



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Joni Palmqvist

Turvallistaminen robotiikassa ja yhteistyö- robotiikka

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriyö

2.2.2021

Tekijä Otsikko	Joni Palmqvist Turvallistaminen robotiikassa ja yhteistyörobotiikka
Sivumäärä Aika	51 sivua 2.2.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneautomaatio
Ohjaajat	Lehtori Antti Liljaniemi Functional Safety Specialist Ilkka Carlstedt
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin turvallistamisratkaisuja robotiikassa sekä yhteistyörobotiikkaa eri muodoissa. Työn tarkoituksena oli tutkia robottien turvallistamisessa käytettävää teknologiaa. Toisena tavoitteena oli selvittää robotiikkaa, yhteistyörobotiikkaa ja toiminnallista turvallisuutta koskevien säädösten ja standardien mukaisesti, kuinka teollisuusrobotteja olisi mahdollista turvallistaa, jotta niitä voitaisiin käyttää yhteistyöroboteina. Tämän lisäksi työssä vertailtiin ja tutkittiin turvallistettujen teollisuusrobottien ja perinteisten yhteistyörobottien soveltuvuutta erityyppisiin teollisuuden työtehtäviin.</p> <p>Työ tehtiin toimeksiantona insinööritoimisto Etteplan Oyj:lle.</p> <p>Opinnäytetyö aloitettiin tutkimalla turvallistamistoimintoja simulointiympäristössä. Simulointiohjelmaksi valikoitui ABB:n robottien offline-ohjelmointiin tarkoitettu ABB RobotStudio 2020, jonka avulla selvitettiin robotin ohjelmoinnin avulla tehtävää turvallistamista sekä turvallistamistoimintojen simulointia. Tämän jälkeen siirryttiin tutkimaan turvallistamisratkaisuissa käytettäviä laitteita ja robottien turvallistamisessa tarvittavia säädöksiä ja standardeja.</p> <p>Robottien turvallistamisprosessi on mielenkiintoinen, mutta erittäin haastava kokonaisuus hallittavaksi. Huomioitavia asioita on paljon, ja prosessi perustuu täysin kansainvälisiin standardeihin, lakeihin ja määräyksiin. Selvitystyön ja tutkittujen asioiden perusteella teollisuusroboteista voidaan kuitenkin tehdä ihmisen kanssa tehtävään, läheiseenkin yhteistyöhön soveltuvia yhteistyörobotteja huolellisen suunnittelun, riskienarvioinnin ja oikean teknologian avulla.</p>	
Avainsanat	yhteistyörobotiikka, turvallistaminen, toiminnallinen turvallisuus

Author Title	Joni Palmqvist Functional Safety in Robotics and Collaborative Robotics
Number of Pages Date	51 pages 2 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Automation
Instructors	Antti Liljaniemi, Senior Lecturer Ilkka Carlstedt, Functional Safety Specialist
<p>This thesis focuses on different forms of collaborative robotics, and on functional and occupational safety related to industrial robots and collaborative robots. The objective of the thesis was to study the technology used in robot safety solutions, and how industrial robots could be turned into collaborative robots while adhering to the various international standards, specifications and laws regarding robotics, industrial and collaborative robots, and functional safety. Additionally, the thesis compares the suitability of industrial and collaborative robots for different tasks typically performed by robots used in production or manufacturing environments.</p> <p>The thesis was commissioned by Etteplan.</p> <p>The first phase of working concentrated on studying safety functions and implementing functional safety in a simulation environment using offline programming software. ABB RobotStudio, offline programming software designed by ABB Robotics and specifically intended for offline programming of robots manufactured by ABB, was chosen as the software to be used. The second phase of working concentrated on studying and researching the safety equipment used in robotics, and the standards, laws, and specifications regarding robot safety.</p> <p>In conclusion, industrial robots can work closely alongside humans as collaborative robots. The process of turning industrial robots into collaborative robots, however, requires careful planning, thorough risk assessment, and the use of proper safety equipment to reduce the risks identified in the risk assessment.</p> <p>Designing robot safety solutions is an interesting but also a very challenging process to handle as a whole. The entire process is based on international standards, legislations and specifications, and there are various issues that need to be taken into consideration.</p>	
Keywords	cobotics, robot safety, functional safety

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yhteistyörobotiikka	2
2.1	Yhteistyörobotiikka eri muodoissa	3
2.1.1	Tavalliset yhteistyörobotit	3
2.1.2	Aidattomat teollisuusrobotit	4
2.1.3	Palvelurobotit	6
2.2	Yleisiä työtehtäviä yhteistyöroboteille	6
2.3	Tulevaisuuden näkymiä	7
3	Turvallistaminen robotiikassa	7
3.1	Robottien turvallisuutta koskevat standardit	8
3.1.1	Konedirektiivi	12
3.1.2	Yhteistyörobotit	12
3.1.3	Teollisuusrobotit	13
3.2	Yhteistoimintaa koskevat vaatimukset ja yhteistyörobottien eri käyttötavat	14
3.2.1	Turvaluokiteltu valvottu pysäytys	17
3.2.2	Käsin ohjaaminen	19
3.2.3	Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta	22
3.2.4	Tehon ja voiman rajoittaminen	27
3.3	Turvallistamiskomponentit	31
3.3.1	Turvakenttäväylät	31
3.3.2	Turvalogiikat ja -releet	32
3.3.3	Rajakytkimet	32
3.3.4	Sähköisesti tunnistavat suojalaitteet	32
3.3.5	Kosketuksen tunnistavat turvalaitteet	34
3.3.6	Voima-anturit	35
3.3.7	Varoitusvalot, -äänet ja -kyltit	35
3.3.8	Kiinteät tai avattavat suojukset	36
3.4	Turvallistamistapoja	37

3.4.1	Turvallistaminen mekaanisilla turvalaitteilla ja fyysisillä suojuksilla	37
3.4.2	Turvallistaminen sähköisesti tunnistavilla suojalaitteilla	38
4	Turvallistaminen offline-ohjelmointiympäristössä	39
4.1	Robottien Offline-ohjelmointi	40
4.2	ABB RobotStudio	40
4.2.1	RAPID-ohjelmointi	41
4.2.2	Smart Components	41
4.3	Turvallistamistoiminnot RobotStudiossa	43
4.3.1	Keskeytysrutiinit	43
4.3.2	Functional Safety ja SafeMove	45
5	Robottityyppien valinta ja vertailu	46
5.1	Aidattomat teollisuusrobotit ja tavalliset yhteistyörobotit	46
5.2	Valinta työtehtävään soveltuvuuden mukaan	47
5.2.1	Poiminta ja lajittelu	47
5.2.2	Kokoonpano	48
5.2.3	Hitsaus	48
6	Yhteenveto	51
	Lähteet	52

Lyhenteet

AOPD	Active Opto-electronic Protective Devices. Valoverhot ja valoverkot.
AOPDDR	Active Opto-electronic Protective Devices responsive to Diffuse Reflection. Laserskannerit.
ASEA	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget. Osa ABB-konsernia.
CE	Conformité Européenne. Eurooppalainen vaatimustenmukaisuus.
CIP	Common Industrial Protocol. Teollisuusautomaatiossa käytetty kenttäväyläprotokolla.
COBOT	Collaborative Robot. Yhteistyörobotti.
ESPE	Electro-sensitive Protective Equipment. Sähköisesti tunnistavat suojalaitteet.
IRC5	Industrial Robot Controller (5 th Generation). ABB:n viidennen sukupolven teollisuusrobotiohjain.
MAG	Metal Active Gas. Kaasukaarihitsausmenetelmä, jossa käytettävä suojakaasu on aktiivista eli hitsisulan kanssa reagoivaa.
MIG	Metal Inert Gas. Kaasukaarihitsausmenetelmä, jossa käytettävä suojakaasu on inerttiä, eli se ei reagoi hitsisulan kanssa.
NC	Normally Closed. Normaalisti suljettu.
NO	Normally Open. Normaalisti avoin.
OSSD	Output Signal Switching Device. Integroitu lähtökytkentälaitte.
PL	Performance Level. Suorituskyky tai suoritustaso.
PROFINET	Process Field Net. Kenttäväyläprotokolla.

PSPE	Pressure Sensitive Protective Equipment. Kosketuksen tunnistavat suojalaitteet.
SCARA	Selective Compliance Assembly/Articulated Robot Arm.”Valikoivasti taipuisa” nivelrobottikäsi.
SIL	Safety Integrity Level. Turvallisuuden eheyden taso.
VBPD	Vision Based Protective Devices. Turvakamerat.

1 Johdanto

Ihmisten ja robottien välinen yhteistyö on kasvanut huomattavasti viime vuosina. Yhteistyön lisääntyessä myös tarve erilaisille ja entistä tehokkaammille, monipuolisemmille sekä joustavammille yhteistyörobotiikan ratkaisuille kasvaa. Tämä asettaa haasteita robottisoluja suunnitteleville yrityksille ja niiden työntekijöille, sillä tehokkuuden, joustavuuden sekä monipuolisuuden lisäksi ratkaisujen tulee olla mahdollisimman turvallisia ihmisille.

Tässä insinööriyössä tutkitaan yhteistyörobotiikkaa sekä robotiikan turvallistamisratkaisuja konedirektiivin ja sen kanssa harmonisoitujen koneturvallisuuden standardien näkökulmasta. Lisäksi työssä tutkitaan robottien turvallistamista offline-ohjelmoinnin avulla simulointiympäristössä sekä erilaisten yhteistyörobottien soveltuvuutta erityyppisiin teollisuuden työtehtäviin.

Työ on tehty insinööritoimisto Etteplan Oyj:n toimeksiannosta. Työn tavoitteena on selvittää teollisuusrobottien turvallistamistapoja sekä niiden soveltuvuutta yhteistoimintasovelluksiin, jotta niitä voitaisiin käyttää yhteistyörobotteina tavallisten yhteistyörobottien sijaan.

Työ keskittyy ensisijaisesti standardien mukaan tehtävään turvallistamiseen. Lisäksi työ rajattiin offline-ohjelmoinnin osalta ABB:n RobotStudio-simulointiohjelmaan sekä samalla robottien osalta vain ABB:n valmistamiin robotteihin ja niiden turvallistamiseen ohjelmoinnin sekä turvalaitteiden avulla.

2 Yhteistyörobotiikka

Yhteistyörobotit, tai tuttavallisemmin cobotit, ovat ihmisen kanssa tehtävään yhteistyöhön tarkoitettuja robotteja. Robotiikkaa koskevissa standardeissa ei määritellä suoraan, mikä on yhteistyörobotti. Sen sijaan määräävänä tekijänä on robotin tekemän työn luonne, mikä mahdollistaa esimerkiksi teollisuusrobottien muuntamisen yhteistyöroboteiksi tiettyjen edellytysten täytyessä.

Varsinaiset yhteistyörobotit eroavat perinteisistä teollisuusroboteista pienemmän kokonsa ja kuormankantokykynsä lisäksi myös erityisesti turvallisuuden osalta. Ne eivät kuitenkaan ole täysin ongelmattomia työturvallisuuden näkökulmasta, vaikka ne lähtökohtaisesti ovatkin teollisuusrobotteja turvallisempia. Yhteistyörobotiikkasovellusten riskienarviointi on huomattavasti haastavampaa, kun ihminen työskentelee robotin kanssa, eikä virhearviointeihin ole varaa.

Yhteistyörobotteja pidetään helpommin ohjelmoitavina kuin perinteisiä teollisuusrobotteja, ja lisäksi niiden työskentelyalueet ovat usein tilavampia kuin teollisuusrobottien työskentelyalueet. Sen sijaan niiden tekemä työ ja sovelluskohteet vaihtuvat useammin kuin teollisuusroboteilla, ja tiheä vaihtuvuus vaikeuttaa huomattavasti riittävän turvallisuustason ylläpitoa. [1, s. 1.]

Aaltonen ym. [2, s. 95] esittelevät neljä eri tasoa ihmisen ja robotin väliselle yhteistyölle:

- Ei rinnakkaiselo. Ihminen ja robotti eivät työskentele lainkaan samassa työtilassa (aijattu robottisolu).
- Rinnakkaiselo. Ihminen työskentelee robotin kanssa osittain tai kokonaan jaetussa työtilassa eri työtehtävien parissa.
- Yhteiselo. Ihminen ja robotti työskentelevät osittain tai kokonaan jaetussa työtilassa yhteistä tavoitetta kohti.
- Yhteistyö. Ihminen ja robotti työskentelevät samanaikaisesti saman työkappaleen parissa jaetussa työtilassa.

Joissakin sovelluksissa yhteiselo ja yhteistyö voivat olla turvallisuuden näkökulmasta identtisiä, mutta ihmisen kannalta eivät: mikäli ihmisen tekemä työtehtävä riippuu robotin toimista, on kyse aina yhteistyöstä, jolloin oikea ajoitus ja robotin liikkeiden luettavuus ja ennakoitavuus nousevat merkittäviksi tekijöiksi työturvallisuuden osalta.

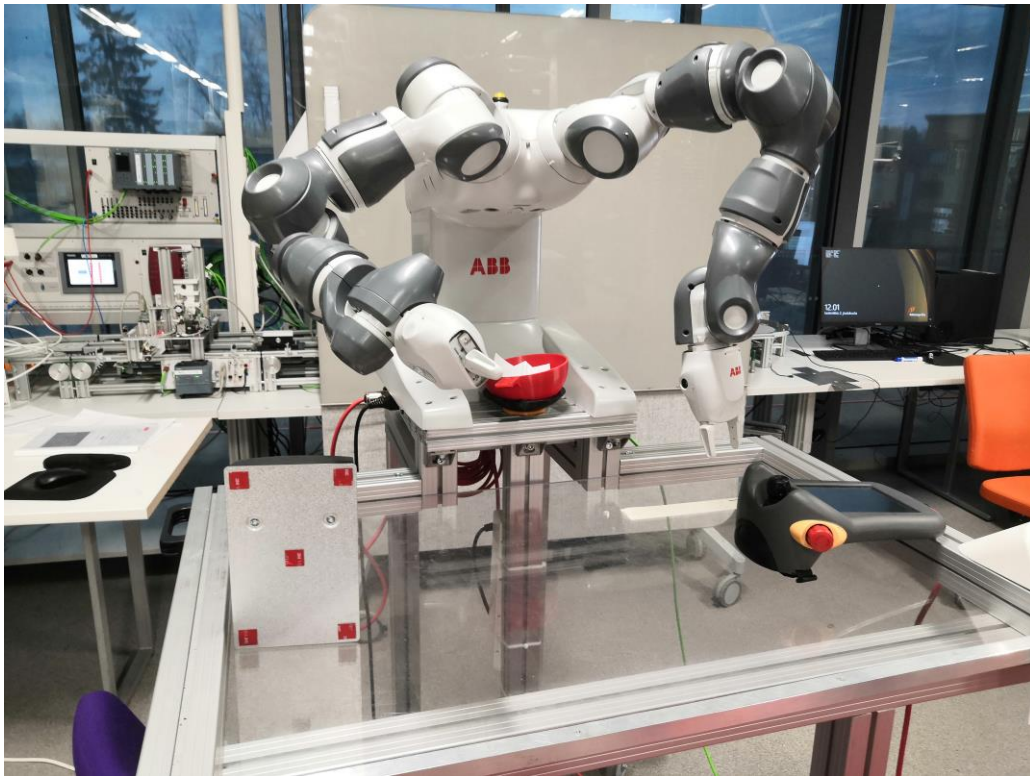
2.1 Yhteistyörobotiikka eri muodoissa

Yhteistyörobotille ei ole olemassa suoraa määritelmää, ja määräävänä tekijänä onkin robotin tekemän työn luonne, joka mahdollistaa niiden karkean jaottelun kolmeen eri kategoriaan: tavallisten yhteistyörobottien lisäksi yhteistyöroboteiksi voidaan luokitella tiiviisti ihmisen rinnalla tai apuna työskentelevät palvelurobotit ja teollisuusrobotit.

Tässä työssä keskitytään tavallisiin yhteistyöroboteihin ja aidattomiin teollisuusroboteihin sekä niitä koskeviin standardeihin sekä teknisiin määräyksiin.

2.1.1 Tavalliset yhteistyörobotit

Tavalliset yhteistyörobotit (kuva 1) ovat ihmisen kanssa tehtävään läheiseen yhteistyöhön tarkoitettuja. Ne ovat useimmiten pieniä tai keskikokoisia, ja niiden kuormankantokyky on keskimäärin pienempi kuin teollisuusroboteilla. Yhteistyöroboteja voidaan käyttää monipuolisissa työtehtävissä ihmisten apuna: pienemmät yhteistyörobotit voivat työskennellä esimerkiksi lajittelussa, laadunvalvonnassa tai kevyessä kokoonpanossa, ja keskikokoiset tai suuret yhteistyörobotit voivat toimia vaikkapa koneenhoitajina koneistussoluissa, hitsausroboteina tai keskiraskaan tuotannon apuna.



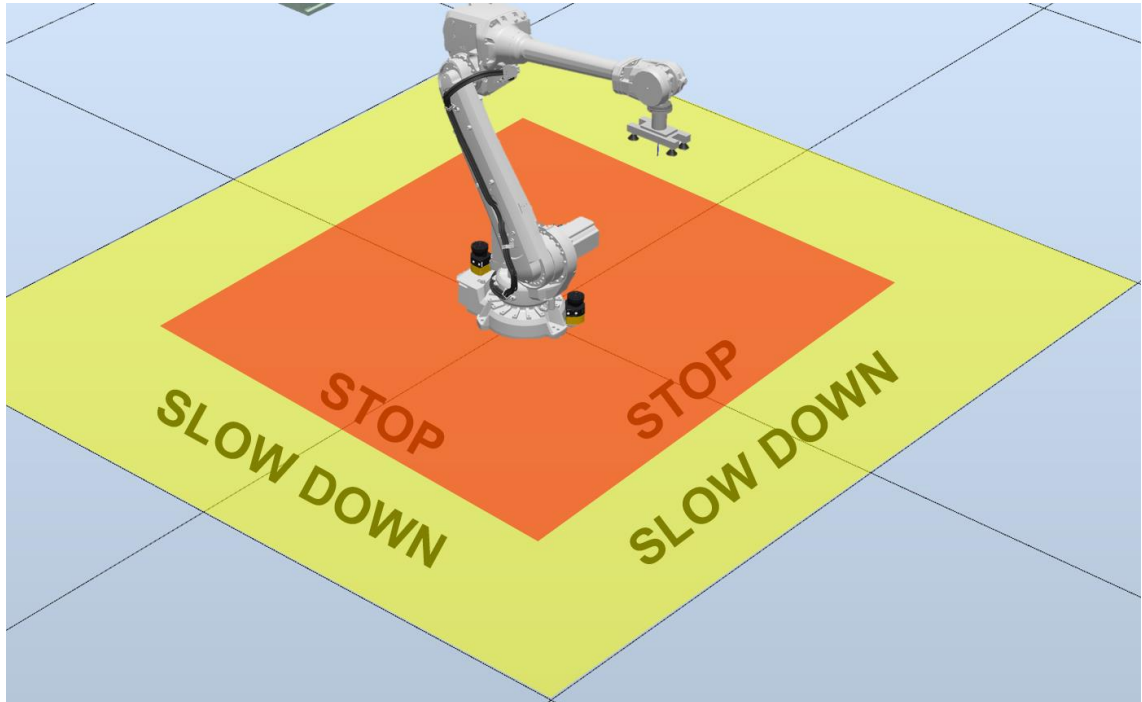
Kuva 1. ABB 14000-0.5/0.5 YuMi, ABB:n valmistama yhteistyörobotti.

