

Leevi Korhonen

YHTEISTYÖROBOTTISOVELLUSTEN TURVALLINEN TOTEUTUS

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tammikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Leevi Korhonen: Yhteistyörobotisovellusten turvallinen toteutus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tammikuu 2022

Yhteistyörobotit ovat teollisuusrobotteja, jotka on suunniteltu avustamaan ihmistä työtehtävissä tai työskentelemään samassa tilassa ihmisen kanssa. Yhteistyörobotit pystyvät suorittamaan yksinkertaisia tehtäviä nopeasti ja tarkasti, jolloin ne soveltuvat hyvin tehtäviin, jotka sisältävät paljon toistuvia liikkeitä tai ergonomisia riskejä. Sujuvalla yhteistyörobottien toteutuksella pystytään nopeuttamaan tuotantoa ja parantamaan tuottavuutta antamalla työntekijöille tehtäviä, jotka tuottavat enemmän arvoa.

On tärkeää tietää mistä yhteistyörobottien turvallisuus rakentuu, sillä niiden käyttöönotto voidaan tehdä vasta silloin, kun turvallisuusarvion mukaan vaaratilanteiden riski on hyväksyttävällä tasolla. Yhteistyörobottien turvallisuutta käsitellään laajasti niitä käsittelevissä turvallisuusstandardeissa, joissa annetaan vaatimuksia esimerkiksi yhteistyörobotin suunnitteluun, riskiarvion ja toimintatiloihin. Turvallisuusarvioon vaikuttaa myös yhteistyörobotin toimintaympäristö, eli turvallisuutta tulee ajatella koko robotisolun kokonaisuutena.

Tässä työssä pyritään kokoamaan kokonaiskuva keskeisistä seikoista, jotka täytyy ottaa huomioon turvallisen yhteistyörobotisovelluksen toteuttamiseksi. Lisäksi kerrotaan toimintaperiaatteita ja sovelluksia yhteistyötoiminnan mahdollistavista tekniikoista, kuten käsin ohjaamisesta ja tehon ja voiman rajoittamisesta. Työssä käsitellään myös nykyisiä yhteistyörobottien käyttökohteita teollisuudessa ja analysoidaan niiden suunnittelua turvallisuuden näkökulmasta. Työ on tehty kirjallisuuskatsauksena ja esitetyt asiat on kerätty aiheeseen liittyvistä turvallisuusstandardeista sekä alan tieteellisistä artikkeleista. Teollisuuden käyttökohteiden esimerkkitapauksiin on löydetty tiedot yhteistyörobottien valmistajien verkkosivuilta sekä näiden kumppanien julkaisemilta videoilta.

Löydettiin, että turvallisuusstandardit kertovat kattavasti yhteistyörobottien turvallisuudesta ja niiden antamia säädöksiä tulee noudattaa turvallisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Lisäksi nähdään, että tehon ja voiman rajoittaminen ja käsin ohjaus ovat tehokkaita tekniikoita yhteistyörobotin turvallisuuden rakennukseen. Huomataan, että nämä tekniikat ovat suosittuja yleismallisissa yhteistyöroboteissa, sillä ne ovat hyödyllisiä ja soveltuvat monenlaisiin käyttökohteisiin.

Avainsanat: Yhteistyörobotti, turvallisuus, käsin ohjaaminen, tehon ja voiman rajoittaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. YHTEISTYÖROBOTTI	3
3. YHTEISTYÖROBOTTEJA KOSKEVAT TURVALLISUUSSTANDARDIT	6
3.1 Koneiden turvallinen suunnittelu.....	7
3.2 Turvallisuusvaatimukset teollisuusroboteille	8
3.3 Turvallisuusvaatimukset teollisuusrobottijärjestelmille	10
3.4 Yhteistyörobottien turvallisuus ja suunnittelu	13
4. YHTEISTYÖROBOTIN TURVALLISUUDEN MAHDOLLISTAVAT TEKNIIKAT ..	15
4.1 Turvaluokiteltu valvottu pysäytys.....	15
4.2 Käsien ohjaaminen.....	15
4.3 Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta	16
4.4 Tehon ja voiman rajoittaminen	16
4.5 Yhdistelmät	18
5. YHTEISTYÖROBOTTIEN TURVALLINEN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA	20
5.1 CNC-työstökeskuksen kappaleenvaihto	20
5.2 Laatikoiden pinoaminen	21
5.3 Auton osien kokoonpano.....	23
6. YHTEENVETO.....	25
LÄHTEET	27

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ISO	International Organization for Standardization
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry

1. JOHDANTO

Yhteistyörobotilla tarkoitetaan robottia, joka on suunniteltu avustamaan ihmistä työtehtävissä tai työskentelemään samassa tilassa ihmisen kanssa. Yhteistyörobottien potentiaali on suuri tehtävissä, jotka vaativat sekä ihmisen luovuutta että robotin kykyä suorittaa yksinkertaisia tehtäviä nopeasti ja tarkasti. Sujuvalla toteutuksella pystytään nopeuttamaan tuotantoa ja parantamaan tuotannon tuottavuutta antamalla työntekijöille tehtäviä, jotka tuottavat enemmän arvoa. Samalla pystytään parantamaan työntekijöiden ergonomiaa antamalla hankalia asentoja tai liiallisesti toistoa vaativat työtehtävät roboteille. (Franklin et al. 2020)

Yhteistyörobotin turvallisuuden arvioimiseksi tehdään aina turvallisuusarvio, jossa käydään yksityiskohtaisesti läpi kaikki yhteistyörobotin mahdolliset käyttötilanteet ja arvioidaan jokaisen tilanteen riskit. Robotin käyttöönotto voidaan tehdä vasta siinä tilanteessa, kun turvallisuusarvion mukaan vaaratilanteiden riski on hyväksyttävällä tasolla. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 8–9) Perinteisille teollisuusroboteille riskien pienentäminen tarkoittaa yleensä käyttäjän ja robotin erottavien suojalaitteiden parantamista, mutta yhteistyöroboteille riskien pienentäminen tapahtuu pääasiassa robottijärjestelmän ja yhteisen työalueen paremmalla suunnittelulla (ISO/TS 15066 2016, s. 5).

