-pohjan luomisen prosessille, jossa tätä pyritään hyödyntämään. IoT:n myötä saadaan aikaiseksi kaiken kattava kokonaisuus, jota voidaan hyödyntää hitsausrobotin etäkäytön tukena.

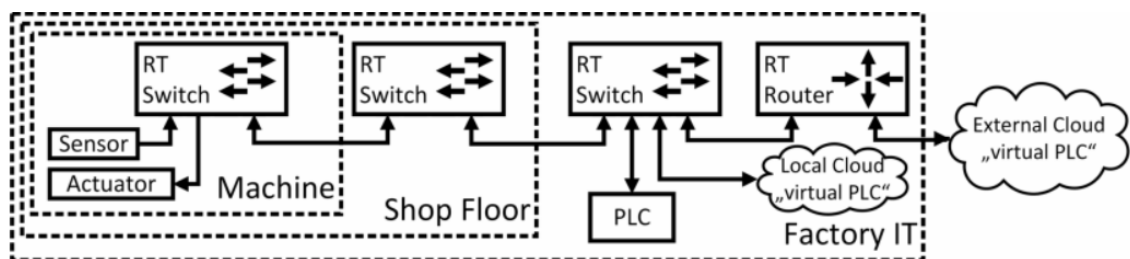
Hitsausrobotti pystyy keräämään valtavan määrän tietoa hitsausprosessin aikana. Tämän tiedon saaminen käyttöön on etäteknologioiden käytön kannalta merkittävässä roolissa. Hitsausprosessin ollessa reaaliaikaista (RT, Real-Time) kontrollointia vaativa tekniikka on sen pystyttävä käsittelemään tätä tietoa nopeasti ja saatava tieto sellaiseen muotoon, että siitä voidaan tulkita mahdolliset poikkeamat. Tämä vaatii ympärilleen systeemiarkkitehtuurin, joka tukee tätä toimintaa jokaisella tasolla.

Yksi suurimmista kehitysaskelista etäteknologioiden saralla, on virtuaalitodellisuuden hyödyntäminen eri tilanteissa. Siinä missä laitteilta saatavan datan avulla pystytään kehittämään ja optimoimaan yrityksen ja prosessien toimintaa, niin virtuaalitodellisuuden avulla pystytään kehittämään työntekijöiden ammattitaitoa, tukemaan heitä työtehtävissä, suunnittelemaan prosessien toimintaa käytännössä ja toimimaan laitteen huollon sekä käytön tukena. Tällä kehityksellä pyritään erityisesti kaventamaan eroa kyber-, fyysikaalisen- ja virtuaalisen maailman välillä, joka entisestään sujuvoittaa työn tekemistä ja vähentää esimerkiksi jatkuvan fyysisen läsnäolon tarvetta. Lisääntynyt kiinnostus aiheetta kohtaan on lisännyt myös siihen liittyvien oheistyökalujen, kuten silmikkonäyttöjen (HMD, Head-Mounted-Display),

hologrammilasien ja virtuaalityökalujen, kehitystä. (Alnagrat et al. 2021, 1–7) Tässä kappaleessa keskitytään näiden etäteknologioiden työkalujen tutkimiseen ja selvitetään niiden käyttökohteita ja toimintaa.

4.1 Prosessin hallinta- ja valvontamenetelmät

Kuluttajat asettavat tuotteille entistä enemmän yksilöllisiä tarpeita, joka vaatii taas tuotantoprosesseilta enemmän kykyä joustaa ja muuttua vastaamaan kysyntää. Tämä vaatii siis tuotantolinjoilta muuntumiskykyä jopa kesken prosessien, joten se vaatii ympärilleen sitä tukevan järjestelmän. Yksi tällaisista järjestelmistä on esitelty Kobzan et al. (2018) tutkimuksessa, jossa järjestelmän kontrollointi on suoritettu kuvan 5 mukaisella tavalla. Mikäli prosessilla on RT kontrollointia vaativia ominaisuuksia, niin myös tiedonsiirtojärjestelmän tulee olla vastaava. Kontrollointi on suoritettuna käyttämällä, joko pilveen yhdistettyä PLC:tä tai täysin virtuaalista PLC:tä. Joka tapauksessa niiden kuitenkin tulee olla yhdistettynä joko paikalliseen tai ulkoiseen pilvipalvelimeen, jossa tapahtuu RT datan käsittely. Järjestelmän suoritusvaatimuksena on, että sen tulee täyttää vähintään perinteisillä tavoilla luodun kontrollointisysteemin vaatimukset.



Kuva 5. Etäkontrollointi järjestelmän rakenne. (Kobzan et al. 2018)

Nämä ovat siis vaatimuksia, mitä prosessille on asetettava, jotta sen kontrollointi ja valvonta etänä on mahdollista. Robotisoidussa hitsauksessa tämä on äärimmäisen suuressa roolissa, kun hitsaaja ei ole aina itse valvomassa suoritusta vieressä. Laadun takaamiseksi on RT-kontrolloinnin mahdollistaminen ja prosessin suorituksen valvonta varmistettava.

Robottihitsauksessa käytetään yleisesti kolmeen luokkaan jaettavia valvontamenetelmiä: esiprosessi, prosessin aikainen ja prosessin jälkeinen valvonta. Esiprosessin ja prosessin

aikaisessa valvonnassa valvotaan esimerkiksi railon seurantaan, osien geometriaa, hitsausprosessin stabiiliutta ja metallografisia muutoksia. Jälkiprosessissa keskitytään enemmän hitsin laadun tarkistamiseen. (Fan et al. 2021) Uuden sensoriteknologian myötä usein seurataan myös hitsausprosessin muita ilmiöitä, kuten lämpötilaa, ääntä, jännitettä ja muita optisia ilmiöitä (You et al. 2014, 181–201). Sensorien keräämä data pystytään rajaamaan ja käsittelemään esimerkiksi I4.0 tuomien Big Data-käsittely työkaluilla, joilla saadaan käyttöön vain työn kannalta merkittävä tieto. Jotta tämä tieto saataisiin helpommin ymmärrettävään muotoon, on visuaalista dataa käsiteltävä ja muuta dataa visualisoitava. Fan et al. (2021) esittelevät tutkimuksessaan ratkaisuja konenäön näkökulmasta, missä keskitytään datan käsittelyä konenäön ymmärrettäväksi. Työssä käsitellään esimerkiksi eri tapoja, joilla visuaalisesta datasta saadaan kaikki työn suorittamisen kannalta merkittävä tieto käyttöön. Näitä datankäsittelytapoja voidaan hyödyntää myös, kun tietoa käsitellään ihmisen käytettäväksi.