Koska yhteistyörobotit tekevät ihmisten kanssa läheistä yhteistyötä, on niiden turvallisamisessa käytettävien keinojen oltava monipuolisia: yksittäisiin niveliin ja akseleihin kohdistuvia voimia valvotaan eri keinoin ja asetetun raja-arvon ylittyessä on seurauksena turvapysäytys. Valvonnassa käytetään usein voima-antureita tai esimerkiksi moottorissa kulkevan virran seuranta, jonka perusteella robotti laskee siihen kohdistuvia voimia. Lisäksi robotin ulkokuorta voidaan pehmustaa tyynyillä ja ulkokuoren muotoilussa voidaan välttää teräviä muotoja.

2.1.2 Aidattomat teollisuusrobotit

Kun tila on vähissä ja robotilta vaaditaan kuitenkin ulottuvuutta ja kuormankantokykyä, voidaan avuksi ottaa aidaton teollisuusrobotti (kuva 2). Aidattomat teollisuusrobotit mahdollistavat ihmisen ja robotin välisen yhteistoiminnan keskiraskaassa ja raskaassa tuotannossa, mutta ne tuovat myös työturvallisuuden liittyviä haasteita: teollisuusrobotit käsittelevät raskaampia työkuormia, jolloin törmäys ihmiseen on merkittävä vaaratilanne [3, s.18].

Aidattomissa teollisuusroboissa turvajärjestelmät ovat dynaamisia, eli valvottavat ominaisuudet, kuten robotin liikenopeus ja sallittu liikealue, muuttuvat operaattorin sijainnin mukaan. Robotin nopeus siis alenee ja sallittu liikealue pienenee, kun robottia lähestytään, ja riittävän lähelle



Kuva 2. Yksinkertainen esimerkki aidattomasta teollisuusrobotista simulointiympäristössä.

Eräs suurimmista haasteista teollisuusrobotin turvalliselle käytölle yhteistoiminnassa on robotin hidas pysähtyminen ja siitä aiheutuva pitkä pysähtymismatka. Robotin nopeus on ratkaisevassa asemassa, kun tarkastellaan ihmisen ja robotin välistä yhteistyötä sekä siihen läheisesti liittyvää robotin servomoottoreiden pysäytystä. Servopysäytyksessä virransyöttö servomoottoreille säilytetään ja ohjausjärjestelmä valvoo, että robotti pysyy paikallaan. [3, s. 19.]

Mikäli robotti liikahtaa servopysäytyksen aikana, järjestelmä aktivoi suojauspysäytyksen.

Servopysäytys on robotin nopean uudelleenkäynnistyksen kannalta olennainen toiminto. Sitä käytetään dynaamisissa turvajärjestelmissä hätäpysäytyksen tai suojauspysäytyksen sijasta, sillä vaikka ne pysäyttäisivät robotin nopeammin, rajataan ne hitaamman uudelleenkäynnistyksen taakia kokonaan hätä- ja vikatilanteisiin. [3, s. 19.]

2.1.3 Palvelurobotit

Palvelurobotit ovat nimensä mukaisesti robotteja, jotka on tarkoitettu palvelemaan ihmistä. Ne auttavat ihmisiä suorittamalla esimerkiksi vaarallisia tai monotonisia työtehtäviä ja vapauttavat täten ihmisen tekemään töitä, jotka vaativat keskittymistä ja tarkkuutta, tai eivät muuten sovellu robotin tehtäviksi. Palvelurobotteja käytetään useilla eri aloilla terveydenhuollon ja lääketieteen avustavista tehtävistä aina sota- ja avaruusteollisuuteen [4].

2.2 Yleisiä työtehtäviä yhteistyöroboteille

Yhteistyöroboteille sopivia työtehtäviä löytyy erityisesti prosessi- ja kappaletavara-automaation parista. Lajittelun ja materiaalinkäsittelyn lisäksi ne ovat hyödyllisiä erilaisten työstökoneiden hoitajina, sillä niiden avulla tuotantoa voidaan tehostaa ja tuotannon töiden monotonisesta luonteesta johtuvia, työntekijöihin kohdistuvia turvallisuusriskejä saadaan poistettua.

Tanskalainen yhteistyöroboteja valmistava yritys Universal Robots on listannut valmistamilleen yhteistyöroboteille soveltuvia työtehtäviä verkkosivuillaan [5]:

- kokoonpano
- liimaus/maalaus/tiivistäminen
- hionta/kiillotus
- koneenhoitaminen
- materiaalinkäsittely
- koneistus, purseenpoisto
- laaduntarkastus
- hitsaus.

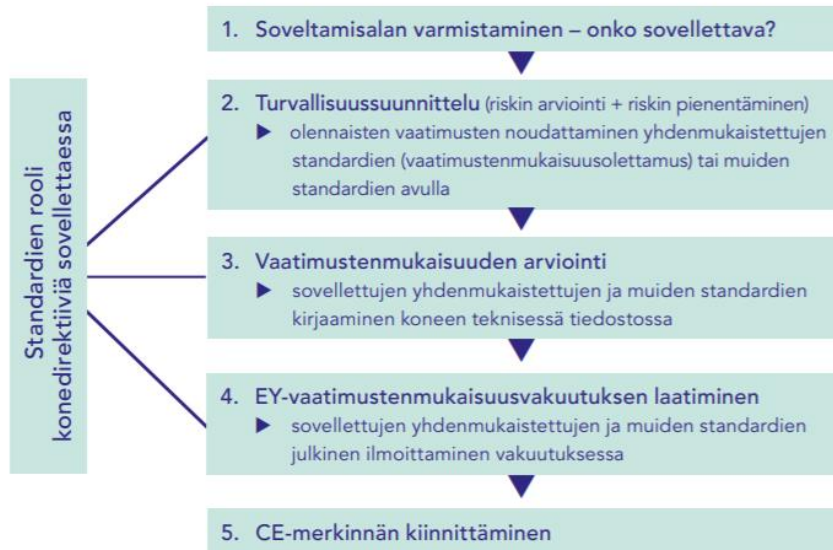
2.3 Tulevaisuuden näkymiä

Interact Analysisin [6, s. 1] julkaiseman ennusteen mukaan yhteistyörobottien myynti tulee kasvamaan ja vuonna 2027 niiden markkinaosuus tulee olemaan 30 % koko maailmassa myytävistä roboteista. Materiaalinkäsittely, kokoonpano ja pick & place -tehtävät tulevat olemaan kolme yleisintä työtehtävää yhteistyöroboteilla: vuonna 2018 nämä tehtävät ja niistä saatavat tulot muodostivat 75 % kokonaisuuden maailmanlaajuisesti, mutta teknologian kehittyessä ja uusien sovellusten tullessa markkinoille arvioi IA tämän osuuden putoavan viisi prosenttiyksikköä vuoteen 2023 mennessä. [6, s. 1.]

IA:n ennusteen mukaan myös yhteistyörobottien käyttö muissa kuin teollisissa sovelluksissa tulee lisääntymään tulevina vuosina. Esimerkiksi biotieteiden, logistiikan ja matkailun parissa yhteistyörobottien käytölle voisi olla potentiaalia, sillä näillä aloilla robotit voitaisiin ottaa helposti käyttöön ja ne sopisivat moniin erilaisiin tehtäviin. [6, s. 1.]

3 Turvallistaminen robotiikassa

Koska työturvallisuus ja toiminnallinen turvallisuus ovat keskiössä robottijärjestelmiä ja -soluja suunniteltaessa, on suunnittelu tehtävä täysin kansainvälisten standardien ja määräysten mukaisesti. Konedirektiivin määritelmien mukaan robotit ovat niin kutsuttuja puolivalmisteita, koska robotti ei kykene sellaisenaan suorittamaan erityistä toimintoa. Vasta kun robotti integroidaan osaksi robottijärjestelmää, tulee järjestelmästä konedirektiivin alainen kone, jolloin sitä koskevat kaikki konedirektiivissä esitetyt koneita koskevat määräykset ja olennaiset terveys- ja turvallisuusvaatimukset. Vaatimustenmukaisuus voidaan osoittaa kuvan 3 mukaisesti soveltamalla konedirektiivin kanssa harmonisoituja standardeja ja CE-merkitsemällä suunniteltu järjestelmä. Standardin ISO 10218-1:2011 mukaisesti robotit eivät yksinään ole riittävän turvallisia yhteistoi-
mintaan, sillä ne ovat vain robottijärjestelmän komponentteja [7, s. 36].



Kuva 3. Konedirektiivin soveltamisen askeleita [8, s.7].

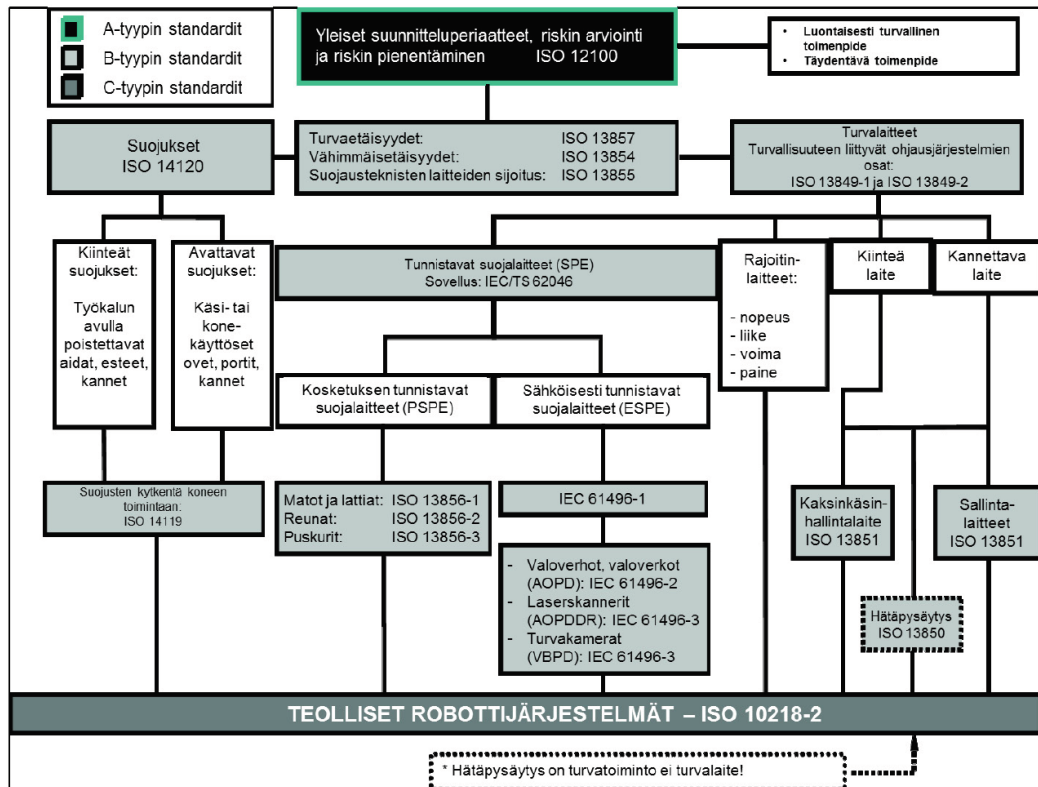
Teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066:2016 on esitelty vaatimukset yhteistyöhön tarkoitettujen robottijärjestelmien suunnittelulle. Suunnitteluvaatimukset kattavat riskien arvioinnin ja vaarojen tunnistamisen ja yleisten vaatimusten lisäksi myös vaatimukset ohjausteknisiltä ratkaisuilta, yhteistoiminta-alueelta, yhteistoimintasovelluksilta sekä yhteistyörobottien toiminnallisuudelta. Vaatimukset pohjautuvat pääosin muissa robotteja ja robottijärjestelmiä koskevissa standardeissa esiintyviin vaatimuksiin.

3.1 Robottien turvallisuutta koskevat standardit

Koneturvallisuuden ja robotiikan standardien lähtökohtana EU-alueella on aina EU:n konedirektiivi 2006/42/EY. Konedirektiivi harmonisoi kaikkia säädöksiä, jotka koskevat Euroopan unionin/ETA-alueen ensimmäistä kertaa markkinoille saatettavia tai käyttöön otettavia koneita. Yleiset koneiden suunnittelussa käytettävät turvallisuusvaatimukset löytyvät konedirektiivin liitteestä 1, ja turvallisuusvaatimusten tarkemmat tekniset ratkaisut kuvataan koneturvallisuuden standardeissa. [8, s. 2.]

Konedirektiivi koskee varsinaisten koneiden ja koneyhdistelmien lisäksi myös ketjuja, köysiä ja vöitä, jotka ovat nostamiseen tarkoitettuja, turvakomponentteja, nostoapuvälineitä, nivelakseleita sekä osittain valmiita koneita [8, s. 3].

Suomessa konedirektiivi on saatettu voimaan valtioneuvoston koneasetuksella 400/2008. Koneasetusta ja konedirektiiviä nykymuodossaan on täytynyt soveltaa 29.12.2009 alkaen. [8, s. 3.] Koneturvallisuuden standardeille on olemassa kolmiportainen hierarkia: A-, B- ja C-tyyppin standardit, joiden välisiä suhteita esitellään kuvassa 4. Hierarkia on määritelty standardissa SFS-EN ISO 12100:2010, joka on niin sanottu turvallisuuden perusstandardi ja ainoa A-tyyppin standardi. Siinä esitellään koneturvallisuudelle perusteet, yleiset suunnitteluperiaatteet sekä näkökohdat, joita voidaan soveltaa mihin tahansa koneeseen. [8, s. 3.]



Kuva 4. Turvalaitteisiin liittyvien standardien väliset suhteet [12, s. 53].

ISO 12100 sisältää tarvittavat perusteet vaarojen tunnistamiseen, vaaroista aiheutuvien riskien arvioimiseen sekä peruseriaatteet riskien pienentämiseen ja tärkeimmät käytettävissä olevat tekniset periaatteet. Se kuvaa myös periaatteet koneiden riskinarvioinnille, ja esittää hyväksyttävän tavan konedirektiivin edellyttämän pakollisen riskin arvioinnin suorittamiseksi ja dokumentoimiseksi. [8, s. 11.] Lisäksi se esittelee kolmiportaisen, konedirektiivin vaatiman suunnittelumetodin:

1. Luontaisesti turvalliset suunnittelutoimenpiteet

Luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä poistetaan vaaroja tai pienennetään riskejä itse koneen rakenteen ominaisuuksien sopivalla valinnalla ja/tai altistuneiden henkilöiden ja koneen vuorovaikutustavan avulla. Vaarojen poistaminen ja täten myös suojausteknisten tai täydentävien suojaustoimenpiteiden tarpeen eliminointi on mahdollista ainoastaan tässä vaiheessa. [9, s. 52.] Tarkempia ohjeita: SFS-EN ISO 12100:2010, 6.2.

2. Suojaustekniset toimenpiteet ja/tai täydentävät suojaustoimenpiteet

Mikäli vaaran poistaminen tai siihen liittyvän riskin pienentäminen ei ole mahdollista luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä käyttämällä, voidaan riskin pienentämiseksi käyttää sopivia suojausteknisiä toimenpiteitä ja täydentäviä toimenpiteitä huomioimalla koneelle tarkoitettu käyttö sekä kohtuudella ennustettavissa oleva väärinkäyttö. [9, s. 52.] Tarkempia ohjeita: SFS-EN ISO 12100:2010, 6.3.

3. Käyttöä koskevat tiedot

Mikäli jo toteutettujen luontaisesti turvallisten suunnittelutoimenpiteiden, suojausteknisten toimenpiteiden ja täydentävien suojaustoimenpiteiden jälkeen riskejä on edelleen jäljellä, on jäännösriskit yksilöitävä käyttöä koskevissa tiedoissa. Käyttöä koskeviin tietoihin on sisällytettävä ainakin seuraavat seikat:

- koneen käyttöön liittyvät toimintamenettelyt, jotka vastaavat konetta käyttävän henkilöstön tai muiden koneeseen liittyville vaaroille mahdollisesti altistuvien henkilöiden odotettuja kykyjä
- riittävästi kuvatut suositeltavat turvalliset työmenetelmät sekä niitä koskevat koulutusvaatimukset, jotka liittyvät koneen käyttöön
- riittävästi erilaista tietoa sekä varoituksia esimerkiksi koneen elinkaaren eri vaiheissa esiintyvistä jäännösriskeistä

- kuvaukset kaikista suositelluista henkilönsuojaimista mukaan lukien yksityiskohtaiset tiedot niiden tarpeesta sekä käyttöön liittyvät koulutustarpeet.

Käyttöä koskevilla tiedoilla ei saa korvata luontaisesti turvallisten suunnittelutoimenpiteiden, suojausteknisten toimenpiteiden tai täydentävien suojaustoimenpiteiden oikeaa soveltamista [9, s. 52].

Suojausteknisillä toimenpiteillä tarkoitetaan standardin ISO 12100:2010, 3.21 mukaisesti suojaustoimenpiteitä, joissa suunnittelija käyttää suojausteknisiä laitteita suojaamaan henkilöitä vaaroilta, joita ei voida kohtuudella poistaa, tai riskeiltä, joiden riittävä pienentäminen ei ole mahdollista luontaisesti turvallisilla suunnittelutoimenpiteillä käyttämällä. Niiden avulla koneille luodaan turvallisuuteen liittyviä ohjausjärjestelmän osia, joiden tehtävänä on turvatoimintojen toteuttaminen. [9, s. 16.]