Tässä työssä käsitellään erilaisia yhteistyörobottien toteutuksessa käytettäviä tekniikoita, kuten käsin ohjaamista ja tehon ja voiman rajoittamista. Käsin ohjaamisessa yhteistyörobotille voidaan näyttää asentoja ja liikeratoja ohjaamalla sitä käsin ja tallentamalla robotin ohjainyksikköön nämä asennot. Opetuksen jälkeen robotti pystyy toistamaan nämä liikkeet uudestaan automaattisesti. Yhteistyörobotti voidaan myös ohjelmoida siten, että ihminen pystyy ohjaamaan sitä käsin esimerkiksi asennustehtävän aikana raskaan kappaleen asennuksen avustamiseksi. (Safeea et al. 2017) Tehon ja voiman rajoittaminen mahdollistaa turvallisen kosketuksen ihmisen ja yhteistyörobotin välillä rajoittamalla robotin liikenopeuden ja voiman turvalliselle tasolle. Tämän tekniikan käyttäminen vaatii tähän tarkoitukseen suunnitellun yhteistyörobotin, joka voidaan tehdä luonnostaan turvallisiksi, tai robotin ohjain voidaan ohjelmoida tunnistamaan törmäykset ja rajoittamaan voima ja liikenopeus näissä tilanteissa riskiarviossa määriteltyjen rajojen sisään. (ISO/TS 15066 2016, s. 15–17)

Työn tarkoituksena on tehdä katsaus yhteistyörobotisovellusten turvallisesta toteutuksesta ja tutustua tarkemmin tehon ja voiman rajoittaminen- ja käsin ohjaaminen -tekniikoihin sekä niiden käyttöön yhdessä muiden yhteistyörobottien toteutuksessa käytettävien tekniikoiden kanssa. Työssä tutkitaan yhteistyörobottien turvallisuuden rakentumista teoriassa ja esitellään lopuksi todellisia esimerkkejä turvallisuuden ja suunnittelun näkökulmasta. Työ tehdään, jotta saadaan koottua selkeä kokonaisuus nykyisistä vaatimuksista turvallisen yhteistyörobotisolun toteuttamiseksi ja nähdään, että miten yhteistyörobotteja hyödynnetään nykyajan teollisessa ympäristössä.

Työn taustalla oleva tutkimusongelma on: Miten yhteistyörobotisovellukset toteutetaan turvallisesti teoriassa ja miten ne toimivat todellisissa käyttötapauksissa?

Työssä etsitään vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

T1. Mistä asioista yhteistyörobotin turvallisuus rakentuu ja mitkä standardit tätä ohjaavat?

T2. Kuinka tehon ja voiman rajoittaminen- ja käsin ohjaaminen -tekniikat toimivat ja miten ne toteutetaan turvallisesti teoriassa ja todellisissa käyttötapauksissa?

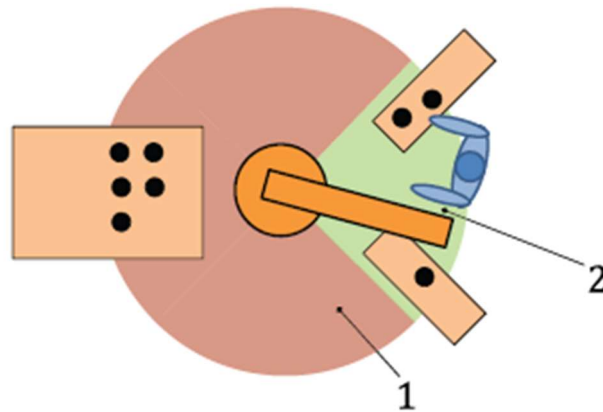
T3. Minkälaisissa tehtävissä yhteistyörobotteja käytetään teollisuudessa ja miten turvallisuus on näissä toteutettu?

Yhteistyörobottien turvalliseen toteutukseen kehitettyjen tekniikoiden osalta käsittely rajataan olemaan hyvin pintapuolista muiden kuin tehon ja voiman rajoittaminen ja käsin ohjaamisen osalta, joihin keskitytään pääasiallisesti. Yhteistyötä muiden yhteistyörobottien toteutuksessa käytettävien tekniikoiden ja tehon ja voiman rajoittamisen sekä käsin ohjaamisen välillä tutkitaan jonkin verran, esimerkiksi tehon ja voiman rajoittamisen ja muiden tekniikoiden yhdistelmiä voidaan analysoida.

Työssä käsitellään ensiksi yhteistyörobotin määritelmää ja käyttötarkoitusta luvussa kaksi, yhteistyörobottien suunnittelua ja käyttöönottoa koskevia turvallisuusstandardeja luvussa kolme, yhteistyörobotisovelluksen turvallisen toteutuksen mahdollistavia tekniikoita luvussa neljä ja esimerkkejä yhteistyörobottien käytöstä teollisuudessa luvussa viisi. Viimeisenä on yhteenveto ja lähdeluettelo. Työ tehdään kirjallisuuskatsauksena, jossa perehdytään aiheeseen liittyviin lähteisiin, kuten tieteellisiin artikkeleihin ja standardeihin, ja kootaan näistä oleelliset asiat yhdeksi kokonaisuudeksi, jota esitellään ja josta tehdään tulkintoja.

2. YHTEISTYÖROBOTTI

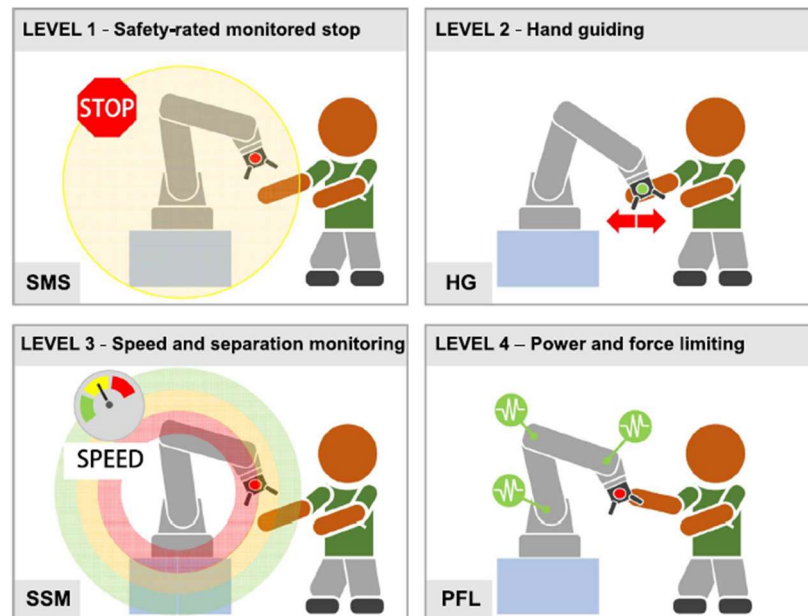
Virallisessa standardissa ISO 10218-1 teollisuusrobotti määritellään olevan automaattisesti toimiva ja uudelleenohjelmoitava monikäyttöinen käsittelylaite, joka on tarkoitettu teollisuusautomaatioon. Vähintään kolme akselia tulee olla ohjelmoitavissa ja teollisuusrobotti voi olla joko liikuteltava tai kiinteästi paikalleen asennettu. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 2) Yhteistyörobotilla tarkoitetaan teollisuusrobottia, joka on suunniteltu avustamaan ihmistä työtehtävissä tai työskentelemään samassa tilassa ihmisen kanssa. Yhteistyörobotti on siis myös teollisuusrobotti, joka on vain suunniteltu erilaiseen toimintaan. (Franklin et al. 2020)



Kuva 2.1. Esimerkki yhteistyöalueesta (2) ja itsenäisen toiminnan alueesta (1) (ISO/TS 15066 2016, s. 3).

Yhteistyörobottia voidaan käyttää vain ennalta määrättyihin työtehtäviin ja sen ominaisuuksien tulee olla suunniteltu varta vasten yhteistyötoimintaan. Yhteistyötoiminnassa ihmisen ja robotin etäisyys toisistaan on väistämättä pienempi verrattuna tilanteeseen, jossa ihminen ja robotti ovat omilla työpisteillään. Tästä johtuen myös fyysisen kontaktin syntyminen ihmisen ja robotin välille on mahdollista ja joissakin tapauksissa se jopa kuuluu ohjelmoituun prosessiin. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 32) Yhteistyörobotilla on aina jokin ennalta suunniteltu toiminta-alue, jonka suunnittelu tehdään aina yhteistyörobotin tekemien tehtävien mukaan (ISO/TS 15066 2016, s. 3–4). Yhteistyörobotin toiminta-alue voi olla jaettu esimerkiksi yhteistyöalueisiin ja itsenäisen toiminnan alueisiin. Käyttäjällä tulee luonnollisesti olla pääsy yhteistyöalueelle suunnitellulla tavalla, mutta yhteistyörobotin itsenäisen toiminnan alue tulee olla suojattu standardien mu-

kaisilla keinoilla ja robotin toiminta tulee pysäyttää välittömästi, jos käyttäjä onnistuu ohittamaan asennetut suojat. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 33)



Kuva 2.2. Standardin ISO 10218-1 mukaiset yhteistyön tasot (Villani et al. 2018).

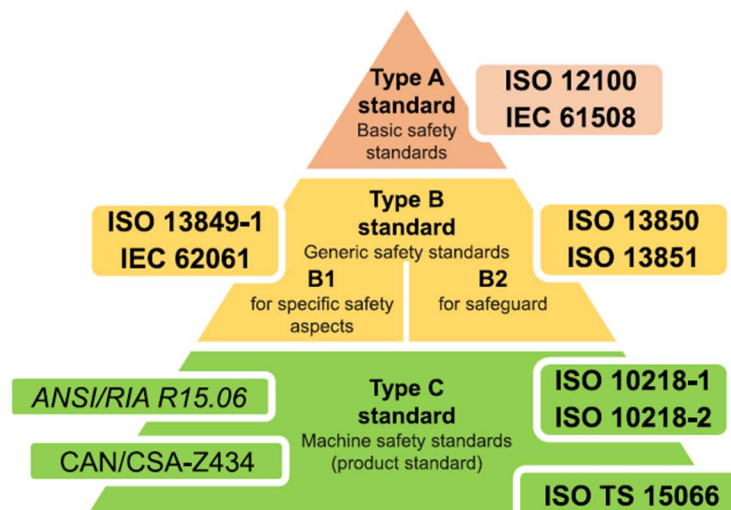
Yhteistyörobotin ja käyttäjän välisellä yhteistyöllä on eri tasoja. Standardissa ISO 10218-1:en esitetyt neljä yhteistyötilaa etenevät yksinkertaisesta monimutkaisempaan ja vaikeammin toteutettavaan, mutta samalla monimutkaisuuden kasvaessa niiden käyttösovellukset ovat laajemmat. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 15–16) Tasolla yksi yhteistyörobotti pysähtyy, kun käyttäjä liikkuu liian lähelle sitä ja jatkaa toimintaa käyttäjän poistuttua sen läheisyydestä. Tasolla kaksi käyttäjä voi käsin ohjata yhteistyörobotin liikettä käyttäjän ollessa sen toiminta-alueen sisällä, mutta tässä tilassa yhteistyörobotti ei voi itsenäisesti toimia ilman käyttäjän poistumista sen alueelta. Tasolla kolme yhteistyörobotti hidastaa liikkumisnopeuttaan, kun etäisyys sen ja käyttäjän välillä pienenee, ja pysähtyy kokonaan, kun etäisyys alittaa asetetun vähimmäisarvon. Tämä sallii yhteistyörobotille jo melkein jatkuvan liikkeen käyttäjän läheisyydessä. Tasolla neljä yhteistyörobotti ja käyttäjä voivat liikkua samanaikaisesti ja olla fyysisessä kontaktissa toiminnan aikana turvallisesti. (Villani et al. 2018)

Yhteistyörobotteja käytetään yleensä työtehtävissä, jotka ovat riittävän yksinkertaisia ja sisältävät paljon toistuvia liikkeitä tai ergonomisia riskejä. Lisäksi yhteistyörobotteja voidaan käyttää tilanteissa, joissa samaa työtehtävää ei tehdä välttämättä kovin kauaa kerrallaan, vaan yhteistyörobotin työtehtävää voidaan vaihtaa nopeasti toiseen. (Franklin et al. 2020) Vaihtoehtoisesti yhteistyörobotteja voidaan käyttää myös tapauksissa, joissa tarvitaan liikkeiden suurta tarkkuutta, esimerkiksi ihmisen selkärangan kirurgisissa toimenpiteissä (Amarillo et al. 2021). Jos normaalien yhteistyörobottien jäykkyys ja

tarkkuus eivät ole riittävällä tasolla, myös perinteisiä teollisuusrobotteja voidaan käyttää yhteistyörobotteina muokatuilla ohjainjärjestelmillä ja ulkoisilla antureilla (Amarillo et al. 2021; Villani et al. 2018). Teollisuusrobottien valmistajat tarjoavat vaihtoehtoisia turvaluokiteltuja ohjainjärjestelmiä tähän tarkoitukseen (Villani et al. 2018).

3. YHTEISTYÖROBOTTEJA KOSKEVAT TURVALLISUUSSTANDARDIT

Yhteistyörobotit, ja teollisuusrobotit yleisesti, koostuvat useista eri komponenteista, jotka toimivat yhteistyössä toistensa kanssa. Komponenteilla tarkoitetaan tässä robotin kiinteitä osia, kuten esimerkiksi sen runkoa, servomoottoreita, antureita ja työkaluja. Tämän takia myös yhteistyörobottien turvallisuudesta on tehty useita eri standardeja kattamaan eri aihealueita, sillä eri komponenteilla on eri toimintaperiaatteet ja siten myös niiden turvallisuutta täytyy miettiä eri tavoilla. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 7)



Kuva 3. Turvallisuusstandardien kategoriat teollisuusroboteille (Villani et al. 2018).

Standardi ISO/TS 15066 käsittelee erityisesti yhteistyörobottien turvallisuutta ja se on luotu täydentämään standardien ISO 10218-1 ja ISO 10218-2 sisältöä yhteistyöroboteista (ISO/TS 15066 2016, s. 1). ISO 10218 on jaettu kahteen osaan: osa yksi käsittelee turvallisuuden varmistamista teollisuusrobotin suunnittelussa ja rakenteessa ja osa kaksi käsittelee turvallisuutta teollisuusrobotin asennuksessa, testauksessa, ohjelmoinnissa, käytössä ja korjauksessa. ISO 10218 ja ISO/TS 15066 vuorostaan viittaavat muihin standardeihin, joiden vaatimukset tulee myös täyttyä, jotta standardeja voidaan soveltaa. Näistä tärkeimpänä tässä osiossa käydään läpi ISO 12100, joka käsittelee yleistä turvallisuutta koneiden suunnittelussa ja riskiarviointia. Muita viittauksia ovat esimerkiksi sähköisten, hydraulisten ja pneumaattisten laitteiden turvallisuusstandardit,

mutta niiden tarkastelu ei kuulu tämän työn laajuuteen. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. iv, 1; ISO/TS 15066 2016, s. 1)

3.1 Koneiden turvallinen suunnittelu

ISO 12100 antaa ohjeistusta ja yleisiä periaatteita ja menetelmiä turvallisten koneiden suunnitteluun. Pääasiassa se keskittyy riskiarviointiin ja riskien vähentämiseen. Standardin laadinnassa on käytetty tietoa aiemmin tapahtuneista tapaturmista ja riskeistä, sekä hyödynnetty aikaisempaa kokemusta ja tietoa koneiden suunnittelusta. Tämän pohjalta on laadittu periaatteita riskiarviointiin ja riskien vähennykseen. (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 1) Standardin mukaan tulee olettaa, että koneessa oleva vaara tulee ennemmin tai myöhemmin aiheuttamaan vahinkoa, jos sitä ei ole yritetty ehkäistä (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 9).

Riskiarviolla tarkoitetaan loogisia vaiheita, jotka mahdollistavat systemaattisen tavan analysoida ja arvioida koneisiin liittyviä riskejä (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 9). Riskit koostuvat vaaran aiheuttaman vahingon suuruudesta ja sen tapahtumisen todennäköisyydestä. Riskin aiheuttamaa vahinkoa arvioidessa täytyy ottaa huomioon, että onko aiheutuva vahinko lievä, vakava vai todella vakava ja kuinka monelle henkilölle vahinkoa aiheutuu. Vahingon aiheutumisen todennäköisyys riippuu esimerkiksi käyttäjän koulutuksesta, vaara-alueella liikkumisen taajuudesta ja siitä, että kuinka helposti vaara on havaittavissa. (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 17–18) Riskiarvion vaiheet on listattu standardin luvussa 4:

- a. Selvitetään koneen rajat, jotka sisältävät koneen normaalin käytön ja mahdolliset väärinkäytökset.
- b. Tunnistetaan vaarat ja niihin liittyvät vaaralliset tilanteet.
- c. Arvioidaan riskiä tunnistetuille vaaroille ja vaarallisille tilanteille.
- d. Arvioidaan riskin vakavuutta ja päätetään riskin vähennyksen tarpeellisuudesta.
- e. Poistetaan vaaraa tuottava piirre tai vähennetään siihen liittyvää riskiä suoja-keinoilla. (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 9)

Näistä kohdat a–d ovat riskien arviointia ja kohta e on riskien pienentämistä. Riskiarvio on iteratiivinen prosessi, joka tarkoittaa sitä, että edellä listattuja vaiheita toistetaan, kunnes haluttu tilanne on saavutettu. Standardin mukaan arvioinnin aikana tulee ottaa huomioon koneen turvallisuus koko sen käyttöiän aikana, koneen kyky suorittaa sen tarkoitettua toimintaa, koneen käytettävyys ja koneen rakennuksen, käytön ja purkamisen kustannukset. (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 9)

Riskien tunnistamisen ja arvioinnin jälkeen riskien vähentäminen tapahtuu joko poistamalla vaaraa aiheuttava piirre tai pienentämällä riskiä sen osatekijöiden avulla. Vaaran aiheuttaman vahingon suuruuden pienentäminen ja/tai sen tapahtumisen todennäköisyyden pienentäminen vähentävät riskiä. Standardi antaa kolme askelta tavoitteen saavuttamiseksi:

1. luonnostaan turvallinen suunnittelu
2. suojien asentaminen ja/tai täydentävät turvatoimet
3. tiedon antaminen käyttöä varten. (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 22)

Edeltävät askeleet etenevät ensisijaisesta vaihtoehdosta vähemmän suositeltuun vaihtoehtoon, eli jos vaaraa ei voida poistaa luonnostaan turvallisella suunnittelulla, niin vasta siinä vaiheessa toteutetaan suojien asentaminen tai täydentävät turvatoimet, kuten esimerkiksi hätäpysäytyspainike. Vastaavasti jos suojien asentaminen ei ole mahdollista, jäljelle jäävä vaihtoehto on antaa tietoa vaarasta käyttäjälle ennen koneen käyttöä. Riskiarvion ja riskien vähennyksen jälkeen koneen aiheuttamien riskien tulee olla hyväksyttävällä tasolla, jotta kone voidaan ottaa käyttöön. (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 22)

3.2 Turvallisuusvaatimukset teollisuusroboteille

Tässä standardissa käsitellään teollisuusrobottien turvallisuutta niiden suunnittelussa ja rakenteessa (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 1). Turvallisuusstandardit on jaettu kolmeen luokkaan: A-, B- ja C-luokan standardeihin, joissa aakkosjärjestyksessä jälkimmäisempi on aina päättävässä asemassa poikkeavuuksien kohdalla (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. vi). Standardissa oletetaan, että esimerkiksi standardin ISO 12100:en vaatimukset toteutuvat, mutta poikkeavissa määräyksissä ISO 10218-1:en on määräävä standardi C-luokalla, sillä ISO 12100:en on A-luokan standardi (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. v, 1).

Teollisuusroboteissa on monia eri vaaroja, jotka voivat aiheuttaa käyttäjälle ja teollisuusrobotin ympäristölle vahinkoa. Standardin liite A listaa erityyppisiä vaaroja ja niiden mahdollisia seurauksia. Vaarat on jaettu kymmeneen eri ryhmään niiden aiheuttajien ja mahdollisten seurauksien mukaan:

1. mekaaniset vaarat
2. sähköiset vaarat

3. lämpötiloihin liittyvät vaarat
4. meteli
5. tärinä
6. säteily
7. materiaali- ja ainevaarat
8. ergonomiset vaarat
9. teollisuusrobotin käyttöympäristöön liittyvät vaarat
10. vaarojen yhdistelmät. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 23–27)

Mahdolliset vaarat riippuvat suuresti teollisuusrobotin suunnittelusta ja käytettävästä työkalusta. Kun keskitytään vain teollisuusrobotin itsensä ja esimerkiksi yksinkertaisen tarttujan aiheuttamiin vaaroihin, listasta korostuvat mekaaniset- ja ergonomiset vaarat sekä tärinä. Muita vaaratyyppejä ei käydyt tämän työn laajuudessa lävitse. Mekaanisia vaaroja ovat esimerkiksi teollisuusrobotin työkalun odottamaton liike tai puristuksiin jääminen teollisuusrobotin ja jonkin kiinteän asian väliin. Mahdollisia seurauksia ovat muun muassa puristuminen, osumat ja haavojen syntyminen. Ergonomisia vaaroja ovat esimerkiksi huonosti sijoitetut teollisuusrobotin hallintalaitteet tai heikko valaistus, joista voi olla seurauksena esimerkiksi uupumista, stressiä ja käyttäjän tekemiä virheitä. Tärinä saattaa aiheuttaa vaaratilanteita, jos esimerkiksi liitokset tai kiinnittimet irtoavat paikoiltaan sen takia. Mahdollisia tärinän seurauksia ovat väsyminen, neurologinen vahinko ja verenkierron häiriöt. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 23–27)

Standardi ISO 12100 kuvailee riskiarviota yleisesti koneiden näkökulmasta, mutta ISO 10218-1 määrittelee riskiarviota hieman tarkemmin teollisuusrobotille. Aiemmassa kapaleessa mainittujen vaarojen lisäksi riskiarviossa tulee ottaa erityisesti huomioon teollisuusrobotille tarkoitettujen työtehtävien, mahdollinen odottamaton käynnistyminen, käyttäjien pääsy toiminta-alueelle, ennakoitavat väärinkäytökset ja mahdollisten vikatilanteiden vaikutukset teollisuusrobotin ohjainyksikössä. Riskien vähentäminen tapahtuu samalla tavalla kuin standardissa ISO 12100. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 6)

Teollisuusrobottien turvallisuussuunnittelusta on standardissa kerrottu melko laajasti. Suunnitteluvaatimukset on jaoteltu yleisiin vaatimuksiin, liikkeen ohjaukseen, turvallisuudesta vastaavaan ohjauksjärjestelmän suorituskykyyn, teollisuusrobotin pysäytykseen, nopeuden ohjaukseen, käyttötiloihin, kannettaviin ohjainlaitteisiin, samanaikaisen liikkeen ohjaukseen, yhteistyötoimintaan, singulariteetin suojaukseen, akseleiden rajoitukseen, teollisuusrobotin liikuttamiseen ilman virtaa, nostopisteisiin ja sähköisiin liitoksiin. Yhdistävä tekijä näissä suunnitteluvaatimuksissa on kaikkien teollisuusrobotin vi-

katilojen tunnistaminen ja niihin reagoiminen teollisuusrobotin toiminnan pysäyttämiseksi turvallisesti. Lisäksi teollisuusrobotti tulee voida käyttäjän toimesta pysäyttää millä hetkellä tahansa esimerkiksi hätäpysäytyspainikkeella, sekä teollisuusrobotin käynnistyksen yhteydessä se ei saa tehdä odottamattomia liikkeitä. Teollisuusrobotin ohjaimella tulee aina olla keino vapauttaa robottiin varastoitunut energia jollakin tavalla, jotta vältetään vaaratilanteilta, kun teollisuusrobotin toiminta on keskeytynyt esimerkiksi vikatilaa takia ja tilanne vaatii käyttäjän liikkumista teollisuusrobotin lähellä. Yhteistyötoiminnasta on tässä kerrottu vain pääpiirteet yhteistyön mahdollistavista tekniikoista. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 7–18)

Tärkeä asia, joka käsitellään tässä standardissa, on turvallisuusvaatimusten ja suojaustoimenpiteiden vahvistaminen ja varmistaminen. Riskiarviointi tulisi aina olla tehty ennen käyttöönottoa, mutta lisäksi asennuksen jälkeen turvallisuus voidaan todentaa standardin osiossa 6.2 annettujen kohtien mukaan:

- a. silmämääräinen tarkistus
- b. käytännön kokeet
- c. mittaukset
- d. toiminnan aikainen tarkkailu
- e. käyttötapauskohtaisten piirustusten, piirikaavioiden ja suunnittelumateriaalin tarkastelu
- f. tehtäväkohtaisen riskiarvion tarkastelu
- g. määrittelyiden ja käyttötiedotteiden tarkastelu. (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 19)

3.3 Turvallisuusvaatimukset teollisuusrobottijärjestelmille

Teollisuusrobotisolun turvallisuudessa täytyy ottaa huomioon enemmän asioita kuin pelkän teollisuusrobotin suunnittelu ja sen rakenne. Teollisuusrobotit kykenevät liikkeisiin suurella alueella ja niiden kineettinen energia on usein liikkeen aikana korkealla tasolla. Tämän lisäksi niiden liikkeitä voi olla vaikeaa ennakoita niiden ohjelmoinnista riippuen, sekä teollisuusrobotin toiminta-alueessa saattaa olla päällekkäisyyksiä muiden teollisuusrobottien tai koneiden toiminta-alueiden kanssa. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 4)

Teollisuusrobottisolun ja teollisuusrobottijärjestelmän rakenteen suunnittelulla voidaan vähentää riskejä ja poistaa vaaroja. Seuraavaksi mainitut asiat täytyy standardissa olevan listan mukaan ottaa huomioon teollisuusrobottisolun rakenteen suunnitteluprosessissa. Ensimmäisessä kohdassa määritellään solun tai linjan fyysiset rajat kolmiulotteisesti, jossa täytyy tietää käytettävän teollisuusrobotin mahdollinen liikkumisalue suhteessa sen origoon sekä muiden tarvittavien komponenttien sijainnit ja fyysiset mitat. Toisessa kohdassa määritellään teollisuusrobotin käyttöalueet ja tunnistetaan turvaetäisyyksien tarve esimerkiksi rakennuksen tukipylväiden ympärille. Lisäksi mietitään turvallisia liikkumisreittejä esimerkiksi käyttäjille ja materiaaleille, huoltotoimille ja siivoukselle, sekä suunnitellaan muun muassa turvallisia paikkoja sijoittaa kaapeleita kaatumisten välttämiseksi. Kolmannessa kohdassa mietitään suunnitteluratkaisuja mahdollistamaan turvalliset käyttäjän tekemät väliintulot prosessiin tarpeen vaatiessa. Ihannetapauksessa käyttäjän tulisi pystyä suorittamaan nämä toimet suoja-alueen ulkopuolelta, mutta tarvittavien turvalaitteiden asennuksen avulla nämä toimet voidaan suorittaa myös turva-alueen sisäpuolella. Turvalaitteet voivat ohjata koko teollisuusrobottisolua tai vain osaa siitä riskiarvion mukaan. Neljännessä kohdassa mietitään ergonomiaa ja laitteiden käyttöliittymiä. Huomioon tulisi ottaa esimerkiksi toimenpiteiden näkyvyys, ohjainlaitteiden selkeys, työkappaleen sijainti käyttäjään nähden ja ennakoitua väärinkäytökset. Viidennessä kohdassa tulee ottaa ympäristön tila huomioon, eli esimerkiksi ilmastoinnin toimivuus. Loput kohdat käsittelevät muun muassa työkappaleiden ja teollisuusrobotin työkalun vaihtoa, työalueen rajojen suojaamista ja hätäpysäytyspainikkeiden asentamista. Teollisuusrobottisolun turvallisuuden pitäisi olla hyvässä lähtökohdassa, jos nämä seikat on otettu huomioon sen rakenteen suunnittelussa. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 5–6)

Teollisuusrobottisolun riskiarvio on vuorostaan erilainen, kuin pelkälle teollisuusrobotille. Teollisuusrobotti on solussa integroitu sen tekemää työtehtävää varten, jolloin myös riskiarvio tulisi suorittaa tälle kyseiselle tapaukselle, mutta riskiarvion työvaiheet ovat silti samat kuin standardissa ISO 12100:en on määritely. Huomioon tulisi ottaa itse teollisuusrobotin suunnittelun lisäksi myös sen ympäristö, eli edellisessä kappaleessa mainittujen suunnitteluseikkojen mahdollisesti mukanaan tuomat riskit, sekä myös muut ulkoiset tekijät, jotka eivät ole suoraan yhteydessä solun rakenteen suunnitteluun. Näitä ovat esimerkiksi käyttäjien pätevyys, työkalujen käyttö, osien ja laitteiden huoltovälit, ympäristön lämpötila ja ympäristön kosteus. Riskejä täytyy arvioida myös teollisuusrobottisolun työtehtävistä, esimerkiksi työkappaleiden siirtämisestä, teollisuusrobotin ohjelmoinnista ja tehdyn ohjelman testauksesta, ongelmanratkaisusta, vikatilanteiden purkamisesta, huoltotoista ja siivouksesta. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 6–8)

Teollisuusrobotin asennus ja integrointi tulisi suunnitella siten, että se aiheuttaa mahdollisimman pienen vaaroille altistumisen käyttäjille. Tästä syystä teollisuusrobottijärjestelmän liikkeitä voidaan rajoittaa sisäänrakennetuilla tai ulkoisilla laitteilla. Teollisuusrobotin rajoitetut liikkeet muodostavat rajoitetun tilan, jonka ulkopuolelle robotti ei pysty liikkumaan, ja tämä tila sisältää myös mahdolliset teollisuusrobotin työkalut sekä työ-kappaleet. Liikkeiden rajoitus voidaan toteuttaa esimerkiksi mekaanisesti estämällä akselin liikkuminen jonkin tietyn rajan yli tai ohjelmallisesti teollisuusrobotin ohjainyksikön kautta, jolloin ohjainyksikkö pysäyttää liikkeen rajan ylittyessä. Rajoitettua aluetta voidaan myös säätää teollisuusrobotin suorittaman ohjelman mukaan dynaamisesti, jolloin yksi robotti voi toimia esimerkiksi kahdella eri työpisteellä vuorotellen ja silti säilyttää turvallisen toiminnan. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 14–16)

Yhteistyötoiminnassa yhteistyörobotti, eli teollisuusrobotti tämän tarkoituksen mukaisella suunnittelulla, on läheisessä kontaktissa käyttäjän kanssa. Tästä syystä yhteistyötoimintaa varten tulee ottaa lisää huomiota vaativia asioita mukaan riskiarvioon. Esimerkiksi yhteistyörobotin liikuttama kuorma, nopeus, voima ja teho vaikuttavat sen aiheuttamiin riskeihin. Lisäksi yhteistyörobotin käyttämä työkalu tai työkalu tulee olla turvallinen, eli esimerkiksi terävät reunat eivät saa olla käyttäjän lähellä ja käyttäjän käsittelemät yhteistyörobotin osat ja työkalut tulee olla ergonomisesti suunniteltu. Huomiota täytyy kiinnittää myös käyttäjän sijaintiin yhteistyörobottiin nähden, jotta käyttäjän ei tarvitse työskennellä esimerkiksi yhteistyörobotin alapuolella. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 32–33)

Yhteistyöalue, jossa käyttäjän ja yhteistyörobotin välinen yhteistyö tapahtuu, tulee olla selkeästi merkitty esimerkiksi lattiamerkinnöillä tai kylteillä. Kaikki käyttäjät yhteistyöalueella tulee olla suojattuna, vaikka heitä olisi useampia yhtä aikaa, ja yhteistyöalueen suunnittelun tulee olla sellainen, että käyttäjä kykenee helposti suorittamaan suunnitellut työtehtävät turvallisesti. Yleisesti yhteistyöroboteille ovat voimassa myös samat säännöt kuin normaaleille teollisuusroboteille turvallisuuden puolesta, jolloin esimerkiksi myös yhteistyöroboteille suositellaan liikkeiden rajoitusta ohjelmallisesti turhan laajojen liikkeiden välttämiseksi. Yhteistyörobotit voivat toimia myös itsenäisesti normaalin teollisuusrobotin tavoin yhteistyötehtävien lisäksi, jolloin näiden toimintatilojen väliseen vaihtoon tulee kiinnittää erityistä huomiota suunnittelussa. Yhteistyörobotti ei saa aiheuttaa käyttäjille vaaratilanteita toimintatilojen vaihdoksen aikana. (SFS-EN ISO 10218-2:en 2011, s. 33–34)

3.4 Yhteistyörobottien turvallisuus ja suunnittelu

ISO/TS 15066 on tehty laajentamaan ISO 10218-1 ja ISO 10218-2 antamia vaatimuksia ja ohjeistuksia yhteistyöroboteista. Samalla se määrittelee turvallisuusvaatimuksia yhteistyörobottijärjestelmille ja yhteistyöalueelle. (ISO/TS 15066 2016, s. 1)

Yhteistyötilassa yhteistyörobotin liikkuminen on mahdollista käyttäjän ollessa sen lähellä, jolloin tarvitaan erilaisia suunnitteluratkaisuja kuin perinteisillä teollisuusroboteilla. Standardin mukaan seuraavat asiat tulee ottaa huomioon yhteistyörobottijärjestelmän ja siihen liittyvän yhteistyörobottisolun suunnittelussa:

- a. yhteistyöalueen määritellyt rajat kolmessa ulottuvuudessa
- b. yhteistyöalueella liikkuminen ja turvaetäisyydet
- c. ergonomia ja laitteiden käyttöliittymät ihmisten kanssa
- d. käyttörajoitukset (kenellä on pääsy järjestelmään, mahdolliset fyysiset kontaktit)
- e. siirtymät yhteistyötilan ja muiden toimintatilojen välillä. (ISO/TS 15066 2016, s. 3–4)

Vaatimukset yhteistyörobottisovellusten toteuttamiseen on jaettu standardissa kolmeen kategoriaan: yhteistyöalueen suunnitteluun, yhteistyörobotin toimintaan ja yhteistyötoimintoihin. Yhteistyöalueen suunnittelu on kuvailtu standardissa käytännössä katsoen täysin samoin kuin standardissa ISO 10218-2:en, joten sitä ei käydä uudestaan läpi. Yhteistyörobotin toimintaa on määritelty melko laajasti. Yleisesti yhteistyörobotin tulee suorittaa suojapysäytys, jos sen ohjainyksikkö havaitsee minkään turvallisuuteen liittyvän yhteistyörobotin osan pettämisen. Yhteistyötoimintaa ei voida jatkaa virhetilanteen jälkeen ennen kuin käyttäjä on tarkoituksenmukaisesti uudelleenkäynnistänyt sen yhteistyöalueen ulkopuolelta. Kaikki yhteistyötoiminnan turvallisuuteen liittyvät parametrit tulee olla suojattu salasanalla tai muulla suojakeinolla luvattomien ja tahattomien muutosten estämiseksi. Yhteistyötoiminnan aikana käyttäjän tulee pystyä helposti pysäyttämään yhteistyörobotin liike, tai vaihtoehtoisesti käyttäjän tulee voida poistua yhteistyöalueelta esteettömästi. Yhteistyörobotin liikkeen pysäyttämiseen voidaan käyttää esimerkiksi hätäpysäytyspainiketta tai muuta standardissa hyväksyttyä keinoa. Standardin mukaan yhteistyörobotin yhteistyöalueella voidaan käyttää merkkivaloja, jotta käyttäjän on mahdollista seurata muutosta esimerkiksi automaattisesta toiminnasta yhteistyötoimintaan helpommin. (ISO/TS 15066 2016, s. 6–7)

Yhteistyörobottijärjestelmän mukana tulee toimittaa dokumentointi, josta selviää yhteistyörobottijärjestelmän tiedot sen käyttöä varten. Tiedoissa tulee olla esimerkiksi ohjeet suojien käytöstä ja käyttötiloista yhteistyötoimintaa varten. Lisäksi vaaditaan tiedot jär-

jestelmän valmistajasta, testaavasta organisaatiosta jos testaus on suoritettu, yhteistyörobotin tyyppistä ja käyttötarkoituksesta ja yhteistyörobotia käyttävän työpaikan nimi. Dokumenttien tulee sisältää myös tietoa yhteistyörobotin käytöstä sen käyttötarkoituksessa, tiedot käytetyistä suojusta koko työalueella, sekä tiedot järjestelmän yhteistyötilojen ohjauksesta. Yhteistyörobotin käytöstä voidaan sisällyttää dokumenttiin esimerkiksi kuvauksia, piirustuksia ja kuvia. (ISO/TS 15066 2016, s. 19–20)

Käyttöä varten olevien tietojen mukana tulee olla myös dokumentit, jotka selvittävät tarkasti työalueen rakenteen ja yhteistyöalueella tehtävät työtehtävät. Työalueen rakenteesta täytyy kertoa sen ympäristön kunto, sisääntulo- ja poistumistiet ja kulkureitit, sekä lisäksi tarvitaan tiedot työalueella käytetyistä välineistä, työkaluista ynnä muista käyttötarkoitukselle oleellisista asioista. Yhteistyöalueella tehtävistä työtehtävistä tulee dokumentoida kuvaukset käyttäjän tekemistä työtoimista ja yhteistyörobotin suorittamat työtoimet, sekä muodostaa erityisesti yhteistyöalueella tapahtuvista työtoimista kronologisesti järjestetty tapahtumaketju. Lisäksi mahdollisesti vaarallisen pienet etäisyydet käyttäjän ja yhteistyörobotin välillä tulee kirjata ylös jokaiselle työvaiheelle, sekä sisällyttää mukaan sanallinen kuvaus tai piirros yhteistyöalueesta. (ISO/TS 15066 2016, s. 19–20)

4. YHTEISTYÖROBOTIN TURVALLISUUDEN MAHDOLLISTAVAT TEKNIIKAT

4.1 Turvaluokiteltu valvottu pysäytys

Turvaluokiteltu valvottu pysäytys tarkoittaa robotin toiminta-alueen valvontaa ja robotin liikkeen pysäyttämistä ennen kuin käyttäjä liikkuu sen alueelle. Robotti voi vastaavasti jatkaa liikkumista ilman käyttäjän syötettä, kun käyttäjä poistuu valvotulta alueelta. Robotin käyttövoima pidetään päällä pysäytyksen aikana ja valvontajärjestelmä varmistaa, ettei robotti liiku. Pysäytyksen aikana käyttäjä voi esimerkiksi turvallisesti lastata osia robotin tarttujaan. Tämän tekniikan käyttö vaatii käyttäjän tunnistavien turvalaitteiden asentamisen robotin toiminta-alueelle ja riskiarvion tekemistä, jotta robotti ehtii pysähtymään ennen kuin käyttäjä voi päästä liian lähelle sen vaara-alueita. (ISO/TS 15066 2016, s. 8–9; SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 15)

4.2 Käsin ohjaaminen

Käsin ohjauksessa robotin liike on sallittu vain silloin, kun käyttäjällä on suora ohjausyhteys robottiin manuaalisesti aktivoitavalla ohjainlaitteella (Franklin et al. 2020). Ohjainlaitteen tulee sijaita robotin työkalussa, esimerkiksi tarttujassa, tai sen lähellä. Käsinohjauksen yhteydessä myös turvaluokiteltu valvottu pysäytys on käytössä, jotta robotin liike on turvallisesti lopetettu ennen käsin ohjauksen aloittamista. (ISO/TS 15066 2016, s. 9)

Käsin ohjauksella robotin ohjelmointi on intuitiivisempaa, jolloin myös kokemattomamat käyttäjät voivat käyttää ja ohjelmoida robottia. Haittapuolena käsin ohjauksessa on sen tarkkuus, sillä esimerkiksi kokoonpanotehtävissä se ei ole joskus riittävä, jolloin tarvitaan erillistä kannettavaa ohjelmointilaitetta. (Safeea et al. 2017) Kannettavalla ohjelmointilaitteella tarkoitetaan robotin ohjainyksikköön liitettyä käsissä pidettävää laitetta, jonka avulla robottia voidaan ohjelmoida tai liikuttaa (SFS-EN ISO 10218-1:en 2011, s. 3). Ohjelmointilaitteella robotin työkalun paikkaa ja suuntaa voidaan hienosäätää, mutta se heikentää käsin ohjauksella saavutettavaa intuitiivisuutta. Käyttäjän on vaikeaa hahmottaa mielessään robotin monia akseleita samanaikaisesti ohjelmointilaitetta käytettäessä, joka voi johtaa törmäyksiin ja vahinkoihin joissakin tilanteissa. (Safeea et al. 2017)

Käsin ohjaus voidaan toteuttaa myös perinteiseen teollisuusrobottiin lisäosien avulla. Amarillo et al. (2021) kuvailee järjestelmää, jossa normaalia teollisuusrobottia käytetään avustamaan suurta tarkkuutta vaativissa kirurgisissa toimenpiteissä. Tässä teollisuusrobotin työkalun yhteyteen on kiinnitetty anturi, joka mittaa voimaa ja vääntöä, jolloin teollisuusrobotin ohjainyksikkö voi liikuttaa työkalua käyttäjän syötteen mukaisesti. Käsin ohjausta käytetään työkalun alustavaan lähestymiseen ja paikoitukseen, jonka jälkeen teollisuusrobotti voi suorittaa itsenäisesti varsinaisen ohjelmointinsa. Ohjelman suorituksen jälkeen tai ongelmatilanteissa teollisuusrobotti on käsin ohjausta käyttämällä nopeasti liikutettavissa pois jatkotoimenpiteiden tieltä. (Amarillo et al. 2021)

4.3 Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta

Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnassa robotti ja käyttäjä voivat liikkua samaan aikaan samassa työskentelytilassa. Robotin ohjainyksikkö valvoo käyttäjien etäisyyttä robotista jatkuvasti turvalaitteiden avulla ja pienentää robotin liikkumisnopeutta etäisyyden pienentyessä. Samalla robotin se estää robottia tekemästä liikkeitä, jotka aiheuttaisivat robotin liikkumisen liian lähelle käyttäjää. Nopeuden pienentyessä myös käytettävä vähimmäisetäisyys pienenee, sillä hitaalla liikkumisnopeudella myös mahdollisen osuman riski on pienempi. Käyttäjän liikkuessa lähemmäs robottia kuin vähimmäisetäisyys sallii, se suorittaa turvallisen pysäytyksen vahinkojen välttämiseksi. (ISO/TS 15066 2016, s. 10–15)

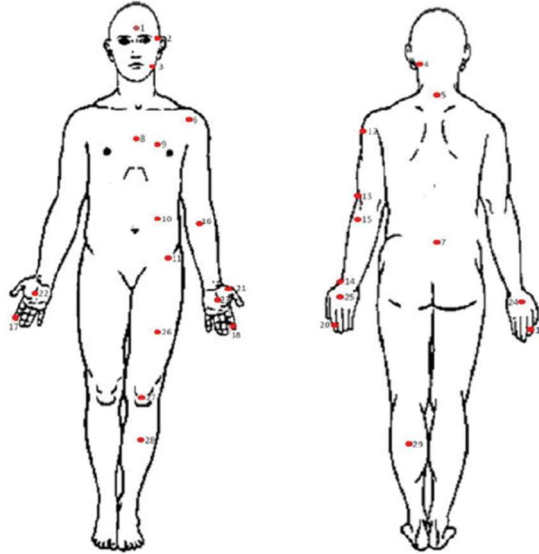
4.4 Tehon ja voiman rajoittaminen

Tehon ja voiman rajoittamisessa fyysinen kontakti on mahdollista käyttäjän ja robotin normaalissa toiminnassa. Kontakti voi olla tarkoituksellista tai se voi syntyä vahingossa, mutta robotin suunnittelun ansiosta sen pitäisi olla turvallista tai hyväksyttävän riskitason sisällä. Robotin ja ihmisen välinen kontakti on jaettu kahteen kategoriaan: kvasistaattiseen ja ohimenevään. Kvasistaattiseen kontaktiin kuuluvat esimerkiksi tilanteet, joissa käyttäjän kehon osa jää liikkuvan robotin ja jonkin muun liikkuvan tai paikallaan olevan robottisolun osan väliin. Kyseisessä tilanteessa robotin käyttäjään aiheuttama voima kestää jonkin aikaa, ennen kuin tilanne saadaan selvitettyä. Ohimenevään kontaktiin kuuluvat lyhytkestoiset kontaktit eli esimerkiksi törmäykset, joissa kehon osa ei jää puristuksiin. Kontaktin suuruus muodostuu robotin ja käyttäjän inertiaista ja näiden välisestä nopeudesta. (ISO/TS 15066 2016, s. 15–16)

Turvallisuus tällä tekniikalla voidaan saavuttaa kahdella tavalla: suunnittelemalla robotti luonnostaan turvalliseksi tai turvallisuudesta huolehtivalla ohjainyksiköllä (ISO/TS 15066 2016, s. 17). Luonnostaan turvallinen suunnittelu tarkoittaa sitä, että laitteen,

esimerkiksi robotin, suunnittelulla poistetaan tai pienennetään vaaroihin liittyviä riskejä ilman suoja- tai turvalaitteita. Tämä tapa on näistä kahdesta tärkein, sillä luonnostaan turvalliseksi suunnitellut piirteet todennäköisesti pysyvät turvallisina, kun taas hyvinkin suunnitellut suojalaitteet ja muut suojat saattavat pettää ja niiden ennen käyttöä annettuja ohjeita ei välttämättä noudateta. Luonnostaan turvallisessa suunnittelussa otetaan huomioon geometriset tekijät ja fysikaaliset piirteet. Geometrisissa tekijöissä mietitään muun muassa laitteen muotoilua mahdollisimman hyvän työalueen näkyvyyden mahdollistamiseksi, mekaanisten osien muotoja ja niiden suhteellisia etäisyyksiä toisistaan esimerkiksi kehonosien puristumisen välttämiseksi ja terävien reunojen ja kulmien poistamista vammojen ja vaatteiden kiinnijäämisen riskin vähentämiseksi. Fysikaalisissa piirteissä rajoitetaan käytettävä voima tarpeeksi alhaiseksi mekaanisen vaaran välttämiseksi, rajoitetaan liikkuvien osien massa ja/tai nopeus kineettisen energian pienentämiseksi ja vähennetään laitteen päästöjä, kuten melua, tärinää, vaarallisia aineita ja säteilyä. (SFS-EN ISO 12100:en 2010, s. 23–24)

Turvallisuudesta huolehtivan ohjainyksikön tehtävä on pitää robotista aiheutuvat riskit riskiarvioinnissa määriteltyjen arvojen sisällä (ISO/TS 15066 2016, s. 17). Ohjainyksikön tulee jollakin tavalla havaita törmäykset ja kontaktit, jotta se voi ylläpitää turvallisuutta. Erillisten anturien avulla törmäyksiä voidaan ennaltaehkäistä ennen niiden tapahtumista, mutta yleisessä tapauksessa tehon ja voiman rajoittamisessa törmäyksiin reagoidaan samalla hetkellä kuin ne tapahtuvat. Robottiin liikkeen aikana kohdistuvat ulkoiset voimat voidaan tