



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Therese Andtfolk

Ihmisten turvallinen työskentely yhteis- työssä robottien kanssa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

31.10.2020

Tekijä Otsikko	Therese Andtfolk Ihmisten turvallinen työskentely yhteistyössä robottien kanssa
Sivumäärä Aika	24 sivua + 2 liitettä 31.10.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	automaatiotekniikka
Ohjaajat	lehtori Kristian Junno
<p>Tämän insinööriyön tehtävä oli selvittää ihmisten ja robottien yhteistyön turvallisuustaso. Insinööriyön piti selvittää, mitä vaatimuksia robotille asetetaan, kun ihmiset tekevät läheistä yhteistyötä robotin kanssa sekä mitä ihminen pitää silloin ottaa huomioon.</p> <p>Työ tehtiin kirjallisuuden tutkimustyönä. Työssä tutustuttiin standardeihin ja nettisivuihin missä käsiteltiin turvallisuusstandardeja ja muita robottiturvallisuuteen liittyviin ohjeisiin. Tutustuttiin myös eri robottivalmistajien nettisivuihin, varsinkin niihin, missä käsiteltiin cobottiturvallisuutta.</p> <p>Työssä tutustuttiin neljään eri yhteistyömuotoon ja turvallisuustasoon. Huomattiin, että robotit voidaan jakaa kahteen eri luokkaan, perinteiset robotit ja cobotit. Perinteiset robotit pystyvät tekemään yhteistyötä ihmisten kanssa tietyin ehdoin ja ulkopuolisin turvallisuusratkaisuin. Cobotit on suunniteltu aitoon yhteistyöhön ihmisten kanssa, ja niillä on sisäänrakennettuja turvallisuusratkaisuja. Turvallisuutta ajatellen pitää ottaa huomioon koko robottisovellusta, myös käsiteltävä aine ja ympäristö. Aina on myös tehtävä riskien ja vaarojen arviointia, ennen kuin ihminen voi työskennellä turvallisesti yhteistyössä robotin tai cobotin kanssa.</p>	
Avainsanat	Cobotti, robotti, yhteistyö, yhteistoiminta, turvallisuus

Author Title	Therese Andtfolk Safety of Collaboration between Humans and Robots
Number of Pages Date	24 pages + 2 appendices 31 October 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Automation Engineering
Instructors	Kristian Junno, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis work was to clarify the safety of collaboration between humans and robots today. The goal was to find out what requirements are placed on the robot when it is intended to work close to humans and what the human should consider when working closely with the robot.</p> <p>The work was done as a literature research. Standards and websites discussing safety standards and other safety documents were reviewed. Websites of various robot manufacturers were also visited, especially those dealing with cobot safety.</p> <p>The work became acquainted with four different forms of cooperation and security levels. It was found that robots can be divided into two different categories, traditional robots and cobots. Traditional robots can interact with humans under certain conditions and with external security solutions. Cobots are designed for genuine cooperation with human and have built-in security solutions. For safety reasons, the entire robot application must be considered, including the substance to be treated and the environment. A risk and hazard assessment must also always be performed before a person can work safely in collaboration with a robot or cobot.</p>	
Keywords	Cobot, robot, collaboration, cooperation, safety

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Standardit	1
2.1	A-tyyppin standardi SFS-EN ISO 12100	1
2.2	B-tyyppin standardi SFS-EN ISO 13849	3
2.3	C-tyyppin standardit SFS-EN ISO 10218	4
2.4	Tekninen spesifikaatio ISO/TS 15066	5
3	Määritelmiä	5
3.1	Turvaluokiteltu valvottu pysäytys	7
3.2	Käsin ohjaaminen	7
3.3	Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta	7
3.4	Tehon ja voiman rajoittaminen	8
4	Erilaisia robotteja	8
4.1	Perinteinen teollisuusrobotti	8
4.2	Cobotti	9
4.3	Mobiilirobotti	10
4.4	Valmistajien yhteistyörobottien turvallisuusratkaisut	11
4.4.1	Omron TM-Robot	11
4.4.2	Fanuc CR	13
4.4.3	Universal robots	14
4.4.4	Kuka	15
5	Yhteistoiminta ja sen muodot	16
5.1	Jaettu läsnäolo	16
5.2	Vuorotteleva yhteistoiminta	17
5.3	Rinnakkainen yhteistyö	17
5.4	Läheinen yhteistyö	17
6	Työturvallisuus työskentelyssä cobottien kanssa	18
6.1	Riskien arviointi	18

6.2	Riskianalyysi	19
6.3	Riskin merkityksen arviointi	19
6.4	Työturvallisuutta cobottien ansiosta	20
7	Yhteenveto	20
	Lähteet	22
	Liitteet	
	Liite 1. ISO/TS 15066:2016 Liite A, kuva A.1	
	Liite 2. ISO/TS 15066:2016 Liite A, taulukko A.2	

1 Johdanto

Perinteinen teollisuusrobotti on yleensä iso, nopea, voimakas ja kallis. Se on useimmiten kiinnitetty lattiaan ja sen ympärillä on suoja-aidat. Viime aikoina ovat kuitenkin yhteistyörobotit kehittyneet ja nousseet suosioon. Yhteistyörobotti tai cobotti voi liikkua ja työskennellä ihmisten kanssa samassa tilassa eikä se tarvitse turva-aitoja. Se on yleensä pieni, siro ja paljon halvempi kuin perinteinen teollisuusrobotti. Yhteistyörobottia voidaan opettaa kädestä pitäen eikä monimutkaista ohjelmointitaitoa tarvita. Robotti on kuitenkin edelleen kone, ja aina kun ihminen työskentelee koneen kanssa, on turvallisuus otettava huomioon.

Tämän työn tarkoitus on tutkia, millä tavalla yhteistyörobottien turvallisuus on otettu huomioon standardeissa ja ohjeissa sekä mitä vaatimuksia turvallinen työskentely asettaa ihmiselle. Taustatietona käytetään virallisten standardien lisäksi verkosta löytyvää materiaalia, kuten asiantuntijoiden kirjoituksia ja valmistajien esitteitä.