Turvatoiminnolla tarkoitetaan sellaista koneen toimintoa, jonka vikaantuminen voi aiheuttaa välittömän riskin tai riskien kasvamisen [9, s. 22]. Jokaiselle turvatoiminnolle on määriteltävä standardin ISO 13849-1:2015, 4.5 mukaisesti suorituskyky/suoritustaso (PL) tai standardin IEC 62061 liitteen A mukainen turvallisuuden eheyden taso (SIL). Turvatoiminnon suorituskyvyille on lisäksi määriteltävä tavoitetaso sen toteutusta varten, ja jokaiselle turvatoiminnolle on suoritettava verifiointi ja validointi. Verifiointilla varmistetaan, että tavoiteltu suorituskyky on saavutettu, ja validoinnilla varmistetaan toteutuksen soveltuvuus sille suunniteltuun käyttöön.

B-tyyppin standardit jaetaan kahteen osaan: B1-tyyppin standardeissa esitettävät määräykset ja ohjeistukset koskevat tiettyjä yksittäisiä turvallisuusnäkökohtia, kuten vaikkapa turvaetäisyyksiä tai melua. B2-tyyppin standardit käsittelevät suojausteknisiä laitteita ja niitä koskevia ohjeistuksia ja määräyksiä. Suojaustekninen laite voi olla esimerkiksi fyysinen suojaus, kosketuksen tunnistava laite tai käsin ohjattavan robotin hallintalaite.

C-tyyppin standardeissa käsitellään jonkin tietyn koneen, tai koneryhmän turvallisuusvaatimuksia yksityiskohtaisesti. Koneryhmällä tarkoitetaan koneita, joiden tarkoitettu käyttö, vaarat, vaaratilanteet ja vaaralliset tapahtumat ovat identtisiä. [8, s. 5.]

Käytännön suunnittelutilanteessa tulisi aina selvittää ensin, onko suunniteltavaa konetta koskevaa C-tyyppin standardia olemassa. Mikäli sellainen on olemassa, se useimmiten ohjaa viittausten avulla mitä B-tyyppin standardeja suunnittelussa tarvitaan sekä mitä A- ja B-tyyppin standardien vaatimuksia on noudatettava C-tyyppin standardin vaatimusten lisäksi. C-tyyppin standardien vaatimukset ovat aina B-tyyppin standardien vaatimuksiin nähden ensisijaisia. [8, s. 5.]

Robotteja, robotiikkalaitteita sekä robottijärjestelmiä yleisesti koskevien standardien lisäksi teollisuusroboteille ja yhteistyöroboteille on olemassa omia erityisiä standardejaan, joissa käsitellään yksityiskohtaisemmin niitä koskevia turvallisuus- ja suunnitteluvaatimuksia.

3.1.1 Konedirektiivi

Konedirektiivin mukaan teollisuusrobotit itsessään ovat niin sanottuja puolivalmisteita, mikäli robotin valmistaja saattaa robotin markkinoille täsmentämättä sen käyttötarkoitusta. Tällöin jokin muu taho (usein integraattori) toimii koneyhdistelmän valmistajana yhdistäessään robotin osaksi jotakin järjestelmä ja vastaa tällöin myös koko koneyhdistelmän turvallisuudesta, CE-merkinnästä sekä vaatimustenmukaisuudesta. Mikäli robotti taas valmistetaan jotakin tiettyä käyttötarkoitusta (esimerkiksi hitsausrobotti) varten, toimitetaan robotti markkinoille valmiina koneena, ja tällöin robotin valmistaja vastaa sen turvallisuudesta, CE-merkinnästä ja vaatimustenmukaisuudesta. [10, s. 28.]

3.1.2 Yhteistyörobotit

Yhteistyöroboteihin ja teollisuusroboteihin sovelletaan pääasiassa täysin samoja standardeja. Niin kutsutun turvallisuuden perusstandardin (ISO 12100) lisäksi yhteistyöroboteihin sovelletaan erityisesti teollisille robottijärjestelmille ja teollisuusroboteille tarkoitettuja standardeja (ISO 10218-1 ja 10218-2).

Vuonna 2016 julkaistiin standardeja ISO 10218-1 ja ISO 10218-2 tukeva, yhteistyöroboteja yksityiskohtaisesti koskeva tekninen spesifikaatio ISO/TS 15066. Se toi mukanaan yhteistoimintasovellusten suunnittelun kannalta merkittäviä uudistuksia: ihmisen ja robotin välisille kontakteille

määriteltiin kontaktityypit, ja kontaktitilanteissa syntyville voimille ja paineille määriteltiin biomekaaniset raja-arvot. Uudistusten myötä yhteistoimintasovellukset on voitu suunnitella entistäkin tehokkaammiksi ja robotin sekä ihmisen välisestä yhteistyöstä on voitu tehdä läheisempää.

Yhteistoiminta robottien kanssa kehittyy kuitenkin jatkuvasti. Esimerkiksi edellä mainitut biomekaaniset raja-arvot perustuvat suppeaan sekä muista tieteenaloista sovellettuun tutkimusdataan, ja niiden odotetaan muuttuvan tulevaisuudessa lisätutkimusten ja tutkimusdatan myötä [11, s. 25].

3.1.3 Teollisuusrobotit

Teollisuusrobotteja koskevat erityisesti standardien ISO 10218-1 ja ISO 10218-2 määräykset ja ohjeet. ISO 10218-1 käsittelee robotin turvallisuuden varmistamista sen suunnittelulla ja rakenteella. Siinä käsitellään yleisten suojaustoimenpiteiden sekä suunnittelu- tai turvallisuusvaatimusten lisäksi niiden todentamista ja vahvistamista sekä robotin käyttöä koskevia tietoja. [7, s. 8.]

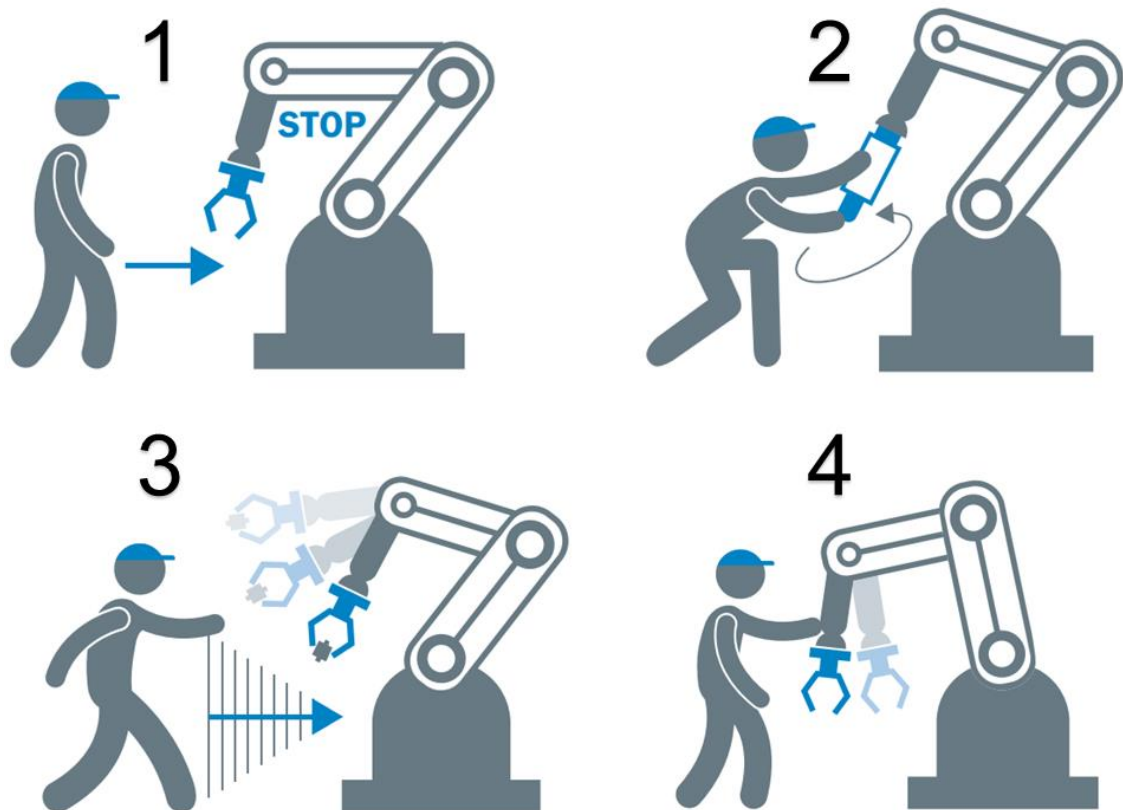
ISO 10218-2 [12, s.8] esittelee ohjeistuksia henkilöiden turvallisuuden varmistamiseksi sen aikana, kun robottijärjestelmää

- liitetään yhteen
- asennetaan
- testataan toiminnallisesti
- ohjelmoidaan
- käytetään
- kunnossapidetään
- korjataan.

Lisäksi teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 ohjeistuksia voidaan soveltaa myös teollisuusrobotteihin, jolloin niitä voidaan käyttää yhteistyörobotteina.

3.2 Yhteistoimintaa koskevat vaatimukset ja yhteistyörobottien eri käyttötavat

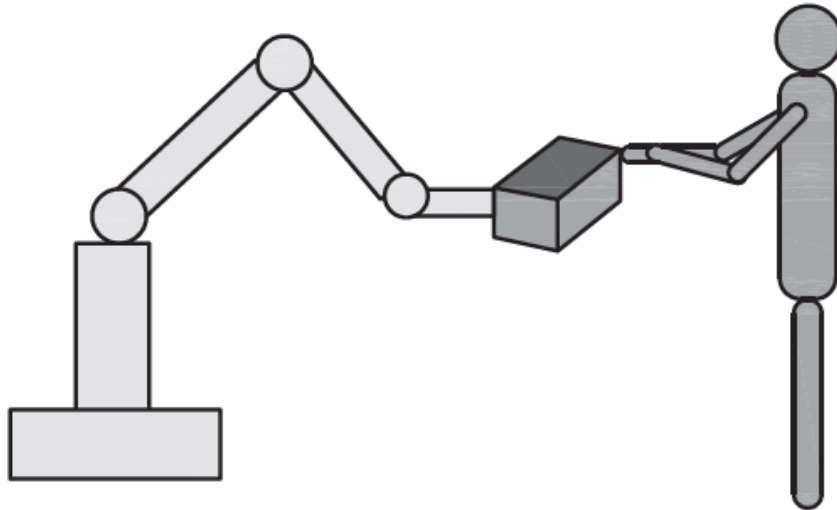
Yhteistoimintaa koskevalla vaatimuksella tarkoitetaan standardeissa ISO 10218-1, 10218-2 ja ISO 15066-1 yhteistoimintaa varten suunnitelluille robottijärjestelmille määriteltyjä vaatimuksia, tai yksinkertaisemmin ilmaistuna yhteistoiminnan eri muotoja (kuva 5). Robottien on noudatettava näistä yhtä tai useampaa, minkä lisäksi roboteissa on oltava näkyvästi esillä oleva osoitus kyseisen robotin olemisesta yhteistoiminnassa (kuva 6).



Kuva 5. Yhteistyörobottien eri käyttötapoja kuvallisesti esitettynä [mukaiillen 26, s.6].

Vaatimusten määrittelystä ja täyttämisestä vastaa integraattori. Integraattorilla tarkoitetaan tahoja, joka suunnittelee, toimittaa, valmistaa tai kokoonpanee robotti- tai valmistusjärjestelmän koneyhdistelmän. Lisäksi se vastaa turvallisuusstrategiasta, johon kuuluvat valvonnan rajapinnat, kytkennät sekä toimenpiteet, joilla suojataan ohjausjärjestelmä. Integraattori voi olla esimerkiksi insinööri-toimisto, valmistaja, kokoonpanija tai käyttäjä. [12, s. 9.]

Yhteistoiminnalla tarkoitetaan erityistä ihmisen ja robotin välistä toimintaa, jossa robotti ja operaattori jakavat yhteisen työtilan. Yhteistoiminta sallitaan vain roboteilla, joiden ominaisuudet on suunniteltu standardin ISO 10218-1 mukaisesti erityisesti yhteistoimintaan, eikä yhteistoimintaa voida käyttää kuin ainoastaan etukäteen määritetyissä tehtävissä kaikkien vaadittavien turvallisuustoimenpiteiden ollessa aktiivisina. [12, s. 38.]



Kuva 6. ISO 10218-2:2011 mukainen suositus yhteistoimintaa varten järjestetystä robotista ilmoittavasta kilvestä [12, s. 39].

Operaattorin turvallisuutta varten on järjestettävä toimenpiteitä, jotka ovat jatkuvasti toiminnassa. Yleiset vaatimukset yhteiselle työtilalle sisältävät useita vaatimuksia, jotka on täytettävä:

- a) Integraattorin on suoritettava standardissa ISO 10218-2:2011, 4.3 kuvattu riskin arviointi, jossa on tarkastettava kaikki yhteistoimintatehtävät ja -tilat vähintään seuraavien kohtien osalta:
 - 1) robotin fysikaaliset ominaisuudet (esimerkiksi kuorma, nopeus, kiihtyvyys, voima)
 - 2) toimilaitteen ja/tai työkappaleen aiheuttamat vaarat. Vaaroja ovat esimerkiksi terävät reunat, ulokkeet ja työkalun vaihtajalla työskenteleminen.
 - 3) robottijärjestelmän sijoittelu

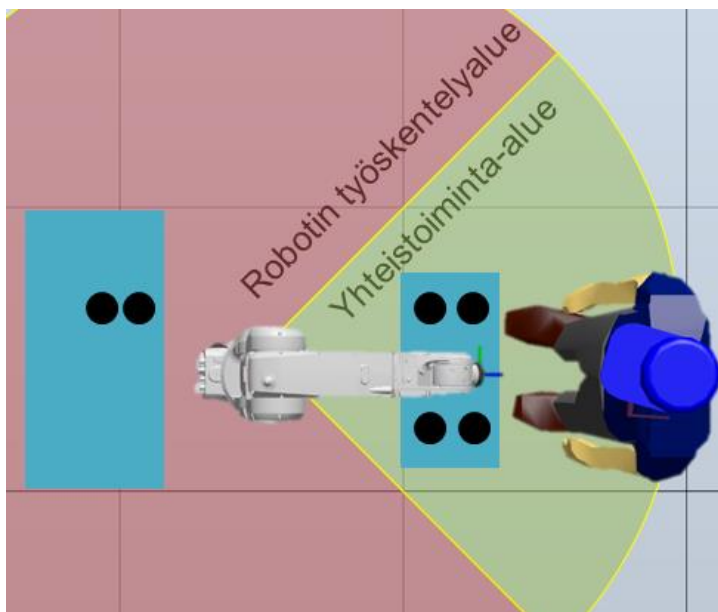
- 4) käyttäjän sijainti robotin varren läheisyyteen nähden (esimerkiksi työskentely robotin osien alla estetty)
 - 5) käyttäjän sijainti ja liikkumisreitti osien sijoitteluun, rakenteiden hahmottamiseen ja kiinnittimien vaarojen sijaintiin nähden.
 - 6) kiinnittimien ja tarraimien toteutus, sijoittelu ja toiminta sekä toimintaan liittyvät vaarat
 - 7) käsikäyttöisten robottien ohjainten sijoitus ja toteutus
 - 8) vaarat, jotka riippuvat robotin tekemän työn luonteesta (esimerkiksi kipinät, roiskeet, mahdollinen työkappaleen irtoaminen)
 - 9) pakollisten henkilönsuojaimien käytöstä johtuvat rajoittavat tekijät
 - 10) olosuhteista johtuvat tekijät, kuten esimerkiksi kemikaalit, radioaallot tai säteily
 - 11) suoritustasokriteerit (PL/SIL) tähän liittyville turvatoiminnoille.
- b) Yhteistoiminta-alueella olevien ja työskentelevien robottien on täytettävä standardin ISO 10218-1 vaatimukset.
 - c) Henkilöiden havaitsemiseen käytettävien turvalaitteiden on täytettävä standardin ISO 10218-2:2011, 5.2.2 vaatimukset.
 - d) Yhteistoiminta-alueella käytettävien lisäturvalaitteiden on täytettävä ISO 10218-2:2011, 5.2 vaatimukset.
 - e) Järjestelmän on kyettävä pysäyttämään robotti ja estämään kaikki ihmiseen kohdistuvat vaarat suojattuun tilaan tullessa ja järjestelmän turvalaitteet on suunniteltava siten, että ne kykenevät estämään tai havaitsemaan jokaisen yhteistoiminta-alueen ulkopuolelta suojattua tilaa lähestyvän ihmisen.

- f) Jokainen yhteistoimintatilan ulkopuoliselle osuudelle suojattuun tilaan pääsy on kyettävä estämään tai havaitsemaan ympäröivällä turvallisuustoimenpiteellä.
- g) Muiden yhteistoiminta-alueelle kuuluvien robottijärjestelmään liitettyjen tai yhdistettyjen mahdollisesti vaarallisten koneiden turvallisuuteen liittyvien toimintojen on oltava vähintään ISO 10218-2:2011, 5.2 mukaisia. [12, s. 38–39.]

3.2.1 Turvaluokiteltu valvottu pysäytys

Turvaluokitellussa valvotussa pysäytyksessä robotin liike pysäytetään ennen kuin operaattori tulee alueelle, jolla robotti ja ihminen työskentelevät yhdessä (kuva 7). Jotta robottia voitaisiin käyttää yhteistoiminnassa turvaluokitelluilla valvotuilla pysäytystoiminnoilla, on sen täytettävä seuraavat edellytykset [13, s. 8–9]:

- a) Kun robotin akseleiden liikkeitä rajoitetaan, täytyy rajoitusten olla standardin ISO 10218-1:2011, 5.12 mukaisia.
- b) Robotti on varusteltava niin, että se täyttää standardin ISO 10218-1:2011, 5.5.3 vaatimukset suojauspysäytykselle.



Kuva 7. Esimerkki robotin ja operaattorin työskentelyalueista.