Datan käsittelyn jälkeen käyttäjän tulisi päästä siihen käsiksi. Canizo et al. (2019) esittelevät tutkimuksessaan yhden teollisuuden soveltuvan CPS-järjestelmän RT-valvontamenetelmän. Siinä työstä kerätty data käsitellään pilvipalvelussa, jossa ohjelma tekee arvion poikkeuksen merkittävyydestä ja ilmoittaa siitä käyttäjälle. Ohjelma pystyy tarkkailemaan sekä yhden poikkeaman vaikutusta, sekä useamman poikkeaman yhteisvaikutusta. Tämän tulkinnan myötä ohjelma vertaa tietoa siihen asetettuihin raja-arvoihin ja tekee siitä ilmoituksen käyttäjälle eri värikoodeilla, jotka kuvaavat poikkeaman kriittisyyttä. Valvontaa voidaan laajentaa myös etähuollon käyttötarpeisiin jakamalla tämä tieto huollon kanssa. Etähuolto saattaa tilanteesta riippuen vaatia lisää sensoreita etenkin laitteen värähtelyjen seurantaan, joka on osien kulumisen kannalta iso tekijä. (Roy et al. 2016, 672)

Suuren data määrän johdosta voi usein olla järkevämpää antaa kokeneen hitsaajan suorittaa näiden tulkinta ja suorittaa ajattelu robotin sijasta, mutta jättää kuitenkin työn suoritus robotille. Tällaista yhteistyötä kutsutaan ihminen-roboti-yhteistyöksi (HRC, Human-Robot-Collaboration). HRC:n tarkoituksena on yhdistää molempien tekijöiden hyvät puolet, ihmisen adaptiivinen ajattelukyky ja robotin virheetön ja nopea työnsuorittaminen. Robotti suorittaa työtehtävänsä siihen ohjelmoidulla tavalla ja mikäli hitsaaja huomaa eri datalähteistä jotain poikkeavaa, hän pystyy kontrolloimaan robotin ohjelmaa ja tekemään vaaditut korjaukset.

Sujuvaa käyttöä varten on luotava toimiva HRI-järjestelmä, joka tukee tällaista toimintaa. Sen tulee sisältää yksinkertaistettu robotin ohjelmointiohjelma, jolla voidaan tehdä muutoksia robotin ohjelmointiin, sekä kyky kontrolloida robottia ja sen liikettä. (Wang et al. 2020, 386) Tämä mahdollistaa hitsausrobottien käytön entistä haastavammissa hitsauskohteissa ja työtehtävissä. HRC-systeemien ja hitsausrobottien käytössä voidaan käyttää hyväksi samanaikaisesti myös laajennettua todellisuutta (XR, eXtended Reality), joka pitää sisällään virtuaalitodellisuuden (VR, Virtual reality), lisätyn todellisuuden (AR, Augmented Reality) ja yhdistetyn todellisuuden (MR, Mixed Reality).

4.2 Laajennettu todellisuus XR

Laajennettu todellisuus XR on kattotermi, joka pitää sisällään virtuaalitodellisuuden eri sovellukset, sekä niihin liittyvät ihmisen ja tietokoneen väliset järjestelmät (Doolani et al. 2020, 4). Robotisoidussa hitsauksessa virtuaalitodellisuutta ja sen eri muotoja voidaan hyödyntää lähes jokaisessa työvaiheessa. Se toimii yhteistyössä muiden I4.0:n tuomien tekniikoiden, kuten IoT:n, Big Datan, pilvipalveluiden ja kehittyneiden ICT-järjestelmien kanssa. Yhdessä toimiessaan muiden tekniikoiden kanssa se mahdollistaa tietoverkkojen integraation ja välittömän tiedonsiirron ihmisen ja koneen välillä (Reljić et al. 2021, 1–2). Se on yksi päätyökaluista CPS-järjestelmien toiminnassa ja sen alalajeja, joiden soveltamista tässä kapaleessa käsitellään ovat VR, AR ja MR.

VR tarkoittaa virtuaalitodellisuutta, jossa käyttäjä kokee läsnäoloa, interaktiivisuutta ja uppoutumista todellisuuteen. Sen avulla voidaan turvallisesti suorittaa ja testata työtehtäviä, jotka olisivat kannattamattomia tai haastavia oikeassa todellisuudessa. Sen vuoksi sitä hyödynnetään erityisesti koulutuksessa, prosessien testaamisessa ja laitteiden etäkäytössä. (Wohlgenannt et al. 2020, 457–458) Mikäli VR on jonkin HRI-järjestelmän avulla yhteydessä käytettävään robottiin, on mahdollista kontrolloida todellista robottia VR maailmasta.

AR on puolestaan lisättyä todellisuutta, mikä eroaa VR:stä sen toiminnan perusteella. AR yhdistää todellisen ja virtuaalisen maailman tuomalla todelliseen maailmaan virtuaalisia objekteja. Nämä objektit ovat interaktiivisia ja AR:n käyttäjä pystyy muokkaamaan niitä

reaaliajassa. AR:n käyttökohteet ovat erityisesti työntekijän tukemisessa ja ohjeistamisessa sen tarjotessa mahdollisuuden lisätä todellisuuteen tietoa. MR on taas näiden kahden yhdistelmä, vaikkakaan sille ei ole olemassa vielä tarkkaa määritelmää. Sitä pidetään virtuaalidellisuuden ja todellisuuden jatkumona, jossa jommankumman rajoja venytetään. (Doerner et al. 2022, 1–37)

Laajennetun todellisuuden eri työkalujen käytön tarkoituksena on tukea työntekijää työnsuorituksessa. Se pystyy auttamaan prosessien suunnittelussa, robottien ohjelmoimisessa, työn suorittamisessa, laitteiden kestävyuden määrittämisessä, huollon tukemisessa ja huoltotoimenpiteissä. Erityisesti hitsauksessa virtuaalidellisuutta käytetään apuna, kun hitsaus suoritetaan ympäristössä, joka on ihmiselle vaarallinen tai ihmisellä ei ole sinne pääsyä, esimerkiksi avaruudessa. Tässä kappaleessa tutkitaan erityisesti virtuaalidellisuuden käyttökohteita robottihitsauksessa ja sen käyttäjän tukemisessa.

4.2.1 Robotin ohjelmointi ja prosessin testaus

Hitsausrobotteja voidaan ohjelmoida kolmella tavalla: on-line-, off-line- ja automaattisilla menetelmillä. On-line ohjelmoinnissa robottia ohjataan fyysisesti kulkemaan hitsauspolkua pitkin, minkä robotti taltio tietoihinsa ja matkii tätä prosessin suorituksessa. Off-line ohjelmoinnissa hyödynnetään valmiita 3D CAD malleja, joilla simuloidaan hitsauspolkua ja luodaan hitsausohjelma. Automaattisissa menetelmissä hyödynnetään valmiiksi luotuja ohjelmia, joissa kineettisten mallien avulla luodaan simulaatio, jossa robotti suorittaa prosessia. Ohjelmat suunnittelevat hitsauspolut ja parametrit simulaation ja valmiiksi tallennettujen tietojen pohjalta. (Wang et al. 2020, 383) Nämä menetelmät vaativat kattavaa tietoa robotiikasta ja ohjelmoinnista. Etenkin pienissä ja keskisuurissa yrityksissä yksi robotiikan lisäämisen este on juuri heidän kykynsä ohjelmoida ja asettaa roboteihin prosessien vaatimuksia. Ne vievät aikaa ja asiantuntijoiden käyttäminen työhön on kallista. Tätä varten tutkimuksien kohteena on ollut automatisoitujen ohjelmointi menetelmien luonti, joissa on kiinnitetty huomiota erityisesti niiden helppokäyttöisyyteen ja nopeaan oppimiseen.

Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan AR-työkalujen avulla, missä on kiinnitetty erityisesti huomiota robotin hitsauspolun ohjelmoimiseen. Ong et al. (2019) esittävät tutkimuksessaan AR-avustetun robotin ohjelmointi menetelmän (ARWP, Augmented Reality assisted robot welding task programming). ARWP:n avulla pystytään luomaan virtuaalinen kopio todellisesta hitsausrobotista, jonka laitteen käyttäjä näkee oman HMD:n avulla. Käyttäjällä on kädessään pidettävä pointteri, jonka avulla hän pystyy luomaan hitsattavan osan kopion pintaan virtuaalisia pisteitä koskettamalla sitä pointterilla, joita robotti seuraa pitäen siihen ennalta määrätyn etäisyyden. Pointterin avulla pystytään myös hallitsemaan hitsauspillin asentoa, joka on merkittävässä roolissa hitsausprosessissa. Kolmen kameran kuvaamana saadaan mallinnettua käyttäjän liike, jonka pohjalta ohjelma luo käskyn robotin kontrollerille. Laitteen käytännön kokeessa hitsauspolun luominen ARWP:n avulla kesti testikappaleelle 47 sekuntia, kun perinteisesti opettamalla se kesti 434 sekuntia.

Ni et al. (2017) lähestyvät samaa ongelmaa hieman erilaisella ratkaisulla. Heidän ratkaisussaan luodaan myös todellisesta robotista AR-malli, jonka avulla luodaan ja simuloidaan hitsauspolku työkappaleeseen. Tässä menetelmässä virtuaalinen malli luodaan todellisen robotin päälle ja todelliseen ympäristöön, jota käyttäjä pystyy seuraamaan kamerakuvien välityksellä. Tällöin ei ole tarpeen luoda erikseen 3D CAD mallia tai muuta kopiota työkappaleesta, jotta polku saataisiin luotua. Polku luodaan käyttämällä PHANToM ohjainta, jonka avulla käyttäjä pystyy liikuttamaan virtuaalista robottia ja määrittämään hitsauspillin asennon. Etäisyys kappaleeseen saadaan, kun virtuaalista työkalua liikutetaan kappaleen lähellä, jolloin se luo kappaleeseen pistepilven. Mikäli virtuaalinen malli menee liian lähelle työkappaleita tai sen reunoja, luodaan PHANToM ohjaimen voima, joka estää etenemisen lähemmäs. Pistepilven avulla todellisen robotin koordinaattisysteemiin luodaan hitsauspolku. Laitetta testattiin käyttämällä henkilöitä, joilla ei ollut ennestään aiheeseen liittyvää kokemusta ja he pystyivät luomaan onnistuneesti hitsauspolun työkappaleelle.

AR-tekniikan hyötynä, sen helppokäyttöisyyden ja nopean työskentelyn lisäksi, on online ohjelmointiin verrattuna sen kyky suorittaa ohjelmointi keskeyttämättä käynnissä olevia prosesseja (Farkas 2018, 5). AR-ohjelmoinnin toimiessa ilman todellisen robotin työn

keskeyttämistä, saadaan vähennettyä entisestään tuotannon pysähdysaikoja ja näin parantaa työn tuottavuutta, kun uusi työ voidaan aloittaa lähes heti vanhan päätyttyä.

4.2.2 Ohjaus

Hitsausrobottien yksi käyttökohteista on työskentely sellaisissa ympäristöissä, mihin ihminen ei pääse tai missä hänen ei ole turvallista olla. Tämän vuoksi robotteja ei päästä ohjelmoimaan tai käyttämään paikanpäälle, jolloin on kehitettävä ratkaisuita, kuinka suorittaa työ etänä. (Luo et al. 2020, 84) Ratkaisuja voidaan hyödyntää myös perinteisessä tehdasympäristössä, jolloin robotin käyttäjän ei tarvitsisi altistua työympäristön erilaisille haittatekijöille, kuten kaasuille, melulle ja huonolle työergonomialle. Aiheen pohjalta on tehty lukuisia tutkimuksia erilaisiin tilanteisiin erilaisilla ratkaisuilla. Näitä yhdistää kuitenkin VR-työkalujen tai sen eri sovelluksien käyttö etänä. Etäohjaus luonnollisesti vaatii 4.2.1 kappaleessa esitetyjä ohjelmointiratkaisuita ja ne voivat työkohteesta riippuen poiketa hieman esitetyistä ratkaisuista, jonka vuoksi tässä kappaleessa pyritään erityisesti keskittymään robottien ohjausmenetelmiin ja mitä sen toteuttaminen vaatii.

Robotisoidun hitsauksen etäohjauksen voi jakaa kolmeen tasoon: hitsaajan täysi robotin hallinta, robotin ja hitsaajan yhteistyö, autonominen robotti. Ensimmäisellä tasolla robotti on vain hitsaajan fyysinen jatke. Eli hitsaaja kontrolloi robotin liikkeitä yleensä jonkin ohjaimen kautta ja robotti suorittaa tehtävän. Tämä menetelmä on käytössä erityisesti, kun hitsaus suoritetaan ympäristössä, jossa hitsaaja ei voi olla itse paikan päällä. (Wang et al. 2019) Liun ja Zhangin tutkimuksessa (2015) luodaan virtuaalinen ohjausratkaisu ilman VR-työkaluja. Siinä hitsausrobotti on varustettu sensoreilla, jotka luovat hitsaajalle 3D-mallin hitsisulasta ja sen käyttäytymisestä. Tämän ja robottia kuvaavien kameroiden avulla hitsaajalle luodaan käsitys prosessista. Hitsaajalla on virtuaalinen hitsauspuikko, joka on samankokoinen ja tuntuinen kuin oikea vastaava ja hänen käden liikkeitään seurataan Leap-sensorilla ja siirretään robotille. Robottiin on ohjelmoitu ohjelma, joka pitää hitsaajan liikkeen tasaisena ja poistaa ylimääräiset häiriöt. Tällaisella ratkaisulla hitsaus saatiin suoritettua, vaikka hitsausparametrejä muuteltiin kesken hitsauksen tarkoituksellisesti. Tulevissa tutkimuksissa on kuitenkin

huomattu, että pelkän 2D-videokuvan perusteella hitsaaja ei saa riittävää käsitystä hitsausympäristöstä.

Täydellisessä hitsaajan kontrolloinnissa robotin hyöty tasalaatuisuuden varmistajana kärsii, kun hitsaajan inhimilliset virheet siirtyvät suoraan robotille. Tähän ja edellisen tutkimuksen ohessa ilmenneeseen ongelmaan Wang et al. (2020) ovat luoneet kaupallisella VR-laitteella toimivan ratkaisun, jossa yhdistetään hitsaajan ja robotin hyvät puolet. VR-systeemi koostuu HMD:stä, jonka avulla seurataan hitsaajan liikettä ja esitetään virtuaalista mallia hitsaustilanteesta, joka mukautuu hitsaajan pään liikkeen mukaan. Sen lisäksi siihen kuulu ohjain, jolla hitsaaja pystyy kontrolloimaan robotin liikettä. Työssä on pyritty myös matemaattisten mallien pohjalta luomaan robotille kyky ennakoita hitsaajan liikkeitä, jonka avulla se pystyy suorittamaan osittaisia töitä itsenäisesti, sekä tarkentamaan hitsaajan antamia komentoja. Tämä mahdollistaa noviisi hitsaajien käytön haastavammissa työtehtävissä kuin heidän taitonsa riittäisi perinteisellä hitsausmenetelmällä, sekä sen avulla voidaan yleisesti parantaa hitsauslaatua ja nopeutta. Tutkimuksen testeissä huomattiin merkittäviä positiivisia tuloksia, kun vertailtiin hitsausta ilman ennakoivaa tukea ja ennakoivan tuen kanssa.

Nämä kaksi menetelmää yhdistyy Su et al. (2021) tutkimuksessa, jossa todellinen ja virtuaalinen maailma yhdistetään MR-tekniikan avulla. MR-tekniikka mahdollistaa ensiksi hitsaustilanteen arvioimisen livekuvan perusteella, jonka jälkeen käyttäjä voi äänikomenolla käynnistää täysin virtuaalisen hitsaustilanteen ja suorittaa hitsauksen käyttämällä ohjaimen yhdistettyä virtuaalista hitsauspuikkoa. Työssä hyödynnetään myös hitsaajan toiminnan ennakoimista, joka luodaan luomalla mallit kokeneen ja noviisi hitsaajien toiminnasta ja näin pystytään ennakoimaan mahdollisia virheitä mitä tapahtuu. Työssä vertailtiin kokeneen ja noviisi hitsaajien mekaanista hitsauskykyä, jossa huomattiin selvä ero kahden hitsin välillä. Tämän jälkeen sama työ suoritettiin MR-tekniikan avulla, jolloin suoritetuissa hitseissä eroa ei juurikaan ollut. MR-tekniikkaa kehitettiin erityisesti sen kyvystä antaa kokeneelle hitsaajalle nopeasti hyvä käsitys todellisesta hitsaus tilanteesta ja noviiseille mahdollisuudesta tukea kättänsä turvallisesti hitsaustilanteessa.

Laajempaa esitystä VR-maailman ja hitsauslaitteiden luomisesta käydään Luo et al. tutkimuksessa (2020), jossa luodaan hitsausratkaisu ydinvoimalan huoltotarpeisiin. Työssä hitsausrobotin pään ohjastamisen lisäksi luodaan liikuteltava robottiasema, jota käyttäjä voi ohjata. Työssä paneudutaan syvemmin virtuaalimaailman luomiseen ja sen eri vaiheisiin, sekä siihen mitä kaikkea tulee ottaa huomioon maailmaa luodessa.

4.2.3 Huolto

Suoranaiseen etähuoltamiseen siirtyminen on vielä tutkimuksissa hyvin alkutekijöissä. Sen sijaan on kehitetty tapoja, kuinka huollon tarpeita pystyttäisiin ennakoimaan ja näin varautumaan mahdollisiin huoltoihin, tällaista toimintaa kutsutaan ennakoivaksi huolloksi. Huollon toteuttamisessa vaaditaan lähtökohtaisesti vielä paikan päällä olemista, mutta virtuaalityökalujen avulla, asiantuntijoiden avun saaminen on nopeampaa ja helpompaa. AR-tekniikan avulla asiantuntijat pystyvät hyvin tarkasti ohjeistamaan huoltotehtävissä ja etävalvonnan avulla seuraamaan huoltotoimenpiteiden vaikutusta, jolloin huollon pystyy suorittamaan koneen käyttäjä.