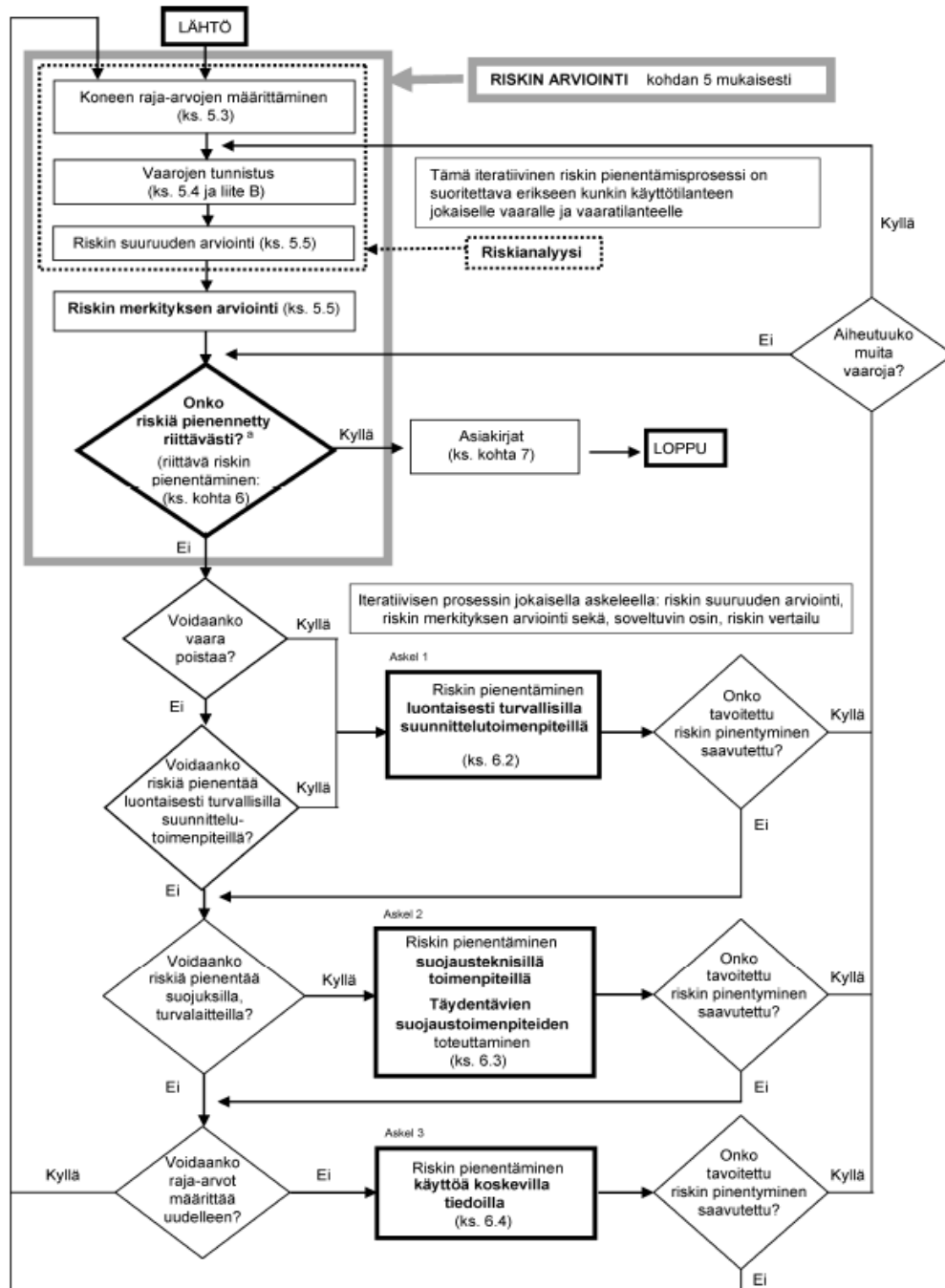
2 Standardit

Standardeissa määritellään turvallisuusvaatimukset koneille ja roboteille. Standardeja on kolme eri luokkaa ja sen lisäksi on ohjeita ja spesifikaatioita. A-luokan standardi on yleinen turvallisuusstandardi, missä esitetään perusteet, suunnitteluperiaatteet ja yleiset näkökohdat. C-luokan standardi käsittelee yksittäinen tuote tai tuoteryhmä. B-luokan standardi on näiden välissä. Jos C-tyyppin standardissa poiketaan yhdestä tai useammasta A standardissa käsiteltävästä teknisestä vaatimuksesta, C-tyyppin standardi on ensisijainen. Samoin on B-standardin kanssa, eli jos B-standardissa poiketaan A-standardissa käsiteltävän asian vaatimuksesta, B-standardi on ensisijainen, mutta C-standardi on ensisijainen B-standardia kohtaan. [1, s. 10.]

2.1 A-tyyppin standardi SFS-EN ISO 12100

Kun käsitellään robotteja, tärkein A-tyyppin standardi on SFS-EN ISO 12100 Koneturvallisuus, yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. Tämä

standardi on vuodelta 2010. Vaikka standardi on jo kymmenen vuotta vanha, se pätee edelleen. Siinä on määritelty toimintatavat vaarojen tunnistamiseksi sekä riskin arvioimiseen. Strategia vaarojen poistamiseen ja riskin pienentämiseen löytyy myös tästä standardista. Riskin arviointi on sarja loogisesti eteneviä vaiheita, jotka ovat kuvattuna standardissa 12100 (kuva 1). Kaavio on hyvä apuväline riskien arvioinnissa. [1, s 28–30.]



Kuva 1. Riskin pienentämisprosessi [1, s 30].

Tämän työn luvussa 6.1 *Riskien arviointi* käsitellään tarkemmin mitä riskien arvioinnissa tulee ottaa huomioon.

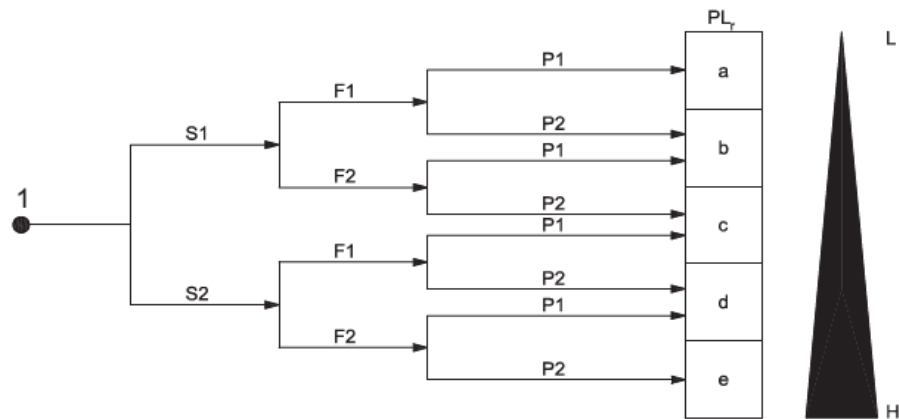
2.2 B-tyypin standardi SFS-EN ISO 13849

Standardi SFS-EN ISO 13849 on B-tyypin standardi, joka käsittelee koneturvallisuutta ja turvallisuuteen liittyviä ohjausjärjestelmien osia. Tässä määritellään PL-tasot, jotka osoittavat ohjausjärjestelmän osien kykyä suorittaa turvatoiminto ennakoitavissa olosuhteissa ja vaarallisen vikaantumisen todennäköisyys tuntia kohden. Taulukossa 1 on viisi PL tasoa ja niille määritellyt vaihtelualueet. [2, s. 19.]

Taulukko 1. Suoritustasot (PL) [2, s. 19].

PL	Vaarallisen keskimääräisen vikaantumisaajan todennäköisyys tuntia kohden (PFHD) 1/h
a	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ to $< 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$

Samassa standardissa, ja kuvassa 2, esitetään myös, mihin tekijöihin vaarallisen tapahtuman esiintymistodennäköisyyden PL_r arvioinnin pitäisi perustua. Siinä huomioidaan vamman vakavuus, tapahtuman toistuvuus ja vaaran välttämisen todennäköisyys. Esimerkiksi jos vahinko sattuu ja se johtaa yleensä niin lievään vammaan, että siitä voidaan parantua jonkin ajan kulutta, niin silloin mennään S1-haaraan. Sen jälkeen arvioidaan kuinka usein ja kuinka kauan altistutaan vaaralle. Jos altistutaan toistuvasti, esimerkiksi joka kerta kun robotti tarttuu esineeseen, mennään F2-haaraan. Lopulliseksi arvioidaan, onko mahdollista välttää vaaraa, ja jos on, mennään P1-haaraan, muuten P2-haaraan. Tässä esimerkissä päädytään siis PL_r tasoon b tai c.

**Selite**

- 1 Aloituskohta turvatoiminnon osuudenarvioimiseksi riskin pienentämisessä
 L Osuus riskin pienentämisessä pieni
 H Osuus riskin pienentämisessä suuri
 PL_r Vaadittava suoritustaso

Riskimuuttujat:

- S Vamman vakavuus
 S1 Lievä (tavallisesti palautuva vamma)
 S2 Vakava (tavallisesti palautumaton vamma tai kuolema)
 F Vaaralle altistumisen taajuus ja/tai kesto
 F1 Harvoin...toisinaan ja/tai lyhyt altistumisaika
 F2 Toistuvasti...jatkuvasti ja/tai pitkä altistumisaika
 P Mahdollisuus välttää vaaraa tai rajoittaa vahinkoa
 P1 Mahdollista tietyissä olosuhteissa
 P2 Tuskin mahdollista

Kuva 2. Vaadittavan suoritustason PL_r määrittäminen turvatoiminnoille [2, s. 55].

2.3 C-tyyppin standardit SFS-EN ISO 10218

Kaksi C-tyyppin standardeja, jotka pohjautuvat standardista 12100, ovat SFS-EN ISO 10218-1:2011. Robotit ja robotiikkalaitteet, turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit, ja osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Näissä standardeissa on määritetty vaatimuksia ja ohjeita teollisuusrobottien turvalliselle suunnittelulle, turvallisuustoimenpiteille ja käytölle. Niissä on kuvattu roboteihin liittyviä perusvaaroja ja esitetty vaatimuksia riskien poistamiseksi tai vähentämiseksi. Osa 1 ei käsittele robottia täydellisenä koneena eikä muita kuin teollisuusrobotteja. Tuvalisuusperiaatteet voidaan kuitenkin soveltaa muissakin roboteissa. Osassa 2 esitetään ohjeita turvallisuuden varmistamiseksi robottien yhdistämisessä ja asentamisessa. Se täydentää osaa 1. [3, s. 8–1; 4, s. 5.] 2011 kun ISO 10218 kirjoitettiin, yhteistoimintarobotteja ei juuri ollut olemassa. Sen takia ne osuudet, jotka käsittelevät yhteistyörobotteja, ovat suppeita ja tarkat raja-arvot puuttuvat.

2.4 Tekninen spesifikaatio ISO/TS 15066

Koska yhteistoimintarobotit ovat yleistyneet, on syntynyt tarve tarkempiin ohjeisiin. Mõnen vuoden yhteistyö ja osallistujia 24 eri maista tuotti lopulta 2016 tekninen spesifikaatioon ISO/TS 15066 [6], joka täsmentää turvallisuusvaatimuksia yhteistyöhön perustuville teollisuusrobotijärjestelmille eli yhteistyörobotille ja työympäristölle sekä täydentää standardissa ISO 10218-1 /-2 annettuja vaatimuksia ja ohjeita yhteistyörobottien toiminnalle. TS 15066 ei toimi itsenäisesti, vaan on lisä ISO 10218-standardiin.

Yksi tärkeimmistä viestistä on, että jos robotin ja ihmisen välissä on mahdollista olla kosketusta ja satunnaiset kontaktit tapahtuvat, siitä ei saa seurata kipua tai vammaa. Aikaisemmin ISO 10218 standardissa mainittiin vain vammaa. Turvallisuuden rajan asettaminen jo kipukynnukseen on iso edistysaskel kohti turvallisempaa robotiikkaa. ISO/TS 15066 ohjeistaa nopeuden ja tehon suhteen merkityksen sekä antaa suuntaviivoja muotoiluun ja syvemmän selvityksen yhteistyön tekniikasta. Siinä on määritelty korkein sallittu voima ja paine sekä energia, joka voi kohdistua kehon eri kohtiin ilman kipukynnysten ylittymistä. [5.]

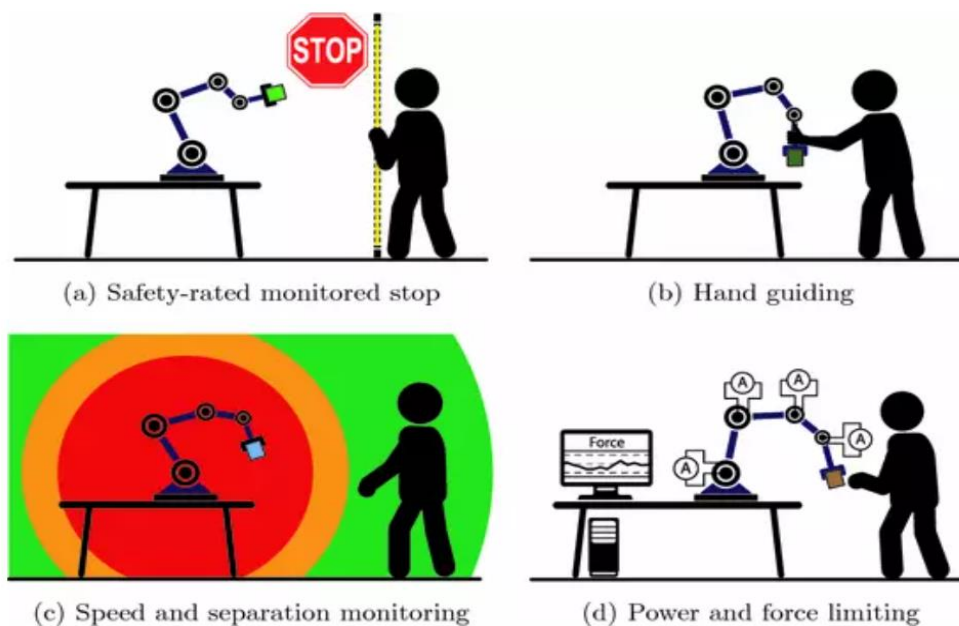
ISO/TS 15066:n liitteessä A on kuva ihmisestä edestä ja takaa, ja siihen on merkitty 29 kohtaa, joiden kipukynnysten raja-arvot on määritelty taulukoissa. Raja-arvot on laskettu ilman suojaruustusta. Tämän työn liitteessä 1 on ote tästä A-liitteestä. Siinä on ihmiskuva, johon on numeroitu eri kohtia ja taulukko (liite 2), jossa on nämä numeroitujen kohtien paineen ja voiman raja-arvoja eri tilanteissa. [6.]

3 Määritelmiä

Standardissa SFS-EN ISO 10218 on määritelty *suojauspysäytys* toiminnan keskeytystyyppinä, joka sallii liikkeiden pysäyttäminen turvallisuuden varmistamiseksi ja joka säilyttää ohjelmalogiikan helpon uudelleen käynnistykseen. *Turvaluokiteltu alennettu nopeus* on nopeustoiminto, joka rajoittaa robotin nopeuden arvoon 250 mm/s tai vähemmän. *Robotti* koostuu robottikädestä ja ohjauksesta. *Robottijärjestelmä* on robotin käsivarsi ja sen päässä oleva työkalu.

Yhteistoiminta tapahtuu ihmisen ja robotin välissä toimintatilassa, jossa tähän tarkoitukseen suunnitellut robotit työskentelevät ihmisten kanssa ja on käytettävissä vain etukäteen määritetyssä tehtävässä. Lisäksi kaikki vaadittavat turvallisuustoimenpiteet pitää olla aktiivisena. *Yhteinen työtila* on sellainen työtila missä ihminen ja robotti/robottijärjestelmä voivat suorittaa työtehtäviä samanaikaisesti tuotannon aikana, ja työtila on suojuksilla ja turvalaitteilla erotetun tilan sisällä.

Yhteistoimintarobotti on robotti, joka on suunniteltu niin, että se voi olla suoraan vuorovaikutuksessa ihmisen kanssa tällaisessa yhteisessä työtilassa. *Yhteistyöroboteissa* pitää olla joku seuraavista ominaisuuksista, jotka ovat kuvailtuna kuvassa 3: (a) turvaluokiteltu valvottu pysäytys, (b) käsin ohjaaminen, (c) nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta ja/tai (d) tehon ja voiman rajoittaminen luontaisesti turvallisella suunnittelulla tai ohjauksella. Seuraavaksi selostetaan nämä tarkemmin. [3, s. 12–18, 28, 36; 4, s. 38–41; 7; 8.]



Kuva 3. Neljä turvallisuuteen vaikuttavia ominaisuutta joka yhteistyörobotilla voi olla [8].

3.1 Turvaluokiteltu valvottu pysäytys

Turvaluokiteltu valvottu pysäytys tarkoittaa, että robotin on pysähdyttävä, kun ihminen on yhteisessä työtilassa. Käytännössä tämä yleensä tarkoittaa, että kun ihminen avaa oven tai astuu valoverhon läpi, robotti pysähtyy [9, s 12]. Sillä voi olla vielä virta päällä, mutta se ei liiku, ennen kuin ihminen on poistunut ja kuitannut, että on turvallista jatkaa. Robottisovellus voi myös käynnistyä automaattisesti. Standardissa on myös vaihtoehto tähän, eli robotti hidastaa nopeutta, mikä johtaa tarpeeksi turvalliseen pysäytykseen, kun ihminen on yhteisessä työtilassa. Tämä tarkoittaa, että joko robotti tai ihminen liikkuu, molemmat eivät voi liikkua samaan aikaan kun ihminen on samassa työtilassa robotin kanssa. [7.]

3.2 Käsin ohjaaminen

Käsin ohjaamisessa robotti liikkuu ainoastaan ihmisen liikuttaessa sitä [9, s 12]. Ihminen siis opettaa tai ohjaa miten liikkua ja sekä robotti että ihminen voivat liikkua samaan aikaan. Käsinohjauslaitteisto on oltava lähellä robotin työkalua ja siinä on oltava hätäpysäytin ja sallintalaite. Valvottu nopeustoiminto, jonka nopeusraja on määritelty vaarojen arvioinnissa, pitää olla aktivoituna ennen, kun ihminen tulee työskentelyalueelle [3, s 36]. Nykyään cobottia voidaan opettaa ja ohjata ilman käsinohjauslaitteistoa liikuttamalla suoraan cobottia, mutta cobotille pätee kovemmat turvallisuusominaisuudet (katso kohta 3.4).

3.3 Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta

Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta tarkoittaa, että robotin on ylläpidettävä ennalta määritettyä nopeutta ja etäisyyttä käyttäjästä. Häiriö pitää aiheuttaa suojapysäytyksen. Toisin sanoen, on olemassa eri vyöhykkeitä missä robotin nopeus määrätty siitä, kuinka lähellä ihminen voi olla. Robotti ja ihminen, tai useita ihmisiä voi liikkua samanaikaisesti samassa tilassa, mutta robottisovellus siis hidastaa nopeutta, kun lähestyy ihmistä ja pysähtyy, ennen kun törmää. Kun ihminen on taas turvallisella etäisyydellä, robotti voi taas tähtää liikkeelle automaattisesti. Vyöhykkeet erotetaan yleensä optisesti

valoantureilla tai lasereilla. Tulevaisuudessa turvallisuusratkaisuja voi olla sisäänrakennettuna robottisovelluksessa. [7; 9, s. 12.]