Yhteistoiminta-alueen turvaetäisyydet on suunniteltava standardin ISO 13855 mukaisesti. Robotisolu on varusteltava turvaluokitelluilla turvalaitteilla, jotka havaitsevat operaattorin yhteistoiminta-alueella ja pääsy yhteistoiminta-alueen ulkopuoliselle robotin työskentelyalueelle on estettävä riskinarvioinnissa määritellyillä menetelmillä. [13, s. 8.]

Taulukon 1 mukaista turvaluokiteltua valvottua pysäytystoimintoa käytettäessä operaattori saa tulla yhteistoiminta-alueelle ainoastaan jonkin seuraavista ehdoista ollessa voimassa:

- Kun robotti, tai vaihtoehtoisesti muu vaaraa aiheuttava laite/kone ei ole yhteistoiminta-alueella.
- Kun robotti on yhteistoiminta-alueella standardin ISO 10218-1:2011, 5.4 mukaisessa turvaluokitellusti valvotussa, kategorian 2 pysäytystilassa. Pysäytystoiminnon on pysyttävä aktiivisena niin kauan, kun operaattori on yhteistoiminta-alueella.
- Kun robotti on yhteistoiminta-alueella standardin ISO 10218-1:2011, 5.4 ja 5.5.3 mukaisesti suojauspysäytettynä.

Taulukko 1. Totuustaulu turvaluokiteltuja valvottuja pysäytystoimintoja varten. [13, s. 8].

Robotti liikkeessä/pysäytettynä		Operaattorin sijainti suhteessa yhteistoiminta-alueeseen	
		Ulkona	Sisällä
Robotin sijainti suhteessa yhteistoiminta-alueeseen	Ulkona	Jatka työskentelyä	Jatka työskentelyä
	Sisällä ja liikkeessä	Jatka työskentelyä	Suojauspysäytys (kategoria 0 tai 1)
	Sisällä, turvaluokiteltu valvottu pysäytys	Jatka työskentelyä	Jatka työskentelyä

Turvaluokiteltu valvottu pysäytystoiminto voidaan toteuttaa myös siten, että robotti hidastaa nopeuttaan päätyen lopulta standardin SFS-EN 60204-1:2018, 9.2.2 kategorian 2 mukaiseen pysäytystilaan. Robotti voi palautua pysäytystilasta ja jatkaa työskentelyä automaattisesti operaattorin poistuttua yhteistoiminta-alueelta. [13, s. 9.]

Mikäli ohjausjärjestelmä havaitsee minkä tahansa vikaantumisen pysäytystoiminnossa, on seurausena oltava standardin SFS-EN 60204-1:2018, 9.2.2 kategorian 0 mukainen pysäytys [13, s. 9].

3.2.2 Käsin ohjaaminen

Käsin ohjaamisessa operaattori on robotin kanssa yhteistoiminta-alueella ja työskentelee yhdessä robotin kanssa ohjaamalla sitä käsin haluttua reittiä pitkin. Robotin työkaluun tai sen läheisyyteen on kytketty hallintalaite (kuva 8), joka on yhteydessä robotin ohjaimen. Ennen kuin operaattori saa tulla yhteistoiminta-alueelle ohjaamaan robottia, on robotin oltava turvaluokitellussa valvotussa pysäytystilassa. Tarvittaessa robottisoluun voidaan integroida esimerkiksi valvottavia turva-alueita. Mikäli ISO/TS 15066:2016, 5.5.5 vaatimukset täytetään käsin ohjaamista suunnitellessa, eivät ISO/TS 15066:2016, 5.5.3 vaatimukset enää päde. [13, s. 9.]



Kuva 8. FANUCin valmistama hallintalaite käsin ohjaamista varten [27].

Käsin ohjattavan robotin on täytettävä seuraavat edellytykset:

Robotissa on oltava käytössä standardin ISO 10218-1:2011, 5.6.4 mukainen turvaluokiteltu työkalun keskipisteen tai akselin nopeuden valvonta. Nopeusrajoitus määritellään riskejä arvioitaessa, ja mikäli valittu rajoitus ylittyy, on seurauksena oltava suojauspysäytys. Lisäksi käytössä on oltava turvaluokiteltu valvottu pysäytystoiminto. [13, s. 9.]

Mikäli operaattorin turvallisuuden varmistaminen vaatii robotin liikeratojen valvontaa, on käytettävä standardin ISO 10218-1:2011, 5.12.3 mukaista turvaluokiteltua akseleiden ja tilan ohjelmallista rajoittamista [13, s. 9].

Käsin ohjaaminen tapahtuu vaiheittain alla olevan kuvauksen mukaisesti:

- 1) robotti on valmiina käsin ohjaamiseen sen tultua yhteistoiminta-alueelle, jolloin turvaluokiteltu valvottu pysäytystoiminto aktivoituu ja operaattori voi tulla yhteistoiminta-alueelle
- 2) operaattori ottaa robotin hallintaan, turvaluokiteltu valvottu pysäytys poistuu käytöstä ja operaattori suorittaa tarvittavat tehtävät yhdessä robotin kanssa
- 3) hallintalaite vapautetaan tehtävien jälkeen, jolloin turvaluokiteltu valvottu pysäytys aktivoituu uudelleen
- 4) operaattori poistuu yhteistoiminta-alueelta, ja robotti voi jatkaa automaattista työskentelyä keskeytyksettä.

Mikäli robotti ei ole valmiina käsin ohjaamiseen ja operaattori tulee yhteistoiminta-alueelle, on seurauksena oltava suojauspysäytys. Pääsy yhteistoiminta-alueen ulkopuoliselle robotin työskentelyalueelle on estettävä riskienarvioinnin mukaisesti.

Hallintalaite on varusteltava standardin ISO 10218-1:2011, 5.5.2, 5.8.3 ja 5.8.4 mukaisesti hätäpysäytystoiminnolla ja sallintalaitteella. Hätäpysäytys on pakollinen, mutta sallintalaite voidaan jättää pois tiettyjen ehtojen täytyessä. [13, s. 7.]

Hallintalaitteen sijoittelussa on otettava huomioon seuraavat asiat:

- a) operaattorin sijainti robottiin nähden. Hallintalaitetta käyttävän henkilön on kyettävä valvomaan robotin liikkeitä esteettömästi, jotta niistä johtuvat mahdolliset vaaratilanteet voidaan havaita ajoissa ja välttää
- b) operaattorin sijainti ja asento eivät saa altistaa uusille vaaratilanteille
- c) operaattorin on nähtävä koko yhteistoiminta-alue esteettömästi robotin kanssa työkennellessä. [13, s. 10.]

Robotin ohjaamisen on oltava helposti hallittavaa ja intuitiivista hallintalaitetta käytettäessä. Lisäksi hallintalaitteohjauksen ja robotin liikeakseleiden väliset yhteydet on esitettävä selkeästi niin, että ne ovat helposti ymmärrettävissä. [13, s. 10.]

Siirtyminen käsin ohjaamisesta muihin käyttötapoihin tai kokonaan pois yhteistoiminnasta ei saa aiheuttaa ylimääräisiä riskejä operaattorille. Operaattorin on hallittava siirtymisiä ja robotin liikkeitä siirtymisten aikana esimerkiksi hallintalaitteen avulla ja yhteistoiminta-alueelta poistumalla. [13, s. 10.]

Siirtymistilanteissa on huomioitava erityisesti seuraavat asiat:

- a) robotin liikkeiden pysähtymisestä ja turvaluokitellun valvotun pysähtymisen aktivoitumisesta ei saa aiheutua ylimääräisiä vaaratilanteita
- b) siirtymisestä turvaluokitellusta valvotusta pysähtymisestä käsin ohjaamiseen ei saa aiheutua odottamattomia liikkeitä
- c) yhteistoiminta-alueen on oltava tyhjä käsin ohjaamisen jälkeen ennen kuin robotti voi siirtyä pois yhteistoiminnasta
- d) siirtyminen takaisin yhteistoimintaan ja edelleen käsin ohjaamiseen ei saa aiheuttaa ylimääräisiä vaaratilanteita. [13, s. 10.]

Riskejä voidaan vähentää yhdistelemällä operaattorin tekemää liikkeiden suoraa ohjausta sekä sopivia riskiarvioituja turvaluokiteltuja paikka- ja nopeusrajoituksia. Riskienarvioinnissa on kiinnitettävä huomiota erityisesti

- a) robotin liikenopeuksien turvaluokiteltuun valvontaan
- b) aikaan ja matkaan, jonka roboti tarvitsee pysähtyäkseen operaattorin päästettyä irti saltilaitteesta tai suojauspysäytyksen aktivoitumisesta
- c) työkalusta, työkalusta, tai muista oheislaitteista aiheutuviin vaaroihin. [13, s. 10.]

3.2.3 Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta

Liikenopeuksien sekä operaattorin ja robotin välisen vähimmäisetäisyyden valvonnalla mahdollistetaan robotin ja operaattorin samanaikainen työskentely yhteistoiminta-alueella. Riskin vähentäminen toteutetaan säilyttämällä tietty vähimmäisetäisyys robotin ja ihmisen välillä kaikilla ajan hetkillä. [13, s. 10.]

Mikäli robotin ja operaattorin välinen etäisyys laskee alle määritellyn vähimmäisarvon, on robotin pysähdyttävä. Roboti voi kuitenkin jatkaa liikettä automaattisesti, kun etäisyys palautuu määriteltyyn vähimmäisarvoon. Vähimmäisetäisyyteen vaikuttaa myös robotin liikenopeus, joten nopeuden pienentyessä pienenee myös vähimmäisetäisyys. [13, s. 11.]

Jotta etäisyyden ja nopeuden valvontaa voidaan käyttää turvallisemman yhteistoiminnassa, on roboti varusteltava turvaluokitellusti valvotuilla nopeusrajoitus- ja pysäytystoiminnoilla. Mikäli operaattorin turvallisuuden varmistaminen vaatii robotin liikeratojen valvontaa, on käytettävä standardin ISO 10218-1:2011, 5.12.3 mukaista, turvaluokiteltua akseleiden ja tilan ohjelmallista rajoittamista. [13, s. 11.]

Nopeutta ja etäisyyttä valvovan järjestelmän on oltava suorituskyvyltään standardin ISO 10218-1:2011, 5.4 tai ISO 10218-2:2011, 5.2 mukainen. Valvontatoiminnot koskevat kaikkia yhteistoiminta-alueelle tulevia henkilöitä, ja mikäli järjestelmän suorituskyky riippuu alueella olevien henkilöiden määrästä, on määrää syytä rajoittaa. Jos henkilömäärää rajoitetaan, on määrä ilmoitettava työohjeissa, ja määrän ylittämisestä on seurattava suojauspysäytys. [13, s. 11.]

Mikäli robottijärjestelmän vaarallisen osan ja operaattorin välinen etäisyys putoaa alle vähimmäisetäisyydelle määritellyn arvon, on seurauksena oltava suojauspysäytys ja mahdollisten muiden turvatoimintojen aktivointi, kuten esimerkiksi virransyötön katkaiseminen robotin käyttämille vaarallisille työkaluille [13, s.11].

Vähimmäisetäisyyden rikkomisesta johtuvia keskeytyksiä voidaan vähentää myös ohjelmalla:

- pienennetään robotin nopeutta, kun lähestytään määriteltyä vähimmäisetäisyyttä operaattorista ja tarvittaessa siirrytään turvaluokiteltuun valvottuun pysäytykseen;
- luodaan ohjelmarutiini, joka etsii vaihtoehtoisen, vähimmäisetäisyyden ylläpitämiseen sopivan reitin kesken suoritettavaa ohjelmaa ylläpitäen nopeuden ja vähimmäisetäisyyden aktiivista valvontaa.

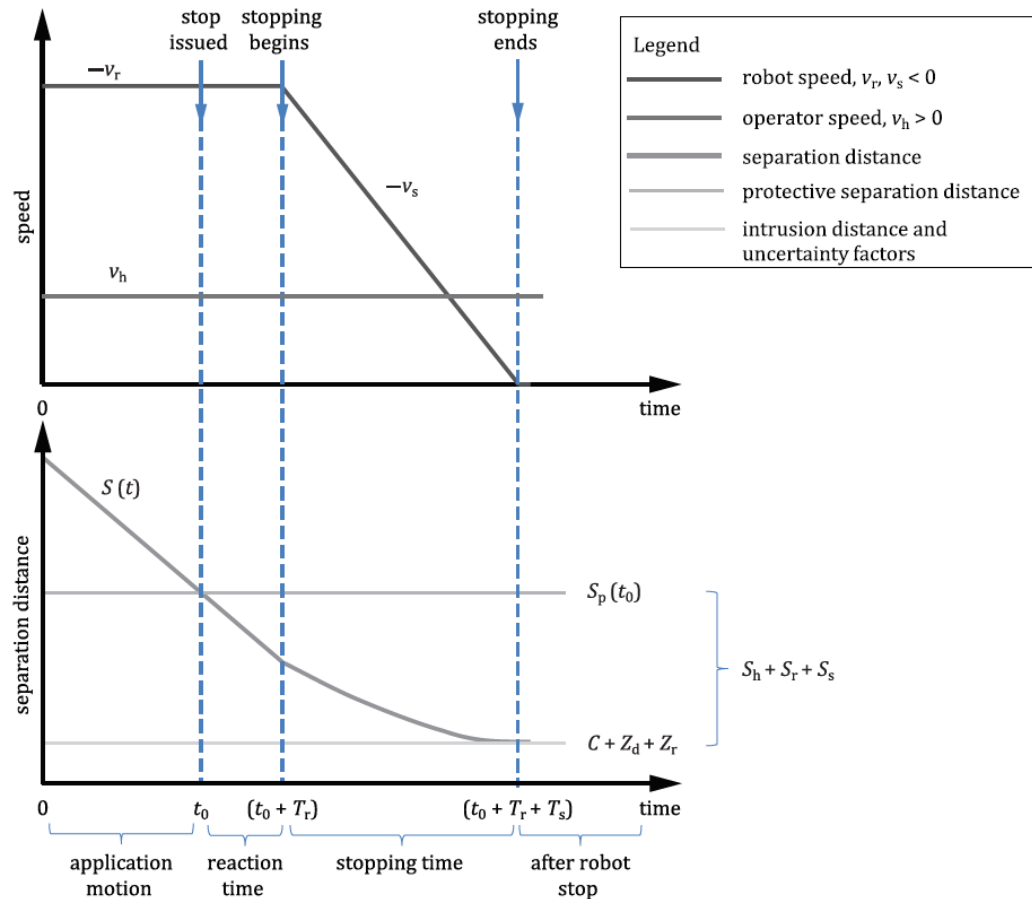
Mikäli robotti joutuu pysähtymään, voi se jatkaa liikettään pysäytyksen jälkeen automaattisesti, kun operaattori on minimissään vähimmäisetäisyyden päässä robotista [13, s. 11].

Riittävä suojaetäisyys määritellään riskejä arvioidessa. Standardissa ISO 15066-1:2016, 5.5.4 käsitellään erilaisia nopeus- ja etäisyysvalvontaan liittyviä, riskienarvioinnin kannalta olennaisia asioita, kuten eroja vakionopeudella ja muuttuvalla nopeudella liikkuvien robottien välillä.

Robottijärjestelmän vaaralliset osat, kuten esimerkiksi terävät tai nopeasti pyörivät työkalut, eivät saa tulla suojaetäisyyttä lähemmäksi operaattorista robotin liikkessa automaattisesti. Suojaetäisyys määritellään soveltamalla standardissa ISO-13855:2010, 5.2 esiintyvän vähimmäisetäisyyden yhtälön konsepteja ja muokkaamalla sitä niin, että siinä otetaan huomioon riskit, joita vähimmäisetäisyyden ja nopeuden valvonnassa esiintyy. [13, s. 11.]

Vakionopeudella liikkuville roboteille asetetaan standardin ISO 10218-1:2011, 5.6.4 mukaisesti turvaluokiteltu valvottu nopeusrajoitus, joka on asetettava pahimman riskiskenaarion mukaisesti [13, s. 11].

Dynaamisissa järjestelmissä robotin ja operaattorin nopeutta valvotaan jatkuvasti ja suojaetäisyys määrittyy tilanteen mukaan (kuva 9). Vaihtoehtoisesti robotin maksiminopeus voidaan määrittellä operaattorin nopeuden sekä robotin ja operaattorin välisen todellisen etäisyyden perusteella. Koska kyseessä on ohjausjärjestelmän turvallisuuteen liittyvä osa, on ohjaustoiminnon oltava suorituskyvyltään standardin ISO 10218-2:2011, 5.2.2 mukainen. [13, s. 12.]



Kuva 9. Graafinen esitys yllä esiteltyjen muuttujien vaikutuksesta robotin ja operaattorin väliseen suojaetäisyyteen [13, s. 15].

Robotin pysähtymismatka on määriteltävä käyttäen standardin ISO 10218-1:2011 liitettä B.

Suojaetäisyyttä S_p kuvaava yhtälö (1) voidaan kirjoittaa ajan funktiona muodossa:

$$S_p(t) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \quad (1)$$

jossa

$S_p(t)$ on suojaetäisyys ajan hetkellä t

t on tietty ajan hetki

S_h on summaustermi, jossa huomioidaan operaattorin sijainnin muutokset ajan myötä

S_r on summaustermi, jossa huomioidaan robottijärjestelmän reaktioaika

S_s on summaustermi, jossa huomioidaan robotin pysähtymismatka

C on standardissa ISO 13855 määritelty lähestymisetäisyys, eli etäisyys, jonka kehon osa voi liikkua suojausteknisen laitteen ohi vaaran suuntaan, ennen kuin laite reagoi

Z_d on operaattorin sijainnin epävarmuustekijä, joka huomioi turvalaitteen mittaasepätkätkuuden

Z_r on robotin sijainnin epävarmuustekijä, joka huomioi tarkkuuden robotin sijainnin mittaamisessa. [13, s. 12.]

Yhtälö 1 mahdollistaa suojaetäisyyden dynaamisen määrittämisen, jolloin robotin nopeus voi vaihdella työkierron aikana. Sitä voidaan kuitenkin käyttää myös vakioetäisyyden määrittämiseen, mikäli käytetään pahimman riskiskenaarion mukaisia arvoja. [13, s. 12–13.]