Yksi lupaavimmista työkaluista ennakoivan huollon suorittamiseksi on digitaaliset kaksoiset (DT, Digital Twin). DT:t ovat digitaalisia versioita fyysisistä laitteista, jotka rakentuvat sensorien tuottaman Big Datan avulla. Mallin kopioimisen lisäksi DT pystyy matkimaan myös reaaliajassa laitteen toimintaa ja sen avulla voidaan myös testata laitetta virtuaalisesti ja nähdä miten se toimii. (Wang et al. 2021, 334–335) Aivaliotis et al. (2019) kuvaavat tutkimuksessaan, kuinka DT:n avulla voidaan selvittää laitteen jäljellä oleva käyttöaika (RUL, Remaining Useful Life), käyttämällä hyödyksi laitteen osien ennustettua kestävyyttä ja kuntoa. Työssä keskitytään erityisesti kuvailemaan laitteen ja sen käytön mallintamista DT:tä varten. Työssä mallinnettiin robotin vaihdelaatikkaa. Tulosten perusteella käyttäjä pystyi jo ennen työn suorittamista selvittämään, kuinka laitteen kunto tulisi vaikuttamaan työn suorittamiseen. RUL pystyttiin selvittämään aina komponentti tasolle saakka, jolloin huollon kohdentaminen oikeaan osaan oli mahdollista.

Juuri huoltotarpeen selvittäminen on yksi etähuollon toteuttamisen suurimmista haasteista. DT:n avulla saadaan aikaiseksi selkeä tieto huollon tarpeesta ja ongelman laadusta, mutta sen toteuttaminen erityisesti pienemmissä yrityksissä on haastavaa korkean osaamisvaatimuksen vuoksi. Se ei myöskään auta laitteen käyttäjää huollon suorittamisessa, vaan se vaatii edelleen asiantuntijaa huollon suorittamiseen. AR-teknologian ja etäyhteyden avulla, laitteen käyttäjä pystyy kuvailemaan laitteessa ilmenneen ongelman ja huollon asiantuntija pystyy kyselemään tarkentavia kysymyksiä. Vianetsinnän jälkeen asiantuntija voi AR-työkalujen avulla ohjeistaa käyttäjää huollon suorittamisessa tai oikeiden varaosien tilaamisessa ja vaihtamisessa.

AR-teknologian käytöstä huollon tukemisessa on tehty runsaasti tutkimuksia. Mourtzis et al. tutkimuksessa (2017) luodaan käyttöjärjestelmää, jossa mahdollistetaan laitteen käyttäjän ja huollon asiantuntijan interaktiivinen yhteistyö AR-teknologian välityksellä. Tutkimuksessa luodulla käyttöjärjestelmällä saatiin yhdeksän tunnin huoltotyö suoritettua kahdessa tunnissa ja huollon kustannukset laskivat 1370 eurosta 150 euroon. Käyttäjystävällistä lähestymistapaa selvitetään Mourtzis et al. (2020) tutkimuksessa, jossa kehitetään käyttöjärjestelmän graafista ulkoasua sekä AR ohjeiden ulkonäköä ja muotoa 3D CAD mallien avulla, siten että RT etähuolto on mahdollista toteuttaa. Työtä testattiin myös todellisessa teollisuusympäristössä, jonka jälkeen todettiin työn toteuttavan sille asetetut vaatimukset. Työssä myös käsitellään laajemmin mahdollisia taloudellisia hyötyjä, mikäli teknologiaa hyödynnettäisiin pidemmällä aikavälillä. Kymmenessä vuodessa huoltotyössä on mahdollista säästää jopa 100 000 euroa perustuen tutkimukseen osallistuneen yrityksen tietoihin.

Yew et al. (2017) selvittävät työssään todellisen etähuollon toteuttamismahdollisuutta MR-/AR-teknologian ja etäohjattavan huoltorobotin avulla. Ratkaisu koostuu todellisesta robotista huoltokohteessa, virtuaalisesta robotista ja kohteesta sekä etäkohteesta, jossa robotin käyttäjä sijaitsee. Työssä käyttäjä suorittaa prosessin AR maailmassa HMD:n ja kädessä pidettävän ohjaimen avulla, jonka todellinen robotti suorittaa lopulta huoltokohteessa. Työn todettiin olevan vasta pilottihanke ja se vaatii vielä kehittämistä ennen sen todellista hyödyntämistä. Suurimmat ongelmat olivat todellisen maailman mahdollisten muuttujien huomioiminen virtuaalimaailmassa ja ohjaimen liikkeen mallintaminen robotin liikkeeseen.

5 Etäkäytön käyttöönoton vaiheet

Erilaisia etäkäyttö mahdollisuuksia robotisoidun hitsauksen kehittämiseksi on runsaasti ja teknologioita tulee jatkuvasti lisää, kun uusia tutkimuksia aiheesta suoritetaan. Erilaiset etäkäyttöratkaisut tulevat olemaan etenkin pienemmille yrityksille halvempi ja helpommin käyttöön saatava ratkaisu kuin kalliit ja laajaa ammattitaitoa vaativat autonomiset systeemit. Nämä tekniikat on mahdollista saada yhdistettyä tai päivitettyä vanhoihin laitteisiin tuomalla niihin erilaisia IoT ratkaisuita, joita työssä esitellään tai luotava ratkaisu jo tuotekehitysvaiheessa. Taulukossa 2 on esitettynä näiden ratkaisujen pohjalta luotu tuotekehityspolku etäkäyttöratkaisuiden käyttöönottoa varten.

Ensimmäisenä yrityksen tulee määrittää etäkäytön taso, esimerkiksi onko tarvetta mahdollistaa laitteiston etäohjaus vai halutaanko laitteisto vain huollon tueksi. On myös tärkeä miettiä jo kehityksen alkuvaiheissa, onko tulevaisuudessa aikeita kehittää ratkaisuita eteenpäin, jolloin voidaan esimerkiksi luoda helpommin jatkokehitettäviä ratkaisuita jo valmiiksi. Robottien korkean teknologisen tason vuoksi on syytä määrittää mitkä jo laitteistossa olevat teknologiat ovat mahdollisesti hyödynnettävissä käyttötappaa varten, mikä niiden kunto on, sekä onko tarpeen miettiä laitteiden yhteensopivuutta. Selvityksen jälkeen uusilla teknologioilla korvataan havaitut puutteet ja tehdään tavoitteen mukaiset lisäykset. Uusien teknologioiden tarpeen määrittämisen jälkeen voidaan tehdä investointi-/hankintapäätös ja hankkia sekä asentaa uudet teknologiat. Virtuaalimaailmojen tilanteessa myös virtuaalimaailmojen ja mallien luominen on tehtävä yrityksen toiminnan mukaisesti. Viimeisenä työvaiheena on laitteiston testaus yrityksen henkilöstön kanssa ja niiden toiminnan varmistaminen, jonka jälkeen henkilöstön koulutus uusittuihin työtehtäviin voidaan aloittaa.