3.4 Tehon ja voiman rajoittaminen

Tehon ja voiman rajoittaminen luontaisesti turvallisella suunnittelulla tai ohjauksella tarkoittaa, että robotti havaitsee, jos siihen kohdistuu epänormaalia voimaa ja silloin se joko pysähtyy tai liikkuu toiseen suuntaan. ISO/TS 15066:ssa ja liitteessä 1 löytyy sallittuja voiman ja paineen raja-arvoja ihmisen eri osa-alueisiin. Robotti on tämän takia yleensä varustettu voima- ja vääntömomenttianturilla. Koko robottisovellus pitää olla suunniteltu läheiseen yhteistyöhön. Jos fyysinen kontakti voi tapahtua, joko tarkoituksella tai vahingossa, robotilla pitää olla tätä ominaisuutta. [7; 9, s. 13.]

4 Erilaisia robotteja

4.1 Perinteinen teollisuusrobotti

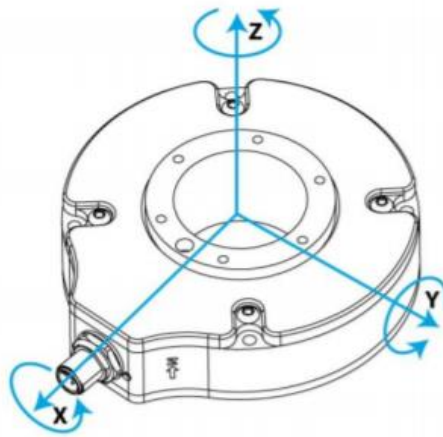
Perinteisen teollisuusrobotin tarkoitus on hoitaa tietty automatisoitu tehtävä ripeästi ilman yhteistyötä ihmisten kanssa, eikä ihmisten turvallisuus yleensä ole sen suunnittelussa pääosassa. Perinteinen teollisuusrobotti voi olla vaarallinen, jos osuu ihmiseen. Sen takia sen ympärillä on erillisiä turvajärjestelmiä ja ne ovat väreilykseltään usein keltaisia, koska keltainen on huomioväri.

Yksi yleisimmistä turvaratkaisuista ovat suoja-aidat, jotka erottavat robottia ihmisistä. Robotin pitää pysähtyä ennen, kun ihminen voi tulla samalle puolelle aitaa, kun robottia. Pysähtyminen voi tapahtua monella eri tavalla, joko niin, että robotti pysäytetään manuaalisesti ennen kuin ihminen lähestyy sitä, tai suojapysäytys muulla ratkaisulla. Aidassa voi olla ovi, johon on kytketty turvamekanismi, joka pysäyttää robotin, kun ovi avataan, tai samalla periaatteella toimiva valoverho tai muu turvamekanismi. Joka tapauksessa robotti pitää pysähtyä, kun ihminen tulee lähellä ja se täytyy kuitata tai käynnistää manuaalisesti, kun ihminen on taas turvallisen matkan päästä robotista. [1; 3; 4; 10.]

4.2 Cobotti

Cobotiksi kutsutaan yleensä yhteistyörobotti, joka täyttää ehdon *3.4 Tehon ja voiman rajoittaminen* [11, s. 5]. Cobot on lyhenne englanninkielisistä ”collaborative robot”, eli yhteistyörobotti. Se on suunniteltu työskentelemään yhteistyössä ihmisten kanssa sekä ihmisten läheisyydessä ilman muita turvalaitteita, niin että kontakti sallitaan. Sen takia se on yleensä kevytrakenteinen, sillä on pyöreät muodot, pehmeät reunat, rajoitetut nopeudet ja voimat sekä on hiljainen. Osalla voi myös olla pehmustettu kuori, joka vähentää entisestään voiman tunne ihmiseen. Sillä on integroidut turvaratkaisut ja tunnistaa siihen kohdistuvat voimat. Se pysähtyy, jos siihen kohdistuvat voimat ylittävät tietyt turvarajat. Sillä voi myös olla esimerkiksi optisia antureita, tuntoherkkäantureita, voimavääntömomenttiantureita ja/tai muita antureita, jotta se voi havaita esteitä ja sen takia ulkopuolisia turvaratkaisuja kuten turva-aitoja ei tarvita. Ihminen voi liikkua turvallisesti cobottien kanssa samoissa tiloissa. Cobotti on yleensä myös helposti siirrettävä. Cobotti on tavallisesti eri värinen kuin teollisuusrobotti. Mitä lähempi yhteistyö ihmisen ja robotin välillä, sitä korkeammat turvallisuusvaatimukset ovat. Turvallisuustoimenpiteitä voi olla aina antureista ja logiikasta toimilaitteisiin. Edelleen on muistettava, että vaikka cobotilla on CE-merkintä ja valmistaja takaa, että se on turvallinen, sen käyttö ei välttämättä ole tuvallista. Sen takia riskien ja vaarojen arviointia on aina tehtävä. Olosuhteet, robotin työkalut ja kuorma vaikuttavat merkittävästi turvallisuuteen, ja näin ollen voidaan tarvita esim. suoja-aitoja myös cobotille. [10; 11; 12.]

Voimavääntömomenttianturi ei ole sama kuin tuntoherkkä anturi, eli robotti ei tunne esi-
nettä mikä osuu siihen, vaan rasiusta eri suunnissa. Tämä tarkoittaa, että cobotti voi
kyllä tuntea esinettä työssään ilman että se pysähtyy, mutta jos jokin esine osuu siihen
niin että voimat kohdistuu ei toivottuun suuntaan, sen täytyy pysähtyä. Voimavääntömo-
menttianturi (kuva 4) on laite, joka voidaan sijoittaa robottikäden ja työkalun välissä. Se
havaitsee rasiukset ja vääntömomentit mitkä kohdistuvat työkaluun. Sensori havaitsee
voimia kolmessa suunnassa (x, y, z) ja vääntömomentin niiden ympärillä. Se saa siis
havaintoja siitä mitä tapahtuu työkalulla. Niin kauan, kun anturin rekisteröimät luvut ovat
sallitun rajan sisällä, cobotti voi jatkaa työtään. Cobotti voidaan myös varustaa tuntoherk-
käanturilla, jonka ansiosta cobotti pysähtyy tai vaihtaa suuntaa heti kun siihen koskee.
[13.]



Kuva 4. Voimavääntömomenttianturi [13, s. 4].

Vaikka cobotti muotonsa ja antureiden ansioista ei voisi vahingoittaa ihmistä, ihminen voi loukkaantua, jos robotti käsittelee painavaa tai terävää esinettä ja jotain menee pieleen. Sen takia vain alle 1 kg:n hyötykuormaa käsittelevää cobottia voidaan pitää luonnollisesti turvallisena [11, s. 10].

4.3 Mobiilirobotti

AMR on lyhenne englannin kielestä autonomus mobile robot, eli suomeksi itsestään liikkuva robotti. Mobiilirobotti tai automaattitrucki ovat myös nimityksiä näille. Näitä käytetään esimerkiksi logistiikassa helpottamaan ihmisten työtä. AMR hoitaa monotoniset ja raskaat tehtävät. Niitä on suunniteltu navigoimaan turvallisesti samassa tilassa ihmisten kanssa. Erilaiset sensorit ja ohjelmistot takaavat turvallisen työskentelyn. Liikkuvat robotit voivat hidastaa, muuttaa suuntaa tai pysähtyä estääkseen törmäyksen. Yksi mobiilirobottien tärkeämmästä hyödyistä on niiden konenäkö. Useat sensorit havaitsevat ympäristön reaaliajassa. Tämä on tärkeä muuttuvassa ympäristössä missä robotti liikkuu. Mobiilirobotilla on kyky oppia ympäristönsä joko ladatusta kartasta tai ajamalla ympäri samalla kun se tekee kartan. Tämä helpottaa sen käyttöönottoa uudessa tai muuttuvassa ympäristössä. Jotkut liikkuvat robotit voivat itse uudelleenohjelmoida reittinsä, jos edessä on este. Koska kehitystä tapahtuu koko ajan, tällä hetkellä ei ole olemassa tarpeeksi ajankohtaista standardia mobiilirobotille, mutta uutta ollaan kehittämässä. Siihen asti vanhat standardit ovat pitäviä. [14; 15.]

4.4 Valmistajien yhteistyörobottien turvallisuusratkaisut

4.4.1 Omron TM-Robot

Kuvassa 5 on Omronin TM-Robotin cobotti, jolla on integroitu konenäkö ja pysähtymismekanismi, joka aktivoituu heti törmäyksessä [16]. Tätä cobottia on sanottu älykkääksi, koska se tunnistaa säännönmukaisuuksia ja esineiden paikkoja konenäköjärjestelmän ansioista.



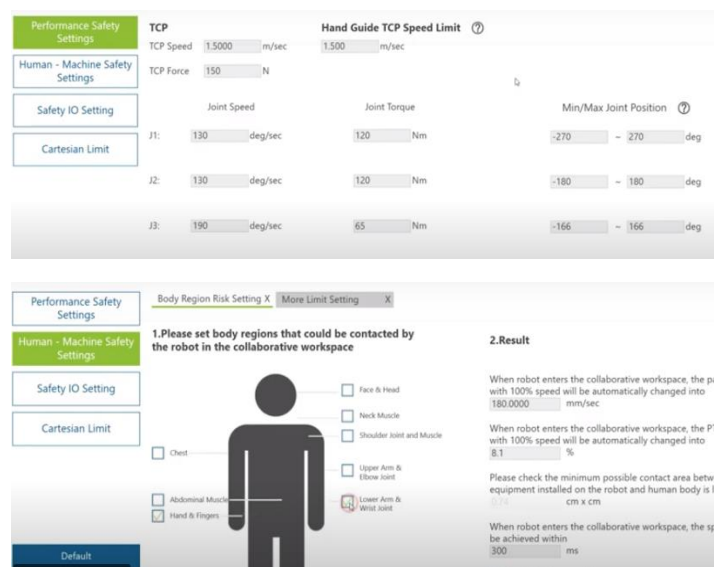
Kuva 5. Omron TM-yhteistyörobotti, jolla on integroitu kamera [16].

Omron TM-cobotit täyttävät turvallisuusvaatimukset, jotka ovat määriteltynä standardeissa IEC 61508 sekä EN ISO 13849–1:2008 tai IEC 62061 :2005 ja ISO 10218–1 ja ISO/TS 15066. Omronilla on 17 turvallisuustoimintoa, mm. voiman ja tehon rajoituksia, turvapysäytys törmäyksessä ja hätäpysäytys. Hätäpysäytys on kontrolloitu pysäytys, jonka jälkeen virta katkaistaan, kun taas turvapysäytys on myös kontrolloitu pysäytys, mutta virta jää päälle. Käynnistyminen turvapysäytyksen jälkeen on siis nopeampaa kuin hätäpysäytyksen jälkeen. Cobotti katkaisee automaattisesti virrat, jos nivelkohdat rekisteröivät epänormaalia liikkuvuutta turvapysäytyksen jälkeen. Omronin turvallisuustoimintoihin kuuluu myös, että jos cobottia yhdistetään toiseen robottiin, esimerkiksi liikkuvaan vaunuun eli mobiilirobottiin, turvallisuustoiminnot pitää myös yhdistyä. Kuvassa 6 nähdään Omronin oma, mobiilivalmiudella varustettu malli, jotka on integroitu LD-mobiilirobottiin. Nämä liikkuvat itsenäisesti ja väistävät ihmisiä ja muita esteitä. [17; 18.]



Kuva 6. Omronin TM-cobotti joka on yhdistetty mobiilirobottiin [18]

Ohjelmistoon kuuluu käyttöliittymä, josta otteita kuvassa 7. Ylempi ote näyttää valikon missä työntekijä voi helposti muuttaa nopeuden ja voiman pienemmäksi. Alempi ote on valikosta, jossa valitaan, mitkä kehonosat voivat osua robottiin, ja valintojen mukaan tietyt arvot muuttuvat pienemmäksi. Ohjelmalla työntekijä voi myös määrätä, mihin asti robotti pystyy liikkua eri suunnissa. Täten saadaan näkymätön seinä tai häkki, jonka läpi robottikäsi ei pääse. [19.]



Kuva 7. Omronin käyttöliittymä [19].

4.4.2 Fanuc CR

Fanuc C- cobotit joko pysähtyvät tai vetäytyvät kosketuksesta ja käynnistyvät uudelleen napin painalluksesta [20]. Tämä estää sen, ettei cobotti lähtisi uudelleen liikkeelle ennen, kun ihminen on ehtinyt poistua tieltä. Yhteistyörobotin ominaisuuksista *nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta* täyttyy, sillä coboteilla on optisia antureita, joiden ansiosta niiden nopeus voidaan muokata sen perusteella, kuinka lähellä ihminen on. Isoimmalla cobotilla, CR35iA, on tämän lisäksi pehmeä suojakuori, mikä vähentää puristumisvaara. Kuvassa 8 nähdään erikokoisia Fanucin vihreitä cobotteja. Vihreä väri viestii, että kyseessä on yhteistyörobotti, joka voi olla turvallinen työkaveri ilman ulkopuolisia turvajärjestelyjä, kunhan riskien ja vaarojen arviointia tehdään ensin. Kaikki CR-sarjaan kuuluvat cobotit täyttävät ISO 10218:n vaatimukset ihmisten kanssa työskentelyyn.

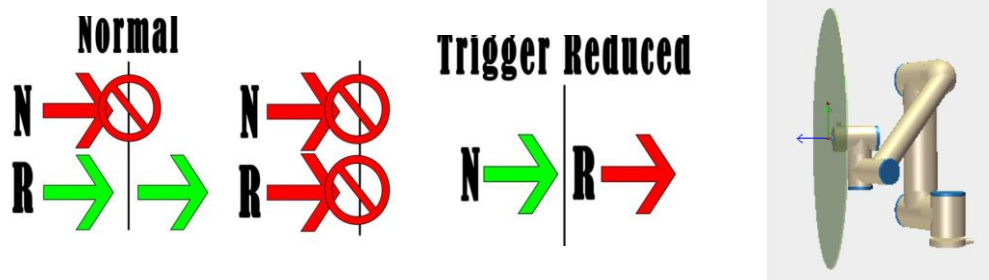


Kuva 8. Fanucin CR-sarjaan kuuluvat cobotit ovat vihreitä [20].

Vaikka cobotit täyttävät turvallisuusvaatimukset, työskentely niiden lähellä ei välttämättä aina ole turvallista. Varsinkin isoin cobotin, CR35iA läsnäoloon pitää kiinnittää huomiota siihen mitä se tekee. Se voi käsitellä jopa 35 kg painavia esineitä, ja jos jotain menee pieleen ja näin painava esine putoaa työntekijän päälle, se voi aiheuttaa vammautumista.

4.4.3 Universal robots

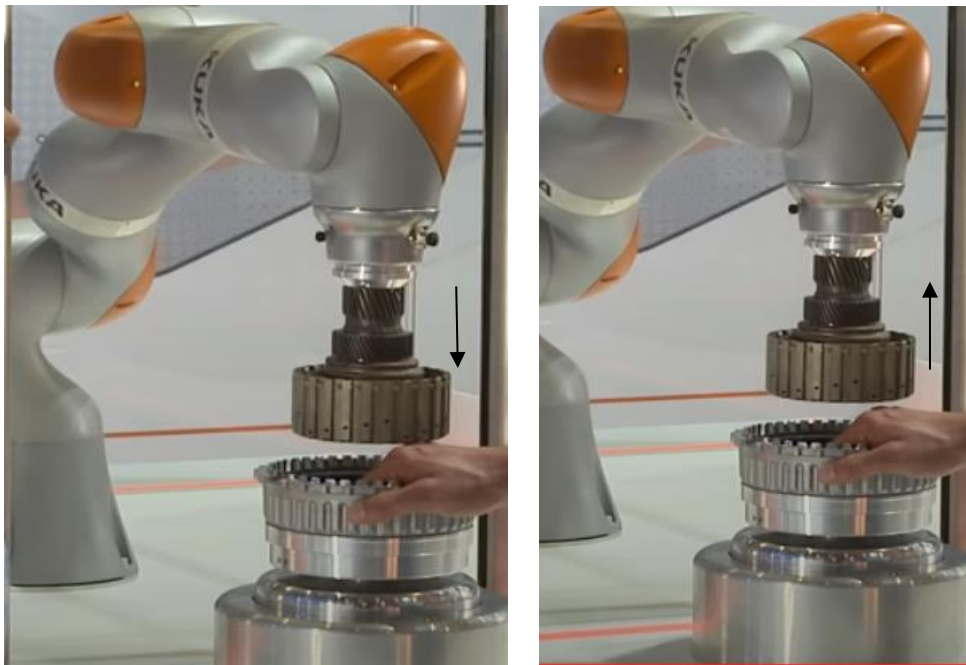
Universal robotsissa [21] on 17 sisäänrakennettua turvallisuustoimenpiteitä. Näistä voisi mainita voimarajoitus, jonka ansiosta se pysähtyy heti, kun osuu johonkin, ja jatkaa napin painalluksesta. Toinen ratkaisu on, että voidaan määritä työskentelyalueen rajat, jotta cobotti pystyy liikkumaan vain rajatun alueen sisällä. Rajalla voidaan myös määrittellä, että toisella puolella rajaa cobotti työskentelee nopeasti, ja rajan toisella puolella, missä työntekijöitä voi olla, se on rajoitetussa tilassa ja liikkuu hitaammin. Kuvassa 9 on kuvailtu kolme eri tapausta Universal Robots cobotista CB3. Ensin on kuvailtu, että normaalitilanteessa cobotti ei ylitä rajaa, mutta jos se ajetaan rajatulla asetuksella se voi ylittää rajan. Toisessa kuvassa raja on aktivoitu molemmilla asetuksilla ja viimeisessä tila muuttuu, kun cobotin käsi ylittää rajaa. Viimeisenä oikealle on kuva cobotista ja raja-alueesta ohjelmointitilanteessa.



Kuva 9. Universal robots, eri mahdollisuuksia ohjelmoida cobotin käyttäytyminen rajalla ja visuaalinen kuva cobotista [26].

4.4.4 Kuka

Kukan yhteistyörobotti on nimeltään LBR iiwa. LBR tulee saksan kielestä "Leichtbauroboter" ja iiwa englannin kielestä "intelligent industrial work assistant" eli kevytrakenteinen robotti ja älykäs teollisuustyön avustaja. LBR iivalla on seitsemän akselia ja jokaisella on vääntömomenttisenänsori mikä mahdollistaa yhteistyötä ihmisen kanssa. Se aistii kosketuksen heti sisäänrakennettujen vääntömomenttisenänsorien ansiosta ja vähentää silloin käytettävän voiman ja nopeuden ja voi vetäytyä taaksepäin. Kuvassa 10 Kukan LBR iiwa cobotti törmää hiljaisella nopeudella käteen ja vetäytyy heti takaisin, ennen kun ihminen ehtii tuntea kipua. Se yrittää hetken päästä uudelleen ja jos käsi on edelleen siellä, se vetäytyy taas mutta jos käsi on poissa se jatkaa työtään.



Kuva 10. Kukan yhteistyörobotti huomaa esteen ja vetäytyy. Videon kuvakaappaus Kukan kotisivulta [22].

Sen tuntoherkkä tarttuja käsittelee myös hauraita esineitä hellästi. Se voi työskennellä nopeasti, kun se on turva-aidan sisäpuolella, mutta yhteisessä työtilassa, missä kontakti voi tapahtua, LBR iiwa on turva-asetuksella. Se tarkoittaa, että nopeus ja voima on rajoitettu sekä voimasensorit ovat aktivoituna. [22.]

5 Yhteistoiminta ja sen muodot

Yhteistoiminta, yhteistoimintarobotti ja yhteiset työtilat on määritelty standardissa SFS-EN ISO 10218 osassa 1 ja 2 [3, s. 19; 4, s. 38]. Tällä määritelmällä myös perinteinen teollisuusrobotti voi toimia yhteistoimintarobottina, kunhan tarvittavat turvallisuustoimenpiteet kuten mm. enimmäisnopeuden määrittäminen toteutetaan ensin. Perinteinen teollisuusrobotti ei kuitenkaan ole cobotti, ja se vaatii esimerkiksi turva-aitoja yhteisen työtilan ympärille. Mutta tämä pätee myös toisinpäin, eli cobotiksi suunniteltu robotti voi olla vaarallinen, jos se käsittelee vaarallisia aineita ja täten tarvitsee aitoja tai muita suojausratkaisuja. Cobotiksi suunniteltu robotti voi esimerkiksi tehdä osan työstä yhteisessä työtilassa ja osan työstä erillisessä tilassa esimerkiksi valoverhon erottamassa häkissä. Eri tilanteissa ja yhteistoiminnan muodossa vaaditaan eri turvallisuustasoa. Tässä esitellään neljä eri yhteistoiminnan muotoja. Ensimmäisessä, jaettu läsnäolo, robotti ja ihminen eivät jaa samaa työpistettä, ovat vain muuten lähekkäin samassa solussa. Viimeinen yhteistoiminnan muoto, eli läheinen yhteistoiminta, on jo niin vaativa turvallisuuden näkökulmasta, että perinteinen iso teollisuusrobotti ei siihen yleensä sovi.

5.1 Jaettu läsnäolo

Kun robotti ja ihminen työskentelevät samassa avoimessa solussa, mutta eivät varsinaisesti yhdessä, kyseessä on jaettu läsnäolo (coexistence). Robotti pysäytetään, tai sille tapahtuu suojapysäytys, jos ihminen menee lähelle. Esimerkki tästä voi olla kun ihminen tuo lisää materiaalia robotille. Ihminen ja robotti toimivat siis vierekkäin mutta voi olla ilman turva-aitoja. Koska lähtökohtana on, että robotti pysäytetään, ennen kun ihminen menee lähelle, tämä mahdollistaa hieman matalampien turvallisuusvaatimusten käytön kuin cobotille. Sellaisia työvaiheita ei kuitenkaan saa olla, että kontakti voisi aiheuttaa vaaraa ihmiselle. Aina on myös muistettava suorittaa vaarojen arviointia. Standardin 10218 yhteistyövaatimus *turvaluokiteltu valvottu pysäytys ja/tai nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta* on yleensä toiminnassa tässä. Joskus voi myös olla *tehon ja voiman rajoittaminen*. [10; 23.]

5.2 Vuorotteleva yhteistoiminta

Vuorottelevasta yhteistoiminnasta (synchronous cooperation, sequential cooperation) on kyse silloin, kun ihminen ja robotti jakavat yhteisen työalueen vuorotellen. Kumpikin tekee työtä yhteisellä alueella, mutta eivät samaan aikaan. Tähän vaaditaan turvallisuusratkaisuja siihen, ettei ihminen ja robotti pystyisi työskentelemään samaan aikaan samalla alueella. Voidaan käyttää samat standardin ISO 10218 yhteistyön turvavaatimukset kuten jaetussa yhteistyössä. Myöskään tässä yhteistoiminnassa ei yleensä tapahdu fyysistä kontaktia robotin ja työntekijän välillä. [10; 23.]

5.3 Rinnakkainen yhteistyö

Kun ihminen ja robotti työskentelevät vierekkäin tai vastakkain samassa työtilassa, mutta eivät samanaikaisesti saman kappaleen kanssa, puhutaan rinnakkaisesta yhteistyöstä tai vaan yhteistyöstä (cooperation). Yhteistyössä robotti ei yleensä kosketa ihmistä, koska he työskentelevät eri kappaleen kanssa. Tästä huolimatta pitää ottaa huomioon, että robotti ja ihminen voivat koskettaa toisiaan vahingossa. Sen takia robotti pitää olla varustettuna jollain turvamekanismilla esimerkiksi *nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnalla ja/tai tehon ja voiman rajoittamisella*. [10; 23.]

5.4 Läheinen yhteistyö

Samaan aikaan saman asian kanssa työskentelevä robotti ja ihminen ovat läheisessä yhteistyössä (collaboration). Silloin robotti voi osua ihmiseen joko suoraan tai välillisesti käsiteltävän kappaleen välityksellä. Tämä vaatii korkean turvallisuustason. Turvarajojen valvonta ja nopea pysäytys ovat välttämättömiä. Läheinen yhteistyö on vielä melko uusi toimintatapa, mutta se on yleistymässä. Tässä yhteistyömuodossa kontakti on välttämätön. [10; 23.]

6 Työturvallisuus työskentelyssä cobottien kanssa

6.1 Riskien arviointi

Standardit ISO 12100 ja ISO 10218-2:2011 [1; 4] ohjeistavat riskien arviointiin ja vaarojen pienentämiseen. TS 15066 [6] antaa neuvoja, miten riskien arviointia yhteistyörobotille voidaan tehdä ja ohjeistaa voiman ja paineen aiheuttaman kipukynnyksen raja-arvoja kehon eri osiin.

Vaikka yhteistyörobotti tai cobotti olisi suunniteltu turvalliseen työskentelyyn ihmisten kanssa, on aina tehtävä riskien arviointia, ja tarpeen mukaan toimenpiteitä vaarojen poistamiseen tai pienentämiseen. Yhteistyörobotin turvallinen työskentely riippuu koko robottijärjestelmästä, sen käsiteltävästä aineesta sekä ympäristöstä. Vaikka yksi osa olisi turvallinen, kokonaisuus ei välttämättä aina ole. Sen takia riskien arviointia on tehtävä kokonaisvaltaisesti sekä robotille itselleen, siihen liitetyle työkälulle työstettävän kappaleen kanssa ja ilman, että ympäristölle, jossa se työskentelee.

Ympäristön kosteus, lämpötila tai pölyisyys voi myös vaikuttaa robotin toimintaan. Myös ympäristön luonne ja cobotin tarkoitus vaikuttaa riskien arviointiin. Teollisuusympäristö eroaa paljon laboratorio tai sairaalaympäristöstä. Teollisuuden avustusrobotin riskit ovat erilaiset kuin sairaalan tai kaupan palvelurobotin riskit. Riskin arviointiin kuuluu riskianalyysi missä määritetään koneen raja-arvot, tunnistetaan vaarat sekä arvioidaan riskin suuruutta.

Toinen osa riskinarvioinnista on riskin merkityksen arviointia, jonka pohjalta päätetään, tarvitaanko riskin pienentämistä vai ei. Kehitys menee nopeasti eteenpäin, ja cobotteja on helposti uudelleenohjelmoitavissa. Riskianalyysi pitää kuitenkin olla ajan tasalla. Aina, kun cobottia ohjelmoidaan uudestaan tai työtehtävä tai ympäristö muuttuu, pitää tarkistaa ja päivittää riskianalyysiä. [1; 24.]

6.2 Riskianalyysi

Aluksi määrätään robotin ja työskentelyalueen rajat ja käyttötarkoitus. Huomioidaan kaikki tekijät, jotka vaikuttavat työskentelyalueeseen, kuten onko alueella esteitä ja muita robotteja tai ihmisiä. Huomioidaan koko prosessia ja kaikki osat. Voiko nivelten tai työkalun ja esineen väliin jäädä puristuksiin? Kun tarkastellaan ympäristöä pitää kiinnittää huomioita sellaisiin kohtiin, missä ihminen voi jäädä esteen ja robotin/työkalun väliin [7]. Cobotin liikkuvuuteen pitää kiinnittää huomiota, eli onko cobotti kiinteä vai onko se asennettu liikkuvaan vaunuun? Ihmisen kokemus vaikuttaa myös turvallisuuteen. Kokematon henkilö voi suuremmalla todennäköisyydellä joutua vaaraan kuin kokenut työntekijä, tai henkilö, joka on tutustunut cobotin toimintaan. On tärkeä tehdä riskianalyysi myös odottamattomasta tilanteesta. Suurin osa riskeistä tapahtuu, kun jotain ei mennyt niin kun olisi pitänyt. Esimerkiksi työntekijä kompastuu, esine putoaa tai jotain jää jumiin [24]. Mitä tapahtuu, jos prosessi jää kesken hätäpysäytyksen tai virran katkaisun takia? Voiko ihminen silloin jäädä puristuksiin vai voiko esine tippua? Myös työstettävän esineen tai aineen laatu vaikuttaa riskin suuruuteen. Terävät esineet ja kuumat aineet ovat vaarallisempia kuin pehmeät materiaalit.

6.3 Riskin merkityksen arviointi

Koska cobotti voi olla kontaktissa ihmisten kanssa, on määriteltävä, koska ja kuinka usein näin voi tapahtua. On myös arvioitava, kuinka suurella todennäköisyydellä kontakti aiheuttaa kipua tai vammaa ja kuinka kauan kontakti kestää. Huomioitava on, ettei cobotti tai mikään osa koko robottijärjestelmästä, saisi osua ihmiseen niskasta ylöspäin [7]. Robotin työkalun ja työstettävän esineen sekä käsivarsien liikkeisiin pitää kiinnittää huomiota, ettei mikään osa ihmisestä voi jäädä puristuksiin [6]. Loukkaantumisen vakavuus ja todennäköisyys sekä mahdollisuus välttyä loukkaantumisesta on myös otettava huomioon [2, s. 54].

Onko mahdollista vähentää robottijärjestelmän paino tai nopeus? Pieneneekö riski, jos vaihdetaan liikeradan suunta? Tarvitaanko sittenkin ulkopuolisia turvaratkaisuja kuten aitoja? Onko kenellä tahansa pääsy robotin työskentelyalueelle vai vain koulutetut

henkilöt? Nämä ovat tärkeitä kysymyksiä, kun mietitään vaarojen poistamista tai riskien pienentämistä. Näihin kysymyksiin pitäisi pystyä vastaamaan ja tehdä toimenpiteitä.

6.4 Työturvallisuutta cobottien ansiosta

Kun riskianalyysi on tehty ja vaarat poistettu tai riskit pienennetty siedettävään tasoon, cobotti voi työskennellä turvallisesti yhteistyössä ihmisten kanssa. Silloin päästään siihen, miksi cobotteja monesti hankitaan. Cobotti voi poistaa vaaroja tai pienentää riskiä. Varsinkin ergonomiset riskit voidaan poistaa tai vähentää. Cobotti vähentää loukkaantumisriskiä ja pitkäaikaisia fyysisiä vaurioita, esimerkiksi jos työ on yksitoikkoista, toistuva ja ergonomisesti epäedullista ihmisille. Jos työssä pitää käsitellä viruksia tai muita vaarallisia tai myrkyllisiä aineita, cobotin käyttö voi vähentää ihmiselle aiheutuvaa riskiä. Cobotin joustavuuden ja rajoitetun voimankäytön ansiosta, se käsittelee varovaisesti myös arkoja aineita ja astioita esimerkiksi laboratoriossa. Cobotti on myös hyvä apuväline, kun on olemassa riski, että ihmisen sormet tai kädet voisivat jäädä puristukseen. Silloin työntekijä voi antaa esineen ensin cobotille joka vuorostaan ojentaa sitä puristus-koneelle. [25.]

7 Yhteenveto

Töissä piti selvittää ihmisten ja robottien yhteistyön turvallisuustaso. Kuinka turvallisia nykyajan robotit ovat, ja mitä ihminen pitää ottaa huomioon, kun työskentelee yhteistyössä robotin kanssa. Töissä tutustuttiin aiheiseen liittyviin standardeihin ja määräyksiin. Tutustuttiin myös teoriatasolla muutamiin robotteihin, jotka voivat tehdä yhteistyötä ihmisten kanssa.

Markkinoilla löytyy sekä perinteisiä isoja, tehokkaita robotteja, jotka eivät ole suunniteltu tekemään töitä samassa tilassa ihmisten kanssa, että cobotteja, jotka ovat tarkoitettuja ja suunniteltuja toimimaan yhteistyössä ihmisten kanssa. Molemmat robotit soveltuvat yhteistyöhön ihmisten kanssa ISO 10218:n yhteistyömääritelmän mukaan. Yhteistyö perinteisen robotin ja ihmisen välissä vaatii kuitenkin isompia ulkopuolisia turvallisuusratkaisuja. Siinä vaaditaan usein aita robotin ympärille ja yhteistyöalueelle valoverho tai turvamatto, joka pysäyttää robotin toimintaa, kun ihminen tulee lähelle.

Yhteistyörobotti, joka aistii epänormaalia painetta tai voimaa, ja pysähtyy sen seurauksena, kutsutaan cobotiksi. Cobotilla on sisäänrakennettuja turvallisuustoimenpiteitä, jotta se voi työskennellä ihmisten kanssa samoissa tiloissa ja jopa samanaikaisesti saman kappaleen kanssa. Cobotti toimii yhteistyöalueella hitaalla nopeudella ja pienellä voimalla ja pysähtyy tai vetäytyy ei toivotusta kosketuksesta. Cobotti voi toimia ihmisen avustajana. Teknisessä spesifikaatiossa 15066 on määritelty, että jos kontakti ihmisen ja cobotin välissä tapahtuu, siitä ei saisi seurata kipua. Siinä on voiman ja tehon raja-arvoja ihmisen eri alueen kipukynnyksen ylittämiseen. ISO 10218:n mukaan robotti ei saisi aiheuttaa vammaa ihmiselle, mutta numeerisia arvoja ei ole annettu. Sen takia ISO TS 15066 on paljon tarkempi asiakirja, vaikka se vielä standardia olekaan. Monet valmistajat käyttävät kuitenkin tätä referenssiaineistona. Vaikka cobotti täyttäisi ISO 10218 ja TS 15066 vaatimukset, ympäristö ja käsiteltävät aineet/esineet voi muuttaa sen toimintaa ei-niin turvalliseksi. Sen takia on aina tehtävä riskien ja vaarojen arviointia joista robottisovellusta kohtaan. Oikein käytettynä, riskien ja vaarojen arvioinnin jälkeen, cobotti voi olla turvallinen avustaja.

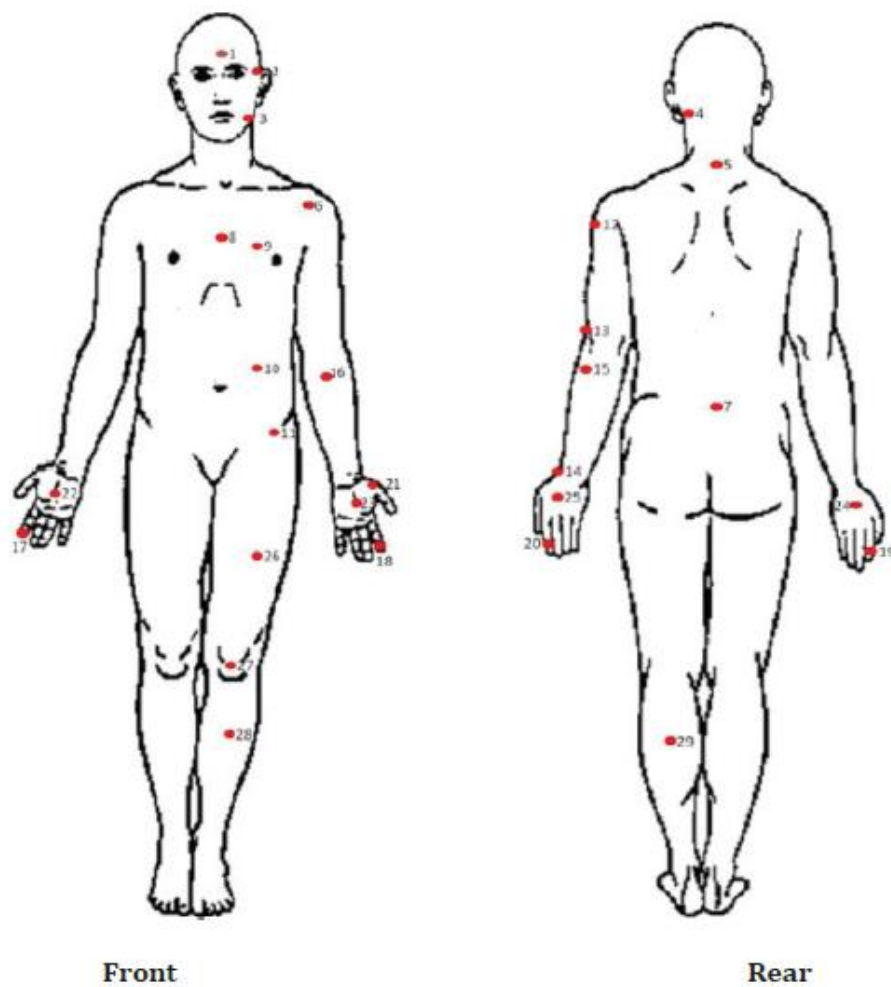
Lähteet

- 1 SFS-EN ISO 12100. Koneturvallisuus. 2010. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto.
- 2 SFS-EN ISO 13849-1. Koneturvallisuus. 2015. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto.
- 3 SFS-EN ISO 10218-1. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto.
- 4 SFS-EN ISO 10218-2. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Helsinki: Suomen standarditoimistoliitto.
- 5 leanrobotics.org. ISO/TS 15066 Explained. E-kirja. Robotiq.com. Luettu 14.9.2020.
- 6 ISO-TS 15066. Robots and robotic devices. 2016. Collaborative robots. Technical Specification. Sveitsi.
- 7 Shea, Roberta Nelson. 2016. ISO/TS 15066 Introduction, RIA National RobotSafety Conference. Verkkoaineisto. Luettu 14.9.2020.
- 8 Sobalvarro. 2020. Here's why human-robot collaboration is the future of manufacturing. Verkkoaineisto: <<https://www.weforum.org/agenda/2020/08/here-s-how-robots-can-help-us-confront-covid>>. Luettu 26.9.2020.
- 9 Bélanger Barrette, Mathieu. 2016. Collaborative Robots Risk Assessment, an Introduction. E-kirja. Robotiqe.com.
- 10 Malm, Timo & Salmi, Timo. 2019. Yhteistyörobotit tulevat - oletko valmis? Automaatioväylä, nro 6, sivut. 12–15, 2019.
- 11 LEAN Robotics. 2020. Cobot ebook final - Collaborative Robot Buyer's Guide. Verkkoaineisto <<https://blog.robotiq.com/hubfs/COBOT%20EBOOK%20FINAL.pdf>>. Luettu 14.09.2020.
- 12 Robottisovellusten turvallinen automaatio. 2020. Pilz. Verkkoaineisto. <<https://www.pilz.com/fi-FI/products/industry/robotics-assembly>>. Luettu 30.9.2020.

- 13 Robotiq.com. Force Torque Sensor - An Introduction. E-kirja. Robotiq.com. <<https://blog.robotiq.com/hubfs/eBooks/EBOOK-FORCE-TORQUE-SENSOR-ROBOTIQ-F.pdf?hsLang=en-ca>>. Luettu 15.9.2020.
- 14 Mullen, E. 2020. Four Tips for Ensuring a Safe Autonomous Mobile Robot Installation. MachineDesign. Verkkoaineisto. <<https://www.machinedesign.com/markets/robotics/article/21121823/four-tips-for-ensuring-a-safe-autonomous-mobile-robot-installation>>. Luettu 1.10.2020.
- 15 Rouse, M. 2019. Mobile robot. IOT Agenda. Verkkoaineisto <<https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/mobile-robot-mobile-robotics>>. Luettu 1.10.2020.
- 16 TechMan Robot. IMPROVING WORLD OF WORK WITH COLLABORATIVE ROBOT APPLICATIONS. Verkkoaineisto. <<https://www.tm-robot.com/en/>>. Luettu 20.09.2020.
- 17 Collaborative Robot Safety Video 1. Omron. Video. <https://www.youtube.com/watch?v=OPdGbMUO7HE&feature=emb_logo>. Katsottu 27.09.2020.
- 18 OMRON Corp. ja yhteistyörobotteja valmistava taiwanilainen Techman Robot Inc. strategiseen yhteistyöhön. 2018. Uutinen Omronin verkkosivulla. <<https://industrial.omron.fi/fi/news-events/news/techman-strategic-alliance>>. Luettu 1.10.2020.
- 19 Collaborative Robot Safety Tutorial - Video 2. Omron. Video. <<https://youtu.be/uUnKZ3xvYIs>>. Katsottu 27.9.2020.
- 20 FANUC. 2019. Experience more Collaborative robots for a wide range of applications. Collaborative-robot-brochure-en.pdf. <<https://www.fanuc.eu/uk/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots>>. Luettu 1.10.2020
- 21 Universal robots. Så fungerar cobotar: cobotens flexibilitet och säkerhet. Video. <<https://www.universal-robots.com/se/saa-fungerar-cobotar/cobotens-flexibilitet-och-saekerhet/>>. Katsottu 23.9.2020.
- 22 KUKA. 2020. Mensch roboter collaboration der LBR iiwa Kuka AG. Verkkoaineisto. <<https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/lbr-iiwa>>. Luettu 26.09.2020.
- 23 Piltz. 2017. MRK – Mensch Roboter Kollaboration ISO/TS 15066. Poster. <https://www.pilz.com/mam/pilz/content/uploads/poster_mrk_de_2017_11_low.pdf>. Luettu 30.9.2020.

- 24 Owen-Hill, A. 2018. 15 mistakes people make with cobot safety. Blogikirjoitus. Robotiq.com. <<https://blog.robotiq.com/15-mistakes-people-make-with-cobot-safety>>. Luettu 21.9.2020.
- 25 Von Schunkert, Andreas. 2019. DER MENSCH IM FOKUS: ARBEITSSICHERHEIT MIT UND DURCH COBOTS. Blogikirjoitus. <<https://blog.universal-robots.com/de/arbeitssicherheit-durch-kollaborierende-roboter>>. Luettu 24.09.2020.
- 26 Universal Robots. 2020. Understanding the safety boundary restricts. Verkkoaineisto. <<https://www.universal-robots.com/articles/ur/understanding-the-safety-boundary-restricts/>>. Luettu 23.9.2020.

Liite 1. ISO/TS 15066:2016 Liite A, kuva A.1 Ihmisen kipupisteet



Liite 2. ISO/TS 15066:2016 Liite A, taulukko A.2

Paineen ja voiman raja-arvot ihmisen eri kehonalueeseen.

Table A.2 — Biomechanical limits

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a p_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Skull and forehead ^d	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	
Face ^d	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	190	150	2	2
	13	Humerus	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	160	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	300	140	2	2
	18	Forefinger pad ND	270		2	
	19	Forefinger end joint D	280		2	
	20	Forefinger end joint ND	220		2	
	21	Thenar eminence	200		2	
	22	Palm D	260		2	
	23	Palm ND	260		2	
	24	Back of the hand D	200		2	
	25	Back of the hand ND	190		2	
Thighs and knees	26	Thigh muscle	250	220	2	2
	27	Kneecap	220		2	
Lower legs	28	Middle of shin	220	130	2	2
	29	Calf muscle	210		2	