Summausermit S_h , S_r ja S_s voidaan kirjoittaa kaavoina 2, 3 ja 4 seuraavasti:

$$S_h = \int_t^{t+T_r+T_s} v_h(t) dt \quad (2)$$

jossa

T_r on robottijärjestelmän reaktioaika, joka sisältää operaattorin havaitsemiseen kuluvan ajan, havaintosignaalin prosessoinnin sekä robotin pysäytyksen aktivoinnin, muttei robotin pysähtymisaikaa

T_s on kulunut aika pysähtymiskäskyn aktivoinnista robotin pysähtymiseen. T_s ei ole vakioarvo, vaan se riippuu robottikonfiguraatiosta, lasketuista liikeradoista, liikenopeudesta, käytetystä työkalusta ja kuormasta

v_h on operaattorin nopeus robottijärjestelmän liikkuvan osan suuntaan yhteistoiminta-alueella. Nopeus voi olla suunnasta riippuen joko positiivinen tai negatiivinen. [13, s. 12–13.]

$$S_r = \int_t^{t+T_r} v_r(t) dt \quad (3)$$

jossa

v_r on robotin nopeus operaattorin suuntaan yhteistoiminta-alueella. Nopeus voi olla suunnasta riippuen joko positiivinen tai negatiivinen.

$$S_s = \int_{t+T_r}^{t+T_r+T_s} v_s(t) dt \quad (4)$$

jossa

v_s on robotin nopeus pysäytyskäskyn aktivoinnista robotin pysähtymiseen saakka [13, s. 13].

Kaavoja 2 ja 3 voidaan käyttää myös vakioarvojen laskemiseen [13, s. 13–14], jolloin ne kirjoitetaan uudelleen kaavoiksi 5 ja 6:

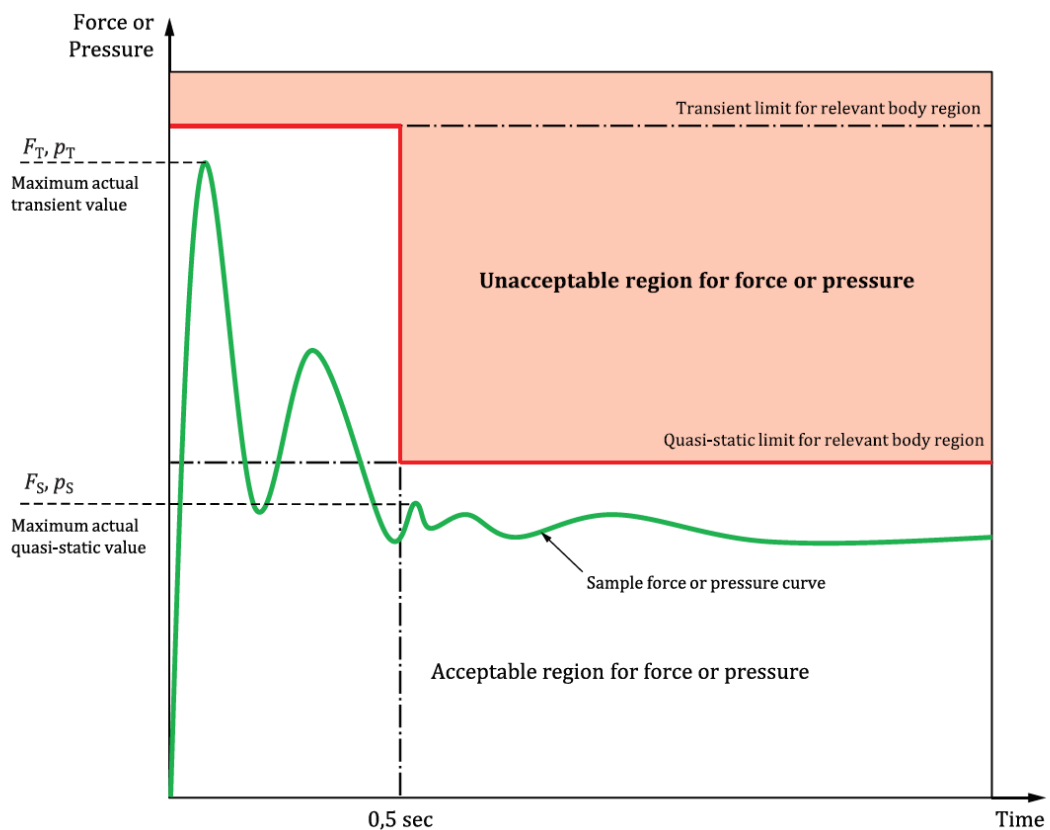
$$S_h = 1,6 \cdot (T_r + T_s) \quad (5)$$

$$S_r = v_r(t) \cdot T_r \quad (6)$$

3.2.4 Tehon ja voiman rajoittaminen

Robotin tehoa ja voimaa rajoittamalla mahdollistetaan tarkoituksellinen tai vahingossa tapahtuva fyysinen kontakti operaattorin ja jonkin robotin osan (työkappale mukaan lukien) välillä. Mikäli tehon ja voiman rajoitusta halutaan käyttää yhteistoiminnassa robotin ja ihmisen välillä, on robottijärjestelmä suunniteltava täysin tämän tyyppistä yhteistoimintaa varten. [13, s. 15.]

Riskejä vähennetään käyttämällä robotteja, jotka ovat luontaisesti turvallisia (tavalliset yhteistyörobotit) tai vaihtoehtoisesti ohjausteknisillä toimenpiteillä varmistuen, että riskienarvioinnissa tunnistetut vaara-/kontaktitilanteet ja niissä syntyvät voimat ja paineet pysyvät määriteltyjen raja-arvojen alapuolella. Raja-arvot määritellään riskienarviointia käyttäen, ja määrittämisen apuna käytetään standardin ISO 15066:2016 liitettä A. [13, s. 15.] Kuvassa 10 havainnollistetaan voiman ja paineen rajoittamista esittämällä kuvan mukainen voima-/paineikäyrä ajan funktiona. Kvasistaattisen ja hetkellisen kontaktin raja-arvot on kuvattu punaisella viivalla.



Kuva 10. Graafinen esitys kontaktitilanteissa esiintyvien voimien ja paineiden raja-arvoista [13, s. 18].

Fyysinen kontakti robotin ja ihmisen välillä voi tapahtua eri tavoin. Standardi ISO 15066:2016, 5.5.5.2 määrittelee kolme erityyppistä tilannetta, jossa kontakti voi tapahtua:

- a) kontakti, joka tapahtuu tarkoituksella osana robotin ja ihmisen välistä yhteistyötä
- b) tarkoitukseton kontakti, joka voi olla seuraus vääristä työskentelytavoista (ei kuitenkaan vikatilanteen aiheuttama)
- c) vikatilanteet, jotka johtavat fyysiseen kontaktiin. [13, s. 15–16].

Mahdolliset kontaktitilanteet ihmisen ja robotin välillä on jaettu kahteen kategoriaan:

- Kvasistaattinen kontakti: Kvasistaattisella kontaktilla viitataan tilanteeseen, jossa jokin ruumiinosa jää puristuksiin robotin liikkuvan osan, ja jonkin muun paikallaan olevan tai liikkuvan robottisolussa olevan objektin väliin. Tällaisessa tilanteessa robotti kohdistaa puristuksissa olevaan ruumiinosaan painetta tai voimaa, kunnes tilanteeseen puututaan ja puristuksissa oleva ruumiinosa saadaan vapautettua.
- Hetkellinen kontakti: Hetkellisellä kontaktilla tarkoitetaan tilannetta, jossa robotti osuu liikkeessaan johonkin ruumiinosaan, mutta kykenee jatkamaan liikettään tai poistumaan tilanteesta jättämättä osuttua ruumiinosaa puristuksiin, jolloin varsinainen kontaktiaika jää lyhyeksi. Hetkellisen kontaktin vakavuus riippuu robotin sekä osutun ruumiinosan inertiaasta ja näiden välisestä suhteellisesta nopeudesta. [13, s. 16.]

Kontaktitilanteet ihmisen ja robotin välillä on suunniteltava riskienarviointia käyttäen niin, ettei niistä aiheudu vaaraa operaattorille. Kontaktitilanteisiin liittyviä riskejä voidaan vähentää

- a) tunnistamalla olosuhteet ja tilanteet, joissa vaarallisia kontaktitilanteita pääsisi syntymään
- b) arvioimalla vaarallisten kontaktitilanteiden riskipotentiaali
- c) suunnittelemalla robottijärjestelmä ja yhteistoiminta-alue siten, että vaaralliset kontaktitilanteet ovat harvinaisia ja vältettävissä

- d) pitämällä kontaktitilanteissa syntyvät voimat ja paineet riskienarvioinnissa määriteltyjen raja-arvojen alapuolella. [13, s. 16.]

Riskejä arvioitaessa on kaikki kontaktitilanteet oletettava operaattorin kannalta mahdollisimman epäedullisiksi: mitkään riskien vähentämiseen käytetyt keinot (mukaan lukien henkilökohtaiset suojavälineet) eivät siis suojaa operaattoria kontaktitilanteen sattuessa. Potentiaalisia kontaktitilanteita tunnistettaessa on huomioitava seuraavat kriteerit:

- operaattorin suojaamattomat ruumiinosat
- kontaktitilanteiden syntyminen, ts. oliko kyseessä tarkoituksellinen kontakti, vahinkokontakti vai kohtuudella ennakoitavissa oleva väärinkäyttö
- tilanteiden todennäköisyys tai esiintymistiheys
- kontaktityyppi (kvasistaattinen/hetkellinen kontakti)
- kontaktialue (mihin ruumiinosaan kontakti kohdistuu), nopeus, voimat, paineet, liikemäärä, mekaaninen teho, energia ja mahdolliset muut fyysiset suureet, jotka kuvaavat fyysistä kontaktitilannetta. [13, s. 16.]

Kontaktitilanteessa ei saa olla teräviä esineitä, kuten neuloja, veitsiä ja muita leikkaavia, pistäviä tai viiltäviä työkaluja ja työkappaleita, jotka voisivat aiheuttaa operaattorin loukkaantumisen. Kontaktit erityisesti pään ja kaulan alueelle on estettävä aina, kun se on käytännössä mahdollista. [13, s. 16–17].

Kvasistaattisen ja hetkellisen kontaktin riskien vähentämiseen käytettävät keinot ovat luonteeltaan joko passiivisia tai aktiivisia. Passiivisilla keinoilla tarkoitetaan robotin geometriaan tai mekaaniseen suunnitteluun liittyviä turvallisuuden keinoja ja aktiivisilla keinoilla tarkoitetaan robotijärjestelmän ohjauksen ja turvatoimintojen suunnitteluun liittyviä keinoja. [13, s. 17.]

Passiivisiin keinoihin luetaan muun muassa

a) kontaktipinta-alan kasvattaminen:

1) pyöristetyt reunat ja nurkat

2) sileät pinnat

3) joustavat pinnat

b) energian absorbointi, energian siirtymisajan pidentäminen tai iskuvoimien vähentäminen:

1) pehmusteet ja tyynyt

2) myötävät komponentit

3) periksi antavat nivelet ja varret

c) liikuteltavien massojen rajoittaminen.

Aktiivisia keinoja ovat muun muassa

– voimien ja vääntömomenttien rajoittaminen

– liikkuvien osien nopeuksien rajoittaminen

– liikemäärän, mekaanisen tehon tai energian rajoittaminen massojen ja nopeuksien funktiona

– turvaluokiteltujen valvontatoimintojen käyttö akseleiden tai tilan valvonnassa

– turvaluokitellun valvotun pysäytystoiminnon käyttö

– antureiden käyttö kontaktien ennakointiin tai havaitsemiseen kvasistaattisten kontaktilanteiden vähentämiseksi.

Näitä keinoja voidaan tarvittaessa yhdistellä. Esimerkiksi voiman rajoittaminen voi olla tehokas keino, mutta vain tiettyyn nopeuden arvoon asti. Tällöin myös robotin nopeutta on rajoitettava voiman rajoittamisen lisäksi. [13, s. 17.]

Mikäli riskienarvioinnissa todetaan, että mikään näistä keinoista tai niiden yhdistelmistä ei sellaisenaan ole riittävä turvallisuusriskien vähentämiseksi, voidaan näiden keinojen tukena käyttää myös muita riskien vähentämiseen käytettäviä keinoja, kuten fyysisiä suojuksia (turva-aita tai häkki). Ihmisen on kyettävä kaikissa mahdollisissa puristustilanteissa vapautumaan puristuksesta itsenäisesti ja helposti. [13, s. 17.]

3.3 Turvallistamiskomponentit

Turvallistamiskonsepteissa käytettäviä komponentteja on useita erilaisia. Komponentit voidaan jakaa karkeasti ohjaus- ja tiedonsiirtokomponentteihin, sähköisiin ja mekaanisiin/sähkömekaanisiin suojalaitteisiin sekä fyysisiin suojuksiin. Komponenttien valintaa ohjaa robotin tekemän työn luonne ja täten myös robottijärjestelmälle tehty riskienarviointi.

Komponentteja yhdistelemällä mahdollistetaan myös monimutkaisempien robottijärjestelmien turvallistaminen.

3.3.1 Turvakenttäväylät

Koneturvallisuuteen liittyvissä ohjaustoiminnoissa tiedonsiirtoon käytetään tavallisten kenttäväylien sijaan turvakenttäväyliä, sillä tavallisten kenttäväylien suorituskyky ei riitä, kun ohjausjärjestelmä suunnitellaan pienentämään turvallisuusriskejä. Turvaväylät ovat useimmiten tavallisiin kenttäväyliin lisättyjä protokollakerroksia, jotka ovat puhtaasti turvallisuuteen liittyvään tiedonsiirtoon tarkoitettuja. [14, s. 6–7.]

Turvaväylän sisältämällä protokollilla tuotetaan monipuolista valvontaan liittyvää diagnostiikkaa, jonka avulla yhteyksiä sekä eri toimilaitteilta saatavia signaaleja ja niiden eheyksiä voidaan valvoa. Mikäli jossakin valvottavassa signaalissa havaitaan virhe tai tiedonsiirrolle määritelty suurin sallittu viive ylittyy, ohjausjärjestelmä reagoi automaattisesti saattamalla ohjattavan koneen tai laitteen turvalliseen tilaan. [14, s. 8.]

3.3.2 Turvalogiikat ja -releet

Turvalogiikat ja turvareleet ovat tavallisten logiikoiden ja releiden kaltaisia komponentteja, joita käytetään ohjausjärjestelmän turvatoimintojen toteuttamiseen. Suurin ero turvalogiikan ja -releen sekä tavallisen logiikan ja releen välillä on niiden rakenteessa ja suorituskyvyssä, joka on korkeampi kuin tavallisilla logiikoilla tai releillä.

Turvalogiikat ja -releet sisältävät diagnostiikkaa ja/tai valvontatoimintoja, joilla valvotaan järjestelmään kytkettyä laitteistoa ja/tai ohjelmistoa, ja pyritään varmistamaan, ettei mikään mahdollisesti syntyvä järjestelmä- tai laitevika pääse aiheuttamaan vaaratilannetta.

3.3.3 Rajakytkimet

Rajakytkimet ovat yleisesti käytössä olevia komponentteja, joita on useita erityyppisiä erilaisiin käyttötarkoituksiin. Mekaanisten kytkinten lisäksi on olemassa induktiivisia, kapasitiivisia, magneettisia, optisia sekä ultraäänellä toimivia rajakytkimiä.

Rajakytkimiä käytetään usein esimerkiksi ovissa tai luukuissa turvakytkimenä. Kytkin on osana ohjausjärjestelmän turvapiiriä, ja mikäli ovi tai luukku avataan, kytkin aiheuttaa piirin aukeamisen tai sulkeutumisen ja turvatoiminto (usein pysäytys) aktivoituu. [15, s. 3.]

3.3.4 Sähköisesti tunnistavat suojalaitteet

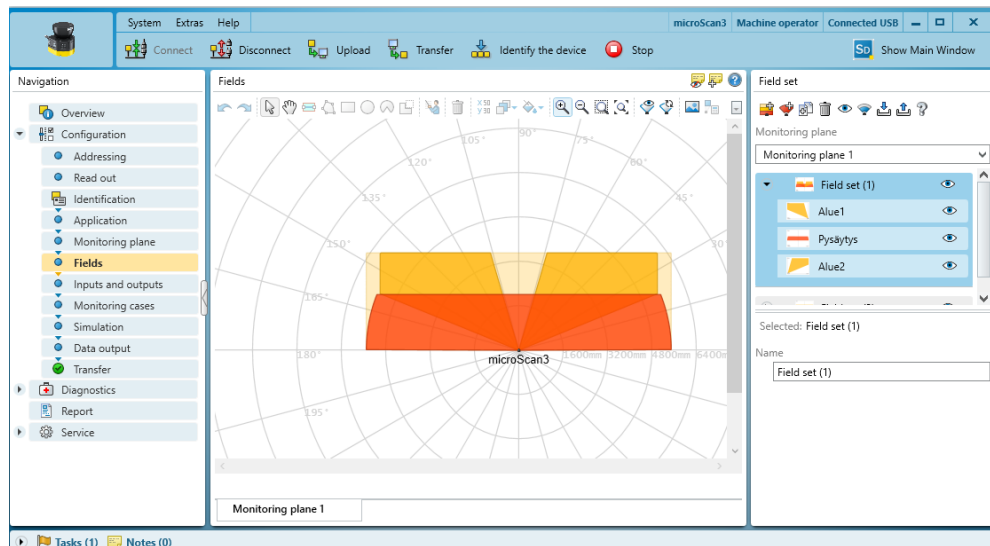
Sähköisesti tunnistavat suojalaitteet (ESPE) ovat monipuolisia laitteita, joiden avulla turvallistamisratkaisuihin voidaan tehdä tehokkaampia ja kompakteja. Niitä käytetään erityisesti silloin, kun halutaan välttää häkkien tai muiden tilaa vievien komponenttien käyttöä, sillä ne kattavat tehokkaasti vaara-alueiden ja niiden valvontaan kohdistuvat vaatimukset, parantavat näkyvyyttä vaara-alueille eivätkä rajoita materiaalin käsittelyä tai kulkua.