Taulukko 2: Tuotekehityspolku ja toimintojen selitteet

Kehitysjärjestys	Selitys
1. Käyttötavan määrittäminen	Valvonta/Kontrollointi/Ohjaus/Huolto Virtuaalitodellisuus
2. Tulevaisuuden kehitystarpeiden arviointi.	Esim. virtuaalitodellisuuden käyttö, huollon kehitys ennakoivaksi
3. Laitteistossa olemassa olevan teknologian määrittäminen ja arviointi	Sensoriikka, ICT, verkkoteknologiat, datan käsittely menetelmät, pilvipalvelut, virtuaalilaitteet
4. Uusien teknologioiden tarpeen määrittäminen	Käyttötavan mahdollistavat teknologiat, puutteiden korjaus
5. Tarvittavien teknologioiden hankinta, asennus ja valmistelu	Esim. virtuaalimaailmojen kehitys
6. Laitteiston testaus ja henkilöstön koulutus	RT-toiminnan varmistus, turvalaitteiden toimivuus, ohjaimien, näyttöjen ja käyttöjärjestelmien käyttö

6 Pohdinta

Tuotekehityspolun tarkoituksena on luoda selkeä kuva siitä, mitä asioita on syytä ottaa huomioon etäteknologioita miettiessä ja niiden käyttöönottoa suunnitellessa. Yksi merkittävimmistä etäteknologioiden hyödyistä on niiden käyttömahdollisuus eri tasoisissa laitteissa. Uudet ja älykkäät hitsausrobotit voivat pienille hitsausteollisuuden yrityksille olla liian suuri investointi, jolloin laitteiden kehittäminen niihin lisättävillä ominaisuuksilla nousee vaihtoehdoksi. Päivittämällä vanhoja laitteita, saadaan niiden kestoikää kasvatettua sekä ominaisuuksia paranneltua ja näin myös investointien kannattavuus kasvaa.

Näillä on hyötyjä niin yrityksen sisällä esimerkiksi työntekijöiden tilan muuttuessa ja tuotteiden laadun paranemisessa, kuin ulkoisesti esimerkiksi ekologisuuden lisääntyessä ja yrityksen imagon kehittyessä. Kehitys ei myöskään suoraan uhkaa työntekijöiden asemaa, kuten usein keskusteluissa nousee esiin roboteista keskusteltaessa. Sen sijaan ne parantavat työntekijöiden tilaa ja nostattavat tehtävän työn imagoa, joka voi herättää työn kiinnostavuutta. Työskentely on mahdollista siisteissä ja turvallisissa ympäristöissä, työskentelyä voidaan tukea tietokoneohjelmilla ja järjestelmien helppokäyttöisyyden vuoksi kokemattomat työntekijät voivat suorittaa taitotasoaan vaativampia töitä. Eri etäteknologioiden avulla työskentelystä saadaan jatkuvampaa, ennakoitavampaa ja joustavampaa, sekä ongelmien ratkaiseminen voidaan hoitaa riskittömämmin. Vaikka kehityksen taloudelliset hyödyt on useissa eri tutkimuksissa todistettu kiistattomasti, voi kehityksen tielle nousta yritysten haluttomuus sijoittaa kyseisiin teknologioihin. Syynä tähän on älykkäiden robottien nopea kehitys ja sitä myöten vanhempien teknologioiden halventuminen ja saatavuuden parantuminen.

Kirjallisuusselvitys osoittaa kuitenkin teknologioiden olevan olemassa ja tutkittavana, sekä niiden kehitys on jatkuvaa. Ratkaisuja luodaan monille eri teollisuuden aloille ja ne ovat hyvin pitkälti sovellettavissa myös hitsausteollisuuteen, vaikka niitä ei suoraan siihen olisi-kaan luotu. Ratkaisujen toteuttaminen vaatii edelleen korkeaa koulutusta ja osaamista, jonka vuoksi niiden jalkauttaminen teollisuuteen vie aikaa. Joitakin kaupallisia ratkaisuita aiheen pohjalta on jo luotu, mutta suurta läpimurtoa ei vielä ole saatu aikaiseksi. Tekniikoista on

robottihitsauksen kehittämiseksi ja niillä on potentiaalia olla uusi kehitystrendi hitsausteollisuudessa. Teknologiat ratkaisuihin on jo olemassa ja niiden hyödyt eri tasoilla on todistettu.

Teknologioiden nopean ja laajan kehittymisen vuoksi työssä hyödynnettiin vain tuoreita, maksimissaan 10 vuotta vanhoja lähteitä. Tämä takaa, että teknologiat, joita työssä esiteltiin ja ratkaisut, mitä niiden avulla luotiin, ovat ajankohtaisia ja vastaavat nyky maailman teollisuuden tarpeita. Työssä ei myöskään tutkittu olemassa olevia kaupallisia ratkaisuita, joiden pätevyyteen olisi voinut vaikuttaa yritysten oman edun ajaminen, vaan työssä käytettiin pääsääntöisesti vain vertaisarvosteltuja tutkimusartikkeleita. Tämä takaa sen, että ratkaisut on tutkittu ja testattu monen tahon puolesta ja ne on todettu toimiviksi. Seuraamalla tutkimuksia julkaisseiden lehtien vaikuttavuutta oman yhteisön sisällä voitiin myös todeta niiden olevan arvostettuja tiedeyhteisössä. Toimivuus ei kuitenkaan suoraan tarkoita, että ne olisivat kaikkein järkevin ja taloudellisin ratkaisu yritysmaailman tarpeisiin, jonka vuoksi kaupallisten ratkaisujen tarkastelu esimerkiksi tieteellisten vertailukohdaksi voisi olla tarpeen. Näin löydettäisiin ratkaisut, jotka ovat sekä toimivia, että myös teollisuuden hyväksymiä.

7 Johtopäätökset

Työssä suoritettiin kirjallisuuskatsaus etäkäytön mahdollistamisesta robottihitsauksessa, jonka avulla pyrittiin vastaamaan tutkimuskysymyksiin, jotka käsittelevät etäkäytön mahdollistavia teknologioita, niiden käyttötarkoituksia ja yrityksen syitä investoida kyseisiin teknologioihin. Työssä luotiin kattava selvitys etäkäytön mahdollistavista teknologioista, sekä selvitettiin jo olemassa olevia ja kehitettyjä käyttötapoja kyseiselle tekniikalle. Tutkimuksessa selvisi, että etäteknologioita voidaan yhtä lailla soveltaa jo olemassa oleviin laitteisiin kuin kokonaan uusiin. Samat tekniset vaatimukset pätevät robottihitsauksen ohella myös muihin teollisuuden prosesseihin ja erityisesti IoT:n mahdollistaminen on avainasemassa etäkäytön mahdollistamisessa. Tämä tarkoittaa erilaisten tiedonkeruumenetelmien käyttöä, niillä kerätyn tiedon siirtämistä ja käsittelemistä reaaliajassa, pilviteknologioiden käyttöä ja Big Data työkaluja. Virtuaalitodellisuuden hyödyntäminen eri muodoissaan on yksi tutkituimmista tekniikoista ja niiden käyttöä tukee niiden jatkuva kaupallistuminen ja yleistyminen. Suurimmat haasteet kehitykselle ovat yritysten kiinnostus investoida uuteen tekniikkaan ja korkean asiantuntemuksen vaatimus tekniikoiden jalkauttamisessa teollisuuteen.

Työn tulokset ovat hyvin pitkälti yleispäteviä moneen eri teollisuuden alaan. Etäkäytön käyttötapoja tutkittiin pääsääntöisesti vain robottihitsauksen ratkaisussa, mutta niiden soveltaminen muihin prosesseihin on mahdollista. Koska varsinaista selvitystä suoraan yrityksiltä ei tehty, niin on vaikea arvioida mikä on teollisuuden yleinen mielipide näiden tekniikoiden käytöstä ja onko havaitut hyödyt mahdollisia saavuttaa käytännössä. Tarkkaa tietoa teknologioiden nykytilasta ei myöskään työn pohjalta ole mahdollista saada, kun selvitystä tehtiin vain hyvin yleisellä tasolla. Tulevaisuudessa tutkimusta olisi hyvä kohdentaa juuri näihin kahteen pointtiin. Tutkimusta olisi syytä tehdä myös siitä, kuinka etäkäyttö ja tulevaisuuden älykkäät robotit toimivat yhdessä, sekä kuinka voidaan kehityksen edetessä taata työtä myös robottien korvaamille hitsaajille.

Lähteet

Aivaliotis P, Georgoulas K, Chryssolouris G 2019. The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 32(11): 1067–1080. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686173>

Alnagrat A.J.A., Ismail R.C., Idrus S.Z.S. 2021. Extended Reality (XR) in Virtual Laboratories: A Review of Challenges and Future Training Directions. *Journal of Physics. Conference Series; J.Phys.: Conf.Ser* 1874(1): 12031. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1874/1/012031>

Borgia E. 2014. The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications* 54: 1–31.

Canizo M., Conde A., Charramendieta S., Miñón R., Cid-Fuentes R.G., Onieva E. 2019. Implementation of a Large-Scale Platform for Cyber-Physical System Real-Time Monitoring. *IEEE Access* 7: 52455–52466. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2911979

Castillón D.C., Martín J.C., Suarez D.P., Martínez Á.R., Álvarez V.L. 2020 Automation Trends in Industrial Networks and IIoT. Teoksessa: Butun I. *Industrial IoT*. Springer International Publishing, 161–187. https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/978-3-030-42500-5_4

Chen S.B. 2015. On Intelligentized Welding Manufacturing. Teoksessa: Tarn T.J., Chen S.B., Chen X.Q. (eds) *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. RWIA 2014. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 363: 3–34. Springer, Cham. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/978-3-319-18997-0_1

Chen S.B., Lv N. 2014. Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process. *Journal of Manufacturing Processes* 16(1): 109–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.07.002>

Cheng G. -J., Liu L. -T., Qiang X. -J., Liu Y. 2016. Industry 4.0 Development and Application of Intelligent Manufacturing. 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI): 407-410. DOI: 10.1109/ISAI.2016.0092

Chettri L. & Bera R. 2020. A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems. Teoksessa: IEEE Internet of Things Journal, 7(1): 16–32. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2948888.

Collin J. & Saarelainen A. 2016. Teollinen Internet. Helsinki: Talentum.

Doerner, R., Broll W., Jung B., Grimm P., Göbel M., Kruse R. 2022. Introduction to Virtual and Augmented Reality. Teoksessa: Doerner R., Broll W., Grimm P., Jung B. (eds) Virtual and Augmented Reality (VR/AR). Springer, Cham. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/978-3-030-79062-2_1

Doisy G., Meyer J., Edan Y. 2014. The Impact of Human-Robot Interface Design on the Use of a Learning Robot System. IEEE Transactions on Human-Machine Systems 44(6): 788–795. DOI: 10.1109/THMS.2014.2331618

Doolani S., Callen W., Kanal V., Sevastopoulos C., Jaiswal A., Nambiappan H., Makedon F. 2020. A Review of Extended Reality (XR) Technologies for Manufacturing Training. Technologies 2020 8(4): 77 DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies8040077>

Fan X., Gao X., Liu G., Ma N., Zhang Y. 2021 Research and prospect of welding monitoring technology based on machine vision. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 115(11-12): 3365-3391. DOI: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/s00170-021-07398-4>

Farkas A. 2018. Impact of Industry 4.0 on robotic welding. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering; IOP Conf.Ser.: Mater.Sci.Eng 448(1): 12034. DOI: 10.1088/1757-899X/448/1/012034

Furjan M.T., Tomičić-Pupek K., Pihir I. 2020. Understanding Digital Transformation Initiatives: Case Studies Analysis. Business Systems Research 11(1): 125–141. DOI: 10.2478/bsrj-2020-0009

Gavlas A., Zwierzyna J., Koziorek J. 2018. Possibilities of transfer process data from PLC to Cloud platforms based on IoT. *IFAC-PapersOnLine* 51(6): 156–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.146>

Gupta V.P. 2021. Smart Sensors and Industrial IoT (IIoT): A Driver of the Growth of Industry 4.0. Teoksessa: Gupta, D., Hugo C. de Albuquerque, V., Khanna, A., Mehta, P.L.

(eds) Smart Sensors for Industrial Internet of Things. Internet of Things. Springer, Cham. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/978-3-030-52624-5_3

IFR. 2020. Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots. 12–16. [Viitattu 22.4.2022] Saatavilla: <https://ifr.org/free-downloads/>

Kah P., Martikainen J. 2012. Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness. *Rev.Adv.Mater.Sci* 30(2): 189–200. Saatavilla: https://scholar.google.com/scholar?hl=fi&as_sdt=0%2C5&q=Current+trends+in+welding+processes+and+materials%3A+improve+in+effectiveness&btnG=

Kobzan T., Schriegel S., Althoff S., Boschmann A., Otto J., Jasperneite J. 2018. Secure and Time-Sensitive Communication for Remote Process Control and Monitoring. 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) 1105–1108. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502539

Lazarescu M.T. 2013. Design of a WSN Platform for Long-Term Environmental Monitoring for IoT Applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems* 3(1): 45–54. DOI: 10.1109/JETCAS.2013.2243032

Lazaro A., Villarino R., Girbau D. 2018 A Survey of NFC Sensors Based on Energy Harvesting for IoT Applications. *Sensors* 18(11): 3746. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18113746>

Liu Y. & Zhang Y. 2015. Toward Welding Robot with Human Knowledge: A Remotely-Controlled Approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 12(2): 769–774. DOI: 10.1109/TASE.2014.2359006.

Lucido S., Hummels, P. 2020. Internet of Things and Data Placement. Dell Technologies. [Verkkosivu]. [Viitattu 24.3.2022] Saatavilla: <https://infohub.delltechnologies.com/l/edge-to-core-and-the-internet-of-things-2/internet-of-things-and-data-placement>

Luo Y., Fang Z., Guo J., Lu H., Li J. 2020. Research on the virtual reality technology of a pipeline welding robot. *Industrial Robot: The international journal of robotics research and application* 48(1): 84–94. DOI: 10.1108/IR-04-2020-0074

Mourtzis D., Siatras V., Angelopoulos J. 2020. Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR). *Applied Sciences* 10(5): 1855. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10051855>

- Mourtzis D., Zogopoulos V., Vlachou E. 2017. Augmented reality application to support remote maintenance as a service in the robotics industry. *Procedia Cirp* 63: 46–51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.154>
- Ni D., Yew A.W.W., Ong S.K., Nee A.Y.C. 2017. Haptic and visual augmented reality interface for programming welding robots. *Advances in Manufacturing* 5(3): 191–198. DOI: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/s40436-017-0184-7>
- Ong S.K., Nee A.Y.C., Yew A.W.W., Thanigaivel N.K. 2019. AR-assisted robot welding programming. *Advances in Manufacturing* 8(1): 40–48. DOI: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/s40436-019-00283-0>
- Perret E. 2014. *Radio Frequency Identification and Sensors: From RFID to Chipless RFID*. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Posch G., Bruckner J., Ennsbrunner H. 2017. Industry 4.0 in welding. White Paper. Saata-villa: https://scholar.google.com/scholar?hl=fi&as_sdt=0%2C5&q=industry+4.0+in+welding&btnG=
- Reisgen U., Mann S., Middeldorf K., Sharma R., Buchholz G., Willms K. 2019. Connected, digitalized welding production – Industrie 4.0 in gas metal arc welding. *Welding in the World* 63(4): 1121-1131. DOI: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/s40194-019-00723-2>
- Reljić V., Milenković I., Dudić S., Šulc J., Bajčić B. 2021. Augmented Reality Applications in Industry 4.0 Environment. *Applied Sciences* 11(12): 5592. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11125592>
- Roy R., Stark R., Tracht K., Takata S., Mori M. 2016. Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges. *CIRP Annals* 65(2): 667–688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.006>
- Sangeetha, S., Sudha Sadasivam, G. 2019. Privacy of Big Data: A Review. Teoksessa: Dehghantanha, A., Choo, K.K. (eds) *Handbook of Big Data and IoT Security*. Springer, Cham. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/978-3-030-10543-3_2
- Su Y., Chen X., Zhou T., Pretty C., Chase G. 2021. Mixed Reality-Enhanced Intuitive Teleoperation with Hybrid Virtual Fixtures for Intelligent Robotic Welding. *Applied Sciences* 11(23): 11280. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112311280>

- Ungurean I. & Nicoleta C.G. 2020. A Software Architecture for the Industrial Internet of Things – A Conceptual Model. *Sensors* 20(19): 5603. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20195603>
- Wang B., Hu S.J., Sun L., Freiheit T. 2020. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems* 56: 373–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.020>
- Wang B., Liu Y., Qian J., Parker S.K. 2021. Achieving Effective Remote Working During the COVID-19 Pandemic: A Work Design Perspective. *Applied Psychology* 70(1): 16–59. DOI: 10.1111/apps.12290
- Wang Q., Jiao W., Yu R., Johnson M.T., Zhang Y. 2019. Modeling of Human Welders' Operations in Virtual Reality Human-Robot Interaction. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4(3): 2958–2964. DOI: 10.1109/LRA.2019.2921928
- Wang Q., Jiao W., Yu R., Johnson M.T., Zhang Y. 2020. Virtual Reality Robot-Assisted Welding Based on Human Intention Recognition. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 17(2): 799–808. DOI: 10.1109/TASE.2019.2945607
- Wang Q., Jiao W., Zhang Y., Wang P., 2021. Digital Twin for Human-Robot Interactive Welding and Welder Behavior Analysis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* 8(2): 334–343. DOI: 10.1109/JAS.2020.1003518
- Wohlgenannt I., Simons A., Stieglitz S. 2020. Virtual reality. *Business & Information Systems Engineering* 62(5): 455–461. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12599-020-00658-9>
- Xu Y. & Wang Z. 2021. Visual sensing technologies in robotic welding: Recent research developments and future interests. *Sensors and Actuators. A: Physical*. 320: 112551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112551>
- Yap H.J., Taha Z., Dawal S.Z.M., Chang S. 2014. Virtual reality based support system for layout planning and programming of an industrial robotic work cell. *PloS One; PLoS One* 9(10): e109692. DOI: 10.1371/journal.pone.0109692
- Yew A.W.W., Ong S.K., Nee A.Y.C. (2017) Immersive augmented reality environment for the teleoperation of maintenance robots. *Procedia Cirp* 61: 305–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.183>

You D.Y., Gao X.D., Katayama S. 2014. Review of laser welding monitoring. *Science and Technology of Welding and Joining* 19(3): 181–201. DOI: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1179/1362171813Y.0000000180>