Sähköisesti tunnistavat suojalaitteet jaotellaan standardissa SFS-EN IEC 61496 turvalaloverhoihin ja turvalalopuomeihin/-kennoihin (AOPD, IEC 61496-2), laserskannereihin (AOPDDR, IEC 61496-3) ja turvakameroihin (VBPD, IEC 61496-3):

- Valoverhojen toimintaperiaate on yksinkertainen. Lähetin lähettää vastaanottimelle yhdensuuntaisia valonsäteitä (useimmiten infrapunavaloa), jotka muodostavat suojakentän. Mikäli kenttä ”rikkoutuu” jonkin ulkoisen objektin toimesta, vastaanotin aktivoi OFF-signaalin valoverhojen OSSD-lähtöjä varten, jotka aktivoivat ohjausjärjestelmän turvatoimintoja. Valokennot ja -puomit toimivat samalla periaatteella, mutta niissä valonsäteiden määrä on huomattavasti pienempi kuin valoverhoissa. [16, s. 4.]
- Laserskannerit valvovat ympäristöään lähettämällä ja vastaanottamalla infrapunalasersäteitä, jotka ammutaan lähettimeltä ympäristöön pyörivän peilin avulla. Pyörivä peili mahdollistaa suurehkon skannauskulman (kuva 13) ja tarkan sijainnin määrittämisen. Mikäli lähialueella on jokin objekti, heijastuvat pulssit takaisin ja skanneri laskee havaitun objektin etäisyyden ja tarkan sijainnin ympäristössä käyttäen aikaa, joka kuluu pulssin lähettämisen ja vastaanottamisen välillä sekä kulmaa, jossa pulssi heijastuu takaisin skannerille. [16, s. 5–6.]

Turvatoimintoja varten skanneri tarvitsee myös vyöhykekonfiguraation, jonka avulla skanneri osaa reagoida vyöhykkeillä oleviin esteisiin oikein (kuva 11). Skannerit toimivat valoverhojen tapaan havaitessaan häiriön jollakin vyöhykkeellä: OFF-signaalin saadessaan skannerin OSSD-lähdöt aktivoivat ohjausjärjestelmän turvatoimintoja. Valvottavalla alueella ja niillä sijaitsevilla vyöhykkeillä voi olla myös objekteja, jotka voidaan määritellä turvallisiksi, jolloin skannerin ei tarvitse reagoida niihin.

- Turvakamerat ovat laitteita, joiden toiminta perustuu usein konenäköön. Ne kuvaavat ympäristöään ja prosessoivat kuvaamaansa etsien ympäristöstä henkilöitä tai muita mahdollisia esteitä. Kamerat tarvitsevat kuvatakseen valoa, jota saadaan usein erillisestä, ulkoisesta valonlähteestä, mutta joissakin tapauksissa myös ympäristöstä saatava valo voi olla riittävää. [16, s. 6.]



Kuva 11. SICK microScan3 -laserskannerin vyöhykekonfigurointia SICK Safety Designer -työkalulla.

3.3.5 Kosketuksen tunnistavat turvalaitteet

Kosketuksen tunnistavat turvalaitteet (PSPE) voidaan jaotella koneturvallisuuden ja teollisten robotijärjestelmien näkökulmasta kuvan 3 mukaisesti kolmeen eri kategoriaan:

matot ja lattiat (ISO 13856-1), reunat (ISO 13856-2) ja puskurit (ISO 13856-3).

Mattojen ja lattioiden toiminta voidaan kuvailla NO-kytkimen avulla: maton tai lattian sisällä on kaksi metallilevyä, joiden välissä on sähköä johtamaton, usein kumista tai vinyylistä valmistettu kappale, joka pitää levyt erillään ja piirin avoimena (NO). Kun maton tai lattian päälle astutaan, levyjen välissä oleva kappale myötää ja levyt pääsevät koskettamaan toisiaan, jolloin laitteeseen sisäänrakennettu sähköinen piiri sulkeutuu ja sen resistanssi laskee. [17, s. 83.]

Piiriä valvotaan ohjausjärjestelmän avulla. Kun järjestelmä havaitsee muutoksen resistanssissa, on seurauksena ohjattavan laitteen tai koneen pysäytys. Mikäli piirissä havaitaan mikä tahansa sähköinen vika, siirtyvät järjestelmän lähdöt turvalliseen OFF-tilaan.

Reunojen ja puskureiden toimintaperiaatteet ovat samankaltaisia. Ne ovat myös oletuksena NO-tilassa, ja painettuina ne lähettävät signaalin tilanmuutoksesta ohjausjärjestelmälle, joka reagoi muutokseen aktivoimalla halutun turvatoiminnon.

3.3.6 Voima-anturit

Voima-anturit mittaavat voimaa venymäliuskojen, pietsosähköisten kiteiden tai induktiivisten antureiden avulla. Robotiikassa käytettävät voima-/momenttianturit ovat usein kuusiakselisia, venymäliuskateknologiaan perustuvia antureita, joilla voidaan mitata X-, Y- ja Z-akseleiden suuntaisia voimia sekä vääntömomenteja niiden ympäri. Niitä käytetään törmäysten ja liian suurten vääntömomenttien havaitsemiseen. [18, s. 19; 19.]

Venymäliuskan toiminta perustuu venymän aiheuttamasta muodonmuutoksesta johtuvaan resistanssin muutokseen: kun liuskaan kohdistuu jokin ulkoinen, vetävä voima, sen pituus kasvaa ja poikkipinta-ala pienenee, ja tällöin sen resistanssi nousee. [18, s. 19.]

3.3.7 Varoitusvalot, -äänet ja -kyltit

Standardissa SFS-EN ISO 12100:2010, 6.4.3 on määritelty näköön ja kuuloon perustuviin signaaleihin, kuten valoihin, sireeneihin ja kyltteihin liittyviä määräyksiä ja ohjeistuksia. Niitä voidaan käyttää varoittamaan vaarallisen tapahtuman uhasta, kuten esimerkiksi robottijärjestelmän käynnistymisestä [9, s. 96.] Signaalien kannalta on oleellista, että ne

- a) annetaan ennen minkään vaarallisen tapahtuman toteutumista
- b) ovat yksiselitteisiä
- c) ovat selkeästi havaittavissa ja erotettavissa kaikista muista käytettävistä signaaleista
- d) ovat helposti tunnistettavissa käyttäjien ja muiden henkilöiden toimesta.

Varoituslaitteita suunnitellessa ja sijoitellessa on huomioitava, että niiden tarkistamisen tulee olla helppoa, ja käyttöä koskevissa tiedoissa on oltava ohjeet niiden säännöllistä tarkistamista varten. Lisäksi suunnittelussa on huomioitava mahdollinen aistien ylikuormittuminen, joka voi syntyä liian usein toistuvista valo- ja/tai äänisignaaleista. [9, s. 96.]

Koneissa on myös oltava yksiselitteisen tunnistamisen sekä pakollisen vaatimustenmukaisuuden osoittamista varten erilaisia merkintöjä, kuten valmistajan nimi ja osoite, rakennusvuosi sekä mahdollinen sarjanumero [9, s. 96]. Lisäksi sen tulee sisältää myös sen turvallisen käytön kannalta oleellisia merkintöjä, kuten esimerkiksi

1. mahdollisten pyörivien osien suurin nopeus
2. työkalujen suurin halkaisija
3. koneen ja/tai sen irtoavien osien massa kilogrammoina
4. koneen suurin hyötykuorma
5. mahdollisten henkilönsuojainten käytön tarve
6. suojusten asetteluun liittyviä tietoja
7. koneen tarkastustaajuus.

Mikäli suoraan koneeseen tehdään merkintöjä, tulisi niiden olla pysyviä ja luettavissa koneen koko odotetun eliniän ajan. Pelkästään sanan ”vaara” sisältäviä kylttejä tai varoitustekstejä ei saa käyttää. [9, s. 96.]

3.3.8 Kiinteät tai avattavat suojuukset

Kiinteät ja avattavat suojuukset ovat suojalaitteita, joiden tarkoituksena on suojata henkilöitä pääsääntöisesti mekaanisilta vaaroilta. Kiinteillä suojuksilla tarkoitetaan esimerkiksi aitoja, kansia tai muita esteitä, joiden poistamiseksi tarvitaan erillisiä työkaluja. Avattavat suojuukset ovat taas joko käsi- tai konekäyttöisiä ovia, luukkuja tai kansia. [20, s. 8–9.]

Kiinteitä tai avattavia suojuksia käytetään usein sellaisissa sovelluksissa, joissa tila ei ole kynnyksymys, eikä ihmisen tarvitse työskennellä robotin kanssa tai sen läheisyydessä. Niitä voidaan kuitenkin käyttää tarvittaessa myös täydentämään esimerkiksi sähköisesti tunnistavilla suojalaitteilla toteutettuja turvatoimenpiteitä.

Standardissa SFS-EN ISO 14120 käsitellään suojusten suunnittelua, rakennetta sekä valintaa koskevia yleisiä vaatimuksia, ja standardissa SFS-EN ISO 14119 käsitellään suojusten kytkentää koneen toimintaan sekä siihen liittyvää suunnittelua.

3.4 Turvallistamistapoja

Turvallistamistavan valintaan vaikuttavia tekijöitä on useita. Robotin tekemän työn luonteen lisäksi valintaan vaikuttavat robottisolun koko, robotin tyyppi sekä erityisesti kustannukset ja tilansäästö. Fyysiset ja mekaaniset keinot ovat usein kohtuuhintaisia mutta tilaa vieviä, ja valosähköiset turvalaitteet ovat päinvastoin tilaa säästäviä, mutta kalliimpia. Joissakin sovelluksissa voi myös fyysisten suojusten ja tunnistavien suojalaitteiden yhdistely olla tarpeellista, jotta robottijärjestelmä saadaan riittävän turvalliseksi.

3.4.1 Turvallistaminen mekaanisilla turvalaitteilla ja fyysisillä suojuksilla

Mekaaniset ja fyysiset turvallistamiskomponentit, kuten erilaiset rajakytkimet ja turva-aidat tai häkit, ovat yksinkertaisia ja kustannustehokkaita keinoja robottisolujen turvallistamiseksi. Niitä käytetään erityisesti silloin, kun ihmisen ja robotin väliselle läheiselle yhteistyölle ei ole tarvetta, tilaa on riittävästi ja halutaan säästää kustannuksissa.

Robottisolu voidaan varustaa turva-aidalla, jonka oveen on kytketty magneettinen turvalukko tai turvarajakytkin, joka pysäyttää robotin oven avautuessa. Rajakytkin kytketään turvalogiikkaan tai turvareleeseen, joka ohjaa signaalin edelleen robotin ohjaimelle järjestelmän pysäytystä varten, eikä järjestelmä käynnisty uudelleen ennen oven sulkemista ja järjestelmän kuittaamista turvaliseksi.

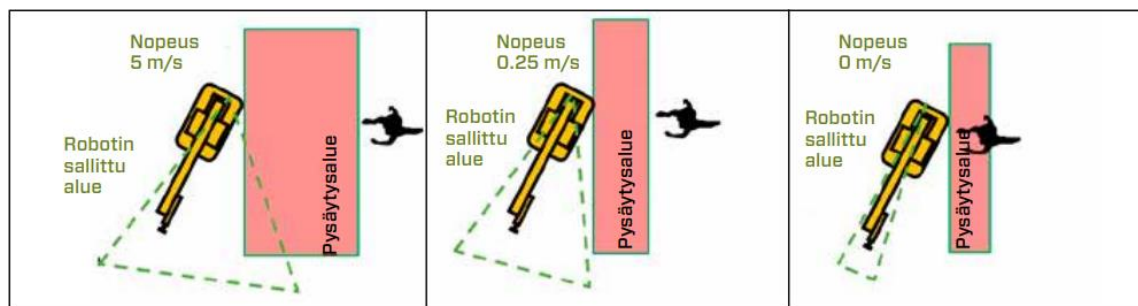
Mekaanisia ja fyysisiä suojuksia voidaan käyttää myös täydentävinä suojaustoimenpiteinä, mikäli luontaisesti turvallisten suunnittelutoimenpiteiden todetaan olevan riittämättömiä riskien vähentämiseen.

3.4.2 Turvallistaminen sähköisesti tunnistavilla suojalaitteilla

Sähköisesti tunnistavat turvalaitteet, kuten laserskannerit, ovat tehokkaita ratkaisuja, kun ihmisen ja robotin välinen yhteistyö on läheistä ja tilaa on rajallisesti. Tällöin turvajärjestelmän on oltava dynaaminen, eli sen on kyettävä reagoimaan operaattorin muuttuvaan sijaintiin reaaliaikaisesti. Tämä tuo kuitenkin omia haasteitaan järjestelmän suunnittelulle, sillä dynaamiset turvajärjestelmät ovat joustavuudestaan ja monipuolisuudestaan huolimatta myös monimutkaisia: robotilta ei saada suoraan luotettavaa paikkatietoa, vaan sitä varten on luotava erillinen turvajärjestelmä, jossa määritellään robotille sallitut alueet. [3, s. 21.]

VTT esitteli vuonna 2017 kehittämänsä dynaamisen robotin turvajärjestelmän (kuva 12), jossa ihminen ja robotti voivat työskennellä samanaikaisesti samalla alueella turvallisesti katkaisematta robotin servomootoreiden virransyöttöä. Turvajärjestelmän suunnittelussa on ollut tavoitteena toteuttaa kappaleessa 3.2.3 kuvailtu, vaatimustenmukainen nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta, jossa vähimmäisetäisyyttä hallitaan muuttamalla robotin nopeutta siten, että robotti ehtii pysähtyä ennen kuin ihminen voi tavallisella kävelynopeudella liikkeessaan osua siihen. Etäisyyden ollessa riittävä mahdollistaa järjestelmä kuitenkin myös robotin automaattisen käynnistymisen. [3, s. 19.]

Järjestelmä käyttää turva-antureina ihmisen havaitsemiseen turvalaserskanneria ja turvakameraa, joiden lisäksi järjestelmään on lisätty avustavaksi anturiksi kameraan ja infrapunalähettimeen perustuva Microsoft Kinect -3D-skanneri [3, s. 19]. Kinectillä seurataan ympäristössä olevan ihmisen paikkaa jatkuvasti, jo ennen turva-antureiden valvomalle alueelle tuloa, ja sen havaintojen perusteella järjestelmä asettaa robotin nopeuden ja liikealueen vastaamaan tarvittavaa pysähtymismatkaa.



Kuva 12. Dynaamisen turvajärjestelmän toimintaperiaate ja sen tärkeimmät komponentit [3, s. 19].

Kun ihminen lähestyy robottia, robotin nopeutta alennetaan ja sen sallittua liikealuetta pienennetään. Riittävän lähelle tultaessa robotti menee ohjelmallisesti valvottuun pysäytystilaan, jolloin ihmisen työskentely robotin välittömässä läheisyydessä voidaan sallia. Mikäli Kinect ei havaitse alueella olevaa ihmistä, aiheuttavat varsinaiset turva-anturit pysäytyksen, sillä järjestelmä ei ole alentanut nopeutta ja pienentänyt vastaavasti valvottavaa aluetta. Toisaalta virheellinen havainto hidastaa robotin nopeutta: avustavan anturin vikatilanne ei siis aiheuta täten vaaratilannetta, vaan heikentää ainoastaan käytettävyyttä. Robotin turvaohjain valvoo robotin sijaintia ja nopeutta jatkuvasti; mikäli turvaohjaimen ja varsinaisen robottiohjaimen tiedoissa on ristiriitaa, on seurauksena suojauspysäytys. [3, s. 19-20.]

Robotin turvaohjaimen kytketyllä turvalogiikalla valvotaan ja ohjataan eri toimintatilojen vaihtoja, aktiivisena olevaa turva-anturin aluetta sekä robotin sallittua aluetta ja nopeutta. Järjestelmän turvallisuus perustuu vaihtoehtoihin, keskenään yhtä turvallisiin turvatiloihin, jotka vaihtuvat ihmisen liikkeen mukaisesti. Ihmisen ollessa alueella robotti liikkuu sellaisella nopeudella ja liikealueella, että se kykenee pysähtymään ennen mahdollista kontaktia ihmiseen. Kun ihminen on poissa alueelta, voi robotti liikkua nopeasti ja laajemmalla liikealueella. Järjestelmän perusajatuksena on, että avustavat turvajärjestelmät (Kinect ja robottiohjain) pitävät nopeuden ja turvaantureilla valvotun alueen sellaisina, ettei varsinaisten turvalaitteiden (laserskanneri ja robotin turvaohjain) tarvitsisi reagoida. [3, s. 20.]

Mikäli ihminen lähestyy kuitenkin robottia niin nopeasti, ettei avustava turvajärjestelmä ehdi muuttaa robotin nopeutta ja liikealueita ajoissa, laserskannerin turvatoiminto aktivoituu: turvatoiminto aiheuttaa suojauspysäytyksen, joka edellyttää robotin työskentelyalueen ulkopuolelta tehtävää pysäytyksen kuitaamista ja servojen käynnistämistä. [3, s. 20.]

4 Turvallistaminen offline-ohjelmointiympäristössä

Offline-ohjelmoinnin edut näkyvät myös turvallistamiskonseptien suunnittelussa. Simulointiympäristöissä voidaan helposti todentaa suunnitellun konseptin toimivuus ja mahdollisten muutosten tekeminen onnistuu tarvittaessa nopeasti, eikä suunnitteluun tarvita välttämättä muuta kuin tietoa suunniteltavalta robottisolulta vaaditusta turvallisuustasosta sekä tietokone.

4.1 Robottien Offline-ohjelmointi

Robottiohjelmointia voidaan tehdä manuaalisesti opettamalla, jolloin robotti viedään haluttuihin pisteisiin ja kerrotaan näiden pisteiden olevan kohteita, joihin robotin halutaan menevän ohjelman aikana. Opettamisen lisäksi robotteja voidaan ohjelmoida myös tietokoneavusteisesti erilaisilla offline-ohjelmointityökaluilla. Offline-ohjelmoinnilla robotteja voidaan ohjelmoida tuotannon keskeytymättä, jolloin tuottavuus ja tehokkuus eivät kärsi robotin ollessa poissa tuotannosta.

Useat robotteja valmistavat yritykset ovatkin kehittäneet omia robottejaan varten offline-ohjelmointiympäristöt, jotta ne voisivat tarjota asiakkailleen mahdollisimman tehokkaita ohjelmointiratkaisuja. Lisäksi jotkin yritykset ovat kehittäneet yleisohjelmia, jotka tukevat suurimpien robotteja valmistajien robotteja sekä ohjelmointikieliä. Tässä työssä tarkastellaan vain ABB:n RobotStudio -ohjelmointiympäristöä, ja sen avulla tehtävää ohjelmallista turvallistamista.

4.2 ABB RobotStudio

ABB RobotStudio on maailman käytetyin robottien offline-ohjelmointiin tarkoitettu työkalu. RobotStudio on ABB Roboticsin kehittämä, ja se pohjautuu ABB VirtualController -teknologiaan. VirtualController on nimensä mukaisesti virtuaalinen ohjain, joka vastaa aitoa ABB:n IRC5-, tai OmniCore-robottiohjainta mahdollistaen täten hyvin realistisen robottisimuloinnin. [21.]

RobotStudion työkalu- sekä robottikirjastot sisältävät ABB:n valmistamien robottien, manipulaattoreiden, lineaariratojen ja työkalujen lisäksi monien kolmansien osapuolien työkaluja ja muita komponentteja. RobotStudiolla voidaan simuloida monenlaisia robottien työtehtäviä aina yksinkertaisista liikeradoista ja kappaleen poiminnasta monimutkaisempiin fysiikkaa, tuotteen valmistusta, kokoonpanoa, turvatoimintoja ja useita robotteja sisältäviin robottilinjastoihin.

4.2.1 RAPID-ohjelmointi

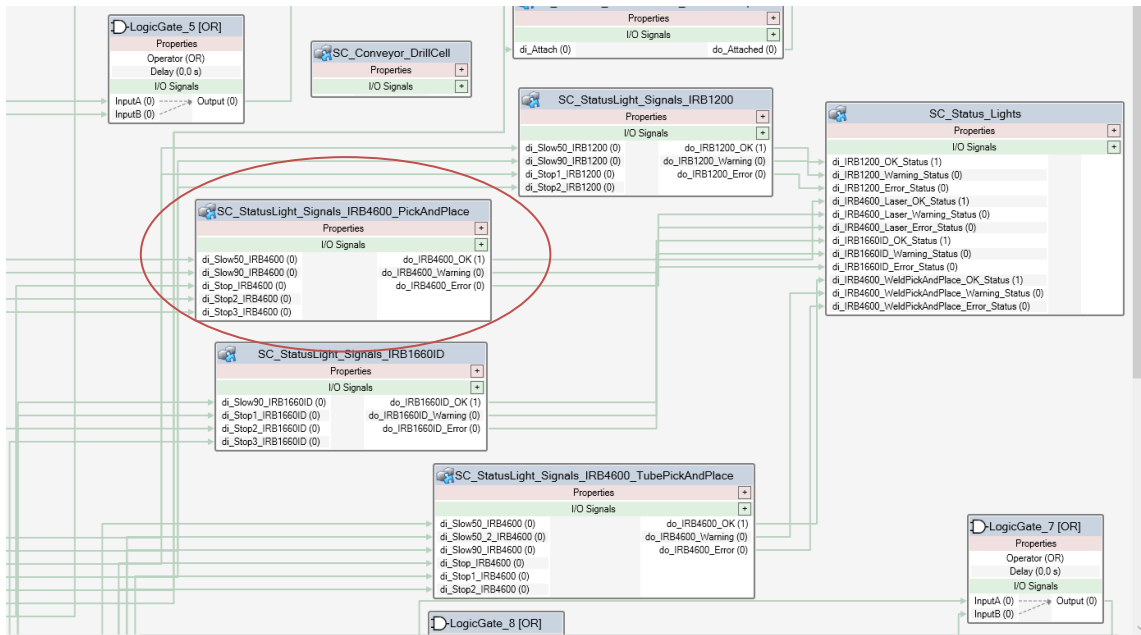
RAPID on ABB:n kehittämä ja käyttämä korkean tason ohjelmointikieli, jota käytetään ABB:n robottien ohjaamiseen. Sen ominaisuuksiin kuuluvat rutiiniparametrien (prosessit, funktiot ja keskeytykset) lisäksi muun muassa aritmeettiset sekä loogiset ilmaisut, automaattinen virheenkäsittely, modulaariset ohjelmat sekä moniajo [22].

Robottiohjelma koostuu ohjelmamoduuleista, jotka sisältävät rutiineja ja dataa. Ohjelmamoduulien lisäksi ohjelmissa voidaan käyttää myös järjestelmämoduuleja, jotka ovat ohjelmamuistissa aina läsnä. [22.]

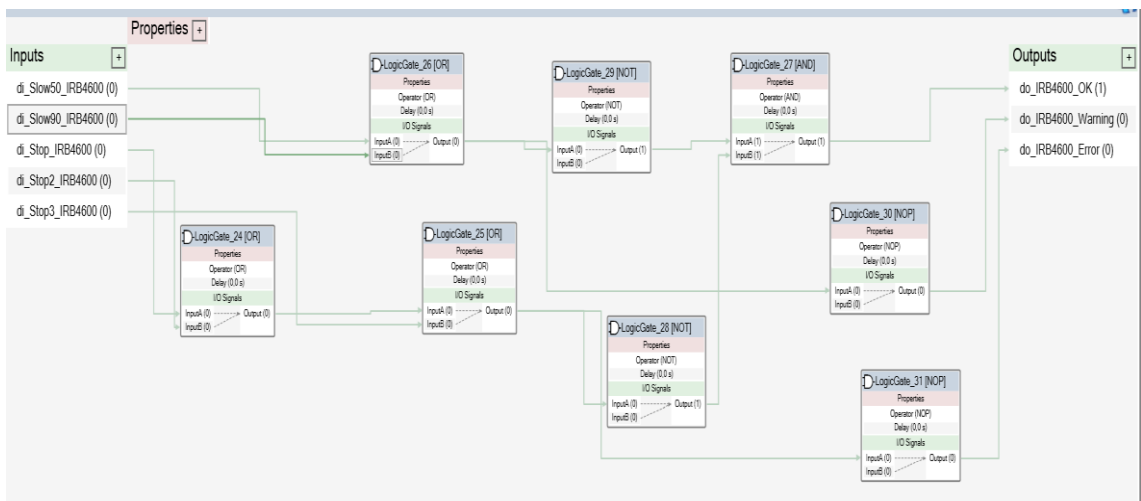
Rutiinit voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan: proseduurit, toiminnot ja keskeytykset. Proseduurit ovat käskysarjoja, jotka eivät palauta ohjelmaan mitään arvoa. Ne ovat yleisimmin käytettyjä rutiineja, ja niillä suoritetaan usein toistuvia toimintoja, kuten vaikkapa kappaleen poimintaa. Toiminnot tai funktiot ovat käskysarjoja, jotka palauttavat ohjelmaan aritmeettisen tai vaikkapa loogisen laskutoimituksen arvon. Keskeytykset ovat ohjelman alussa esiteltäviä rutiineja, joita suoritetaan ehdollisina, kuten esimerkiksi digitaalisen tulon tai lähdön arvon perusteella. [22.]

4.2.2 Smart Components

Smart Componentit ovat RobotStudio-objekteja, joiden avulla voidaan luoda erilaisia simuloinnin ja robottien ohjauksen kannalta olennaisia toimintoja. Niitä ohjataan digitaalisten signaalien ja RAPIDin avulla. Ulkonäöllisesti ja toiminnallisesti ne muistuttavat hyvin läheisesti toimilohkoja. Smart Componenteja voidaan rakentaa moneen eri kerrokseen toistensa sisälle (kuvat 13 ja 14), mikä mahdollistaa monimutkaistenkin robottilinjastojen ohjauksen kompaktin rakentamisen. [23, s. 137.]



Kuva 13. Robottisolun varoitusvalojen ohjausta Smart Componenteilla, ympyröidyn komponentin sisältöä kuvattu kuvassa 14.



Kuva 14. Kuvassa 13 ympyröidyn komponentin sisältö, varoitusvalojen ohjaukseen käytettävää logiikkaa.

Perinteisten logiikkaporttien, antureiden ja manipulaattoreiden lisäksi Smart Componenteja löytyy moneen eri käyttötarkoitukseen, kuten kappaletavara-automaatioon ja fysiikkatoimintoihin tarvittavia komponentteja [23, s. 137].

4.3 Turvallistamistoiminnot RobotStudiassa

Työturvallisuus ja turvallistamistoiminnot ovat äärimmäisen olennainen osa robotiikkaa. RobotStudiassa nämä asiat on otettu huomioon kehittämällä erilaisia liikkeenvalvontatoimintoja, joiden avulla robotin liikealueita, -nopeuksia ja -kiihtyvyyksiä voidaan tarvittaessa rajoittaa. Lisäksi myös yksittäisen robotin nivelen tai vaikkapa työkalujen asentoja voidaan valvoa ja tarvittaessa rajoittaa. Näitä toimintoja yhdistellään fyysisiin turvalaitteisiin, kuten esimerkiksi laserskanneriin tai valoverhoihin, joiden signaalit aktivoivat ohjelmoituja turvatoimintoja.

4.3.1 Keskeytysrutiinit

TRAP- eli keskeytysrutiinit ovat rutiineja, joita käytetään robotin reaaliaikaiseen ohjaamiseen kesken työkiertojen. Keskeytysrutiineja voidaan suorittaa tavallisen ohjelman rinnalla, ja ne tekevät ohjelmoinnista helpompaa, sillä niitä hyödyntämällä eliminoidaan tarve tulojen säännölliselle tarkkailulle. [22.]

Keskeytykset määritellään luomalla keskeytysrutiini, joka yhdistetään keskeytysnumeroon. Keskeytysnumero yhdistetään edelleen keskeytyksen aiheuttajaan, joka voi olla digitaalisen tulon tai lähdön arvon muutos, ajastimelta saatu tieto kuluneesta ajasta, tai esimerkiksi servolta saatu ennalta määritelty paikkatieto. [22.]

Keskeytysrutiineja käytetään turvallistamistoiminnoissa esimerkiksi robotin liikkeiden tilapäiseen hidastamiseen tai pysäyttämiseen. Komennolla `SpeedRefresh Override` robotin liike hidastuu argumentin `Override` arvon verran. Se voidaan määritellä numeeriseksi vakioarvoksi komennolla `VAR num muuttujan_nimi:= arvo väliltä 0-100`, jolloin sitä voidaan kutsua keskeytysrutiinissa komennolla `SpeedRefresh muuttujan_nimi` tai sitten se voidaan syöttää suoraan numeerisena komennolla `SpeedRefresh arvo väliltä 0-100`. [24, s. 743-744.]

Komennolla `StopMove \Quick` robotti pysähtyy mahdollisimman nopeasti jonkin ehdon täytyessä, ja komento `StartMove` jatkaa liikettä ehdon palautuessa alkuperäiseen arvoonsa [24, s. 753, 782].

Alla esimerkki hidastus- ja pysäytysrutiineista: hidastusrutiini `SlowDown` hidastaa robotin nopeutta mahdollisesti joko 50 % tai 90 % sille ohjelmoidusta nopeudesta digitaalisen tulon `di_Slow50` tai `di_Slow90` muuttuessa todeksi ja palautuu alkuperäiseen nopeuteen, kun tulo palautuu epätodeksi. Pysäytysrutiini `StopMovement` pysäyttää robotin tilapäisesti tulon `di_Stop` muuttuessa todeksi ja jatkaa liikettä automaattisesti tulon palautuessa epätodeksi.

```

VAR intnum int_01 := 0;
VAR intnum int_02 := 0;
VAR intnum int_03 := 0;

PROC TempSlow ()

    CONNECT int_01 WITH SlowDown

    ISignalDI di_Slow50, 1, int_01;

    CONNECT int_02 WITH SlowDown

    ISignalDI di_Slow90, 1, int_02;

ENDPROC

PROC StopMovement ()

    CONNECT int_03 WITH StopMove, 1, int_03;
    ISignalDI di_Stop, 1, int_03;

ENDPROC

TRAP SlowDown

    IF di_Slow50 = 1 THEN
        SpeedRefresh 50;
        WaitDI di_Slow50, 0;
        SpeedRefresh 100;

    ELSE IF di_Slow90 = 1 THEN
        SpeedRefresh 10;
        WaitDI di_Slow90, 0;
        SpeedRefresh 100;

    ENDIF

ENDIF

ENDTRAP

TRAP StopMove

    IF di_Stop = 1 THEN

        StopMove \Quick;
        WaitDI di_Stop, 0;
        StartMove;

    ENDIF

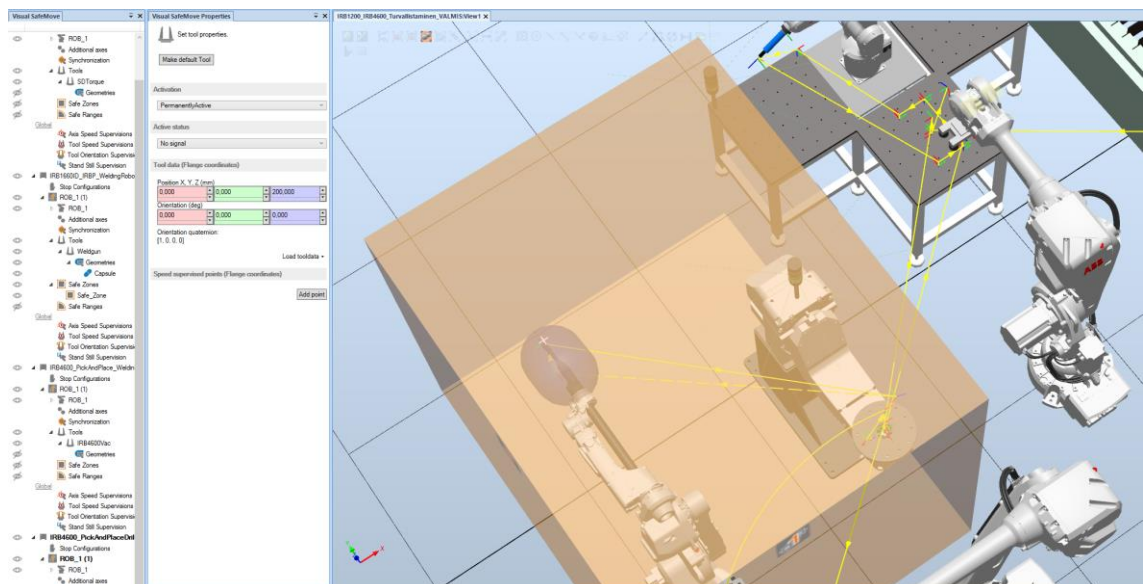
ENDTRAP

```

4.3.2 Functional Safety ja SafeMove

ABB:n tärkein toiminnallisen turvallisuuden elementti robotiikassa on vuonna 2008 esitelty SafeMove-moduuli, josta uusin saatavilla oleva versio on vuonna 2016 julkaistu SafeMove 2. Se on saatavilla useimpiin ABB:n robottiohjaimiin erillisenä maksullisena lisäosana. SafeMove vaatii toimiakseen robottiohjaimeen lisättävän turvamoduulin, joka on varustettu turvakenttäväylällä. Väylävaihtoehtoina on PROFINETin PROFI-safe F-Device/F-Host ja CIP Safety Adapter/Scanner. Turvaväylän avulla robottiohjain kommunikoi turvalogiikan/-releen kanssa, johon kytketään erilaisia turvalaitteita, kuten laserskannereita ja valoverhoja.

SafeMove-konfigurointi tehdään RobotStudiossa Visual SafeMove -työkalulla (kuva 15), josta se siirretään edelleen oikealle robotille. Konfigurointi vaatii kuitenkin jonkin verran esivalmisteluja, kuten robotin työkalujen ja työkoordinaatistojen määrittelyt, joidenkin robottikohtaisten järjestelmäparametrien konfiguroinnin sekä sallittujen SafeMove-käyttäjien määrittelyn. [25, s. 131.]



Kuva 15. Visual SafeMove -konfigurointia RobotStudiossa.

Esivalmisteluiden jälkeen järjestelmälle määritellään turva-alueet ja valvontatoiminnot. Turva-alueita konfiguroitaessa on huomioitava robotin jarrutusmatka. Robotti aloittaa jarruttamisen vasta tullessaan sille määritellyn turva-alueen tai yksittäisen akselin aseman rajalle, jolloin varsinainen pysähtyminen tapahtuu vasta määritellyn turva-alueen tai akselin aseman ulkopuolella.

Myös juuri ennen rajoja tapahtuviin liikkeisiin on syytä kiinnittää huomiota: mikäli robotin kiihtyvyys nousee voimakkaasti juuri ennen kuin robotti osuu sille määritellylle rajalle, on seurauksena robotin nopeuden kasvaminen ja täten myös jarrutusmatkan kasvaminen.

Turva-alueiden konfiguroinnin jälkeen järjestelmälle konfiguroidaan tarvittavat valvontatoiminnot. SafeMove-moduuliin kuuluu erilaisia valvontaominaisuuksia, joilla voidaan tarpeen mukaan hallita työkalujen tai yksittäisten akselien asentoja, paikkoja tai nopeuksia. Lisäksi SafeMove voi esimerkiksi valvoa, että robotin akselit pysyvät paikallaan sen ollessa pysäytettynä, ja mikäli jokin valvottavista akseleista liikkuu, SafeMove aktivoi standardissa IEC 60204-1 määritellyn pysäytyskategorian 0 mukaisen turvapysäytyksen.

5 Robottityyppien valinta ja vertailu

Kuten missä tahansa robotiikan sovelluksessa, myös yhteistyörobotiikassa robottityypin valintaa ohjaa erityisesti robotille suunniteltu työnkuva ja robotilta vaadittu suorituskyky.

Yhteistyörobotiikassa valintaa ohjaa kuitenkin lisäksi myös ihmisen ja robotin tekemän yhteistyön luonne: mitä läheisempää ihmisen ja robotin tekemä yhteistyö on, sitä turvallisempi robotin on oltava käyttäjälleen. Robotin on kuitenkin kyettävä myös suoriutumaan sille määritellyistä työtehtävistä tehokkaasti, jottei sen tuottavuus kärsi: suunnittelijan onkin kyettävä löytämään sopivan robotin lisäksi juuri sille ja sen tekemälle työlle sopiva turvallisratkaisu.

5.1 Aidattomat teollisuusrobotit ja tavalliset yhteistyörobotit

Tuotannon apuna käytettävät yhteistyörobotit ovat joko tavallisia yhteistyörobotteja tai aidattomia teollisuusrobotteja. Niitä voidaan käyttää monissa erilaisissa avustavissa tehtävissä asennuksessa ja kokoonpanossa. Vaihtoehtoisesti ne voivat toimia koneenhoitajina tai vaikkapa hitsaus-, koneistus- tai hiontarobotteina, eikä robottityypin valintaa rajoittavana tekijänä ole useimmiten kuin käsiteltävien kappaleiden koko ja/tai paino.

Aidattomat teollisuusrobotit ovat tehokkaita keskiraskaan ja raskaan tuotannon työntekijöiden apuna. Niitä voidaan käyttää myös kevyemmässä tuotannossa tavallisten yhteistyörobottien sijaan

esimerkiksi silloin, kun tavallisen yhteistyörobotin suorituskyky ei riitä ja robotilta vaaditaan toistettavuuden lisäksi erityisesti ulottuvuutta.

Tavallisia yhteistyörobotteja käytetään sellaisilla teollisuuden aloilla, joissa käsiteltävät komponentit ovat pääsääntöisesti pienikokoisia ja kevyitä. Niitä voidaan kuitenkin käyttää myös keskiraskaan teollisuuden apuna vaikkapa erilaisissa kokoonpano- tai asennustehtävissä, ja käytännössä ainoat rajoittavat tekijät tavallisen yhteistyörobotin käytölle ovatkin sen ulottuvuus ja kuormankantokyky.

Merkittävin ero tavallisen yhteistyörobotin ja aidattoman teollisuusrobotin välillä on kuitenkin niiden turvallisuudessa: tavalliset yhteistyörobotit ovat jo lähtökohtaisesti rakenteensa sekä toiminnallisuutensa osalta turvallisempia. Niiden ulkopintoja on pehmustettu, ja jokaiseen niveleen kohdistuvia voimia ja vääntömomenteja valvotaan eri keinoin. On kuitenkin muistettava, etteivät pelkät rakenteelliset ja toiminnalliset ominaisuudet riitä takaamaan robotin turvallisuutta: myös pehmustetut ja voimarajoitetut robotit ovat vaarallisia, mikäli ne käyttävät teräviä työkaluja.

5.2 Valinta työtehtävään soveltuvuuden mukaan

Lähtökohtaisesti aidattomia teollisuusrobotteja sekä tavallisia yhteistyörobotteja voidaan käyttää täysin samoissa työtehtävissä, eikä käytön rajoitteena ole useimmiten kuin käsiteltävät kuormat ja/tai kappaleiden fyysinen koko. Yhteistyörobotiikassa käytettävät turvallistamiskeinot tuovat kuitenkin mukanaan omat haasteensa ja rajoitteensa, jotka vaikuttavat robotin tekemän työn tehokkuuteen sekä laatuun.

5.2.1 Poiminta ja lajittelu

Poiminta (pick & place) ja lajittelu ovat eräitä yleisimpiä robotisoitaviksi sopivia työtehtäviä. Ne sopivat erinomaisesti robottien tehtäviksi, sillä ne ovat monotonisen luonteensa lisäksi usein myös nopeutta ja tarkkuutta vaativia tehtäviä.

Poimintaan ja lajitteluun soveltuvat sekä tavalliset yhteistyörobotit että aidattomat teollisuusrobotit, ja valintaa ohjaakin usein vain robotin suorituskyky.

5.2.2 Kokoonpano

Kokoonpanotehtävissä yhteistyörobotin valintaa ohjaavat käsiteltävät kuormat, työn luonne sekä sen käyttämät työkalut (jotka vaikuttavat sen kuormankantokykyyn), robotilta vaadittu tarkkuus/toistettavuus, ulottuvuus ja sen tarvitsema työskentelyalue.

Tavallisen yhteistyörobotin käyttöä kokoonpanossa rajaa käsiteltävien kuormien suuruuden lisäksi käytännössä ainoastaan sen ulottuvuus. Mikäli nämä todetaan riittämättömiksi, voidaan robotiksi valita aidaton teollisuusrobotti.

Aidattoman teollisuusrobotin käyttö yhteistyörobottina ihmisen apuna tuo joustavuutta ja monipuolisuutta esimerkiksi raskaan kokoonpanon töihin. Robotin asennot ja työtasot voidaan optimoida mahdollisimman ergonomisiksi asennustyötä varten, eikä kiinnittimille tai asemointilaitteille ole suurta tarvetta. Lisäksi solut ovat tarvittaessa helposti muunneltavissa tai uudelleen ohjelmoitavissa. [26, s. 13.]

Myös prosessin automatisointi helpottuu, kun ihmiselle ja robotille voidaan määritellä omat työtehtävät. Robotti suorittaa voimaa sekä tarkkuutta vaativat asennukset ja yksityiskohtaisempia analyysejä vaativia laadunvalvontatehtäviä konenäön avulla, kun taas ihminen suorittaa hienomotoriikkaa vaativia asennustöitä, kuten paineilmaletkujen tai johtojen kytkentää, ja tekee asennustöiden lomassa karkeampaa laadunvalvontaa. [26, s. 13.]

5.2.3 Hitsaus

Eräs yleisimmistä teollisuusrobotteja työllistävistä tehtävistä on robottihitsaus. Hitsauksen robotisointi kannattaa erityisesti silloin, kun valmistettavat tuote-erät ovat suuria ja tuotteilta vaaditaan tasalaatuisuutta. Teollisuusrobottien käyttö hitsausrobotteina on erityisen suosittua autoteollisuudessa, jossa niitä käytetään muun muassa pistehitsaukseen korivalmistuksessa (kuva 16), mutta ne ovat suosittuja myös kaarihitsaussovelluksissa (usein MIG/MAG), kuten erilaisten työkonien valmistuksessa. Ne voivat myös tehdä laadunvalvontaa hitseille esimerkiksi ultraäänianturin tai laserskannerin avulla.

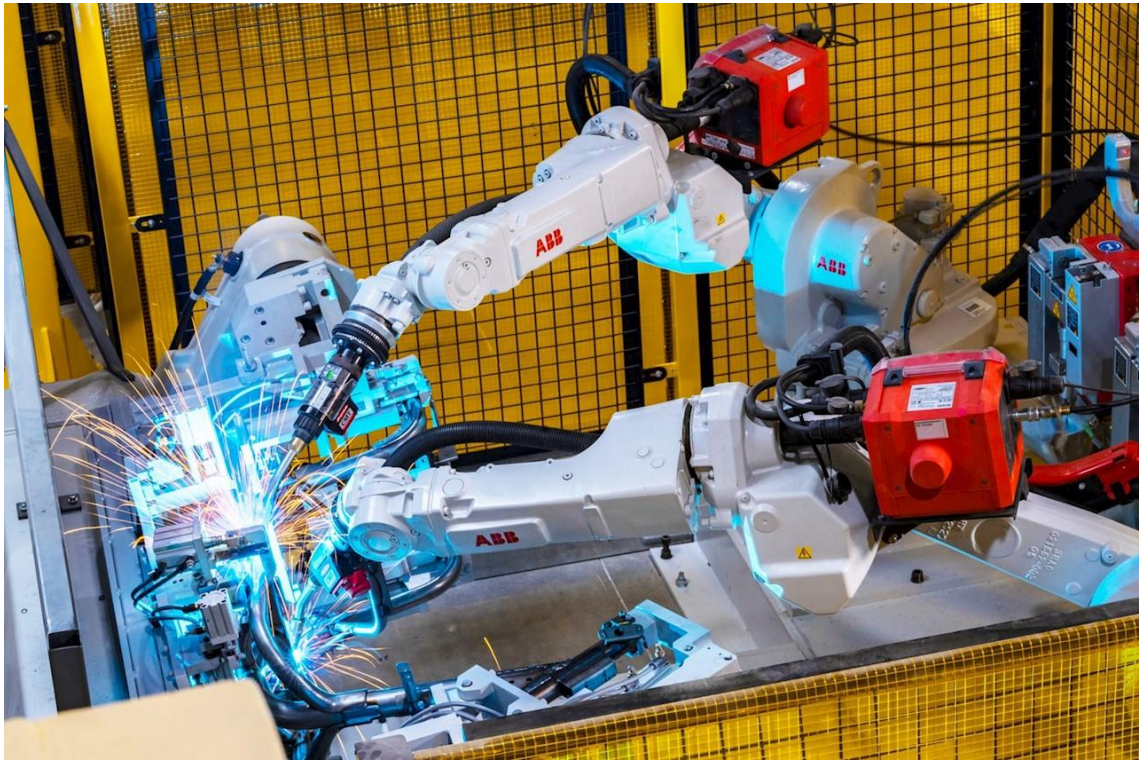
Myös yhteistyörobotteja käytetään robottihitsaukseen. Ne ovat joustavuutensa ja helppokäyttöisyytensä vuoksi erityisen sopivia valmistamaan mittatilaustuotteita, joiden koko ja geometria vaihtelevat jatkuvasti, eivätkä tuote-erät ole kovin suuria.



Kuva 16. Korivalmistuslinjasto BMW:n Spartanburgin tehtaalla Yhdysvaltojen Etelä-Carolinassa. Kuva: BMW AG.

Hitsausrobottien käyttö läheiseen ihmisen kanssa tehtävään yhteistyöhön ei sen sijaan ole aivan ongelmatonta: hitsaukseen liittyvien turvallisuusriskien (kuumuus, kipinät/roiskeet, ultraviolettisäteily ja huurut) lisäksi riskinä on törmäys robottiin tai muuhun robottijärjestelmän osaan. Myös työn laatu tulee huomioida. Hitseihin syntyy epäjatkuvuuskohtia valokaaren sammussa kesken hitsaamisen, mikä hankaloittaa esimerkiksi turvapysäytysten käyttöä. Myös nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta vaikuttaa työn laatuun. Robotin on hidastettava liikkeitään ihmisen lähestyessä robottia, jolloin myös sen hitsausnopeus hidastuu. Hitsausnopeuden muutos kesken hitsaamisen vaikuttaa merkittävästi hitsin geometriaan sekä laatuun, ja pahimmillaan se voi myös pilata hitsattavan työkappaleen.

Hitsausroboteille tehokkain turvallisratkaisu lieneekin edelleen näkösuojien käyttäminen sekä kulun rajoittaminen fyysisten esteiden avulla (kuva 17).



Kuva 17. Kahdella ABB IRB 1660 ID -hitsausrobotilla varustettu aidattu robottihitsaussolu. Kuva: ABB Robotics.

6 Yhteenveto

Työn päätavoitteena oli selvittää teollisuusrobottien turvallistamistapoja sekä niiden soveltuvuutta ihmisen kanssa tehtävään yhteistyöhön. Työssä keskityttiin pääasiassa konedirektiivin kanssa harmonisoitujen koneturvallisuuden standardien ohjaamana tehtävään turvallistamiseen ja robottien turvallistamiseen offline-ohjelmoinnilla simulointiympäristössä.

Työn edetessä ilmeni, että standardien ja määräysten mukaan tehtävä robottisolujen turvallistaminen on hyvin vaativa ja solun koosta sekä sovelluksesta riippuen mahdollisesti myös monimutkainen prosessi. Aihe vaati paljon itseopiskelua sekä tiivistä paneutumista teollisuusroboteja ja yhteistyöroboteja koskeviin standardeihin ja teknisiin määräyksiin. Aiheen laajuus asetti työn rajaamisen kannalta myös omat haasteensa, sillä tärkeitä ja huomionarvoisia asioita on hyvin paljon. Lisäksi eräs tärkeimmistä työssä käytetyistä lähteistä (ISO/TS 15066) on saatavilla ainoastaan englanninkielisenä, ja käännöstyötä sekä työn rajausta tehtiinkin puhelinkeskustelujen ja sähköpostin välityksellä työn ohjaajan (Ilkka Carlstedt) kanssa.

Kokonaisuudessaan työn voidaan todeta onnistuneen. Teollisuusrobottien käyttäminen yhteistoimintasovelluksissa on standardien puitteissa tehtynä täysin mahdollista ja joissakin tapauksissa jopa suotavaa. Yhteistoimintaan käytettävissä teollisuusroboteissa turvajärjestelmien on käytännössä aina oltava kuhunkin tilanteeseen sopeutuvia, eli dynaamisia. Dynaamisuuden saavuttamiseksi käytettävien turvalaitteiden on oltava monipuolisia ja usein valosähköisiä sekä jatkuvasti ympäristöään tarkkailevia (turvakamerat ja laserskannerit), jolloin niiden turvallistaminen on usein monimutkaisempaa ja kalliimpaa kuin turvallistaminen fyysisillä suojuksilla ja mekaanisilla turvalaitteilla.

Lähteet

- 1 Aaltonen, Iina; Malm Timo; Marstio, Ilari & Salmi, Timo. Are collaborative robots safe? Verkkoaineisto. VTT. <https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/2398/pro-cap23110_malmsma.pdf>. Luettu 9.12.2020
- 2 Aaltonen, Iina; Marstio, Ilari & Salmi, Timo. Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry.. Verkkoaineisto. VTT. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118303743?via%3Dihub>>. Luettu 9.12.2020.
- 3 Malm, Timo; Marstio, Ilari; Montonen, Jari & Salmi, Timo. 2017. Dynaaminen turvajärjestelmä teollisuusrobotille. Verkkoaineisto. Automaatioväylä. <http://www.automaatiovayla.fi/wp-content/uploads/2017/12/Automaatiovayla_5_2017.pdf>. 05/2017. Luettu 2.12.2020.
- 4 What are professional service robots? A new form of robotic automation outside of the factory setting. Verkkoaineisto. Robotic Industries Association. <<https://www.robotics.org/service-robots/what-are-professional-service-robots>>. Luettu 21.12.2020.
- 5 Collaborative Robot Applications. Verkkoaineisto. Universal Robots. <<https://www.universal-robots.com/applications/>>. Luettu 27.12.2020.
- 6 Market report. Cobot Market to account for 30 % of Total Robot Market by 2027. Verkkoaineisto. Interact Analysis. <<https://www.interactanalysis.com/wp-content/uploads/2019/12/Cobot-Market-to-account-for-30-of-Total-Robot-Market-by-2027-%E2%80%93-Interact-Analysis-PR-Dec-19.pdf>>. 5.12.2019>. Luettu 7.12.2020.
- 7 SFS-EN ISO 10218-1. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. 2011 Osa 1: Teollisuusrobotit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 8 Koneturvallisuuden standardit. Verkkoaineisto. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys & SFS. <http://standardit.fi/files/63/Koneturvallisuus_SFS_esite_web.pdf>. Luettu 30.12.2020.
- 9 SFS-EN ISO 12100. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. 2010. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto.
- 10 Artikkelisarja turvallisen koneen suunnittelusta. Osa 2: Koneen valmistajan ja muiden osapuolten turvallisuusvastuut ja -velvollisuudet. Verkkoaineisto. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys. <<https://metsta.fi/wp-content/uploads/2020/05/Turvallisen-koneen-suunnittelu-osa-2-Koneen-valmistajan-ja-muiden-osapuolten-turvallisuusvast.pdf>>. 2019. Luettu 30.12.2020.

- 11 SFS-EN ISO 13849-1. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmän osat. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. 2010. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto.
- 12 SFS-EN ISO 10218-2. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. 2011 Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 13 ISO/TS 15066. Robots and robotic devices - Collaborative robots. 2016. Geneve, Sveitsi. International Organization for Standardization.
- 14 Teollisuusautomaation standardit. Osio 8: Turvaväylät ja niiden valinta: tekninen raportti IEC/TR 62513. Verkkoaineisto. SESKO. <https://www.sesko.fi/files/100/osio_8.pdf>. Luettu 3.12.2020.
- 15 The basics of limit switches. Verkkoaineisto. Eaton Corporation. <https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/pct_1549250.pdf>. Luettu 30.12.2020.
- 16 Electro-Sensitive Protective Devices (ESPE) For Safe Machines. Opto-Electronic Protective Devices. Verkkoaineisto. SICK AG. <https://cdn.sick.com/media/docs/7/57/057/Whitepaper_Electro_sensitive_protective_devices_ESPE_for_safe_machines_en_IM0062057.PDF>. 18.08.2017. Luettu 30.12.2020.
- 17 Guide for Safe Machinery. Six Steps to a Safe Machine. Verkkoaineisto. SICK AG. <https://cdn.sick.com/media/docs/8/78/678/special_information_guide_for_safe_machinery_en_im0014678.pdf>. 07.07.2015. Luettu 30.12.2020.
- 18 Kiviluoma, Panu. Anturit. KON-C3004 Kone- ja rakennustekniikan laboratoriotyöt. Verkkoaineisto. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/141717/mod_resource/content/1/KON-C3004_Anturit_2015.pdf>. 09.10.2015. Luettu 22.12.2020.
- 19 Owen-Hill, Alex. Robotics Research 101: How Do Force Sensors Work? Verkkoaineisto. <<https://blog.robotiq.com/robotics-research-101-how-do-force-sensors-work>>. 27.05.2016. Luettu 22.12.2020.
- 20 SFS-EN ISO 14120. Koneturvallisuus. Suojukset. Kiinteiden ja avattavien suojusten suunnittelun ja rakenteen yleiset periaatteet. 2015. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 21 RobotStudio product page. Verkkoaineisto. ABB Robotics. <<https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>>. Luettu 27.12.2020.
- 22 Mainio, Juha. 2017. Robotics Training. R104: IRC5-ohjelmoinnin jatkokurssi. Opetusmateriaali. ABB Robotics.

- 23 Operating manual. RobotStudio. Verkkoaineisto. ABB Robotics.
<<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC032104-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. 20.11.2020. Luettu 2.12.2020.
- 24 Technical reference manual. RAPID Instructions, Functions and Data types. Verkkoaineisto. ABB Robotics. < <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A8697&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> >. 16.10.2017. Luettu 2.12.2020.
- 25 Application manual. Functional safety and SafeMove2. Verkkoaineisto. ABB Robotics. < <https://abb.sluzba.cz/Pages/Public/IRC5UserDocumentationRW6/en/3HAC052610%20AM%20Functional%20safety%20and%20SafeMove2%20RW%206-en.pdf> >. 31.10.2018. Luettu 2.12.2020.
- 26 Annala, Leo. 2019. Apua haasteisiin. Yrityksen sisäinen dokumentti. ABB Robotics.
- 27 Safe Robotics - Safety in Collaborative Robot Systems. Verkkoaineisto. SICK AG. <https://cdn.sick.com/media/docs/6/96/996/whitepaper_safe_robotics_en_im0072996.pdf>. Luettu 30.12.2020.
- 28 Robot Accessories - Hand Guidance function. Verkkoaineisto. FANUC Corporation. <<https://www.fanuc.eu/ua/en/robots/accessories/hand-guidance>>. Luettu 27.12.2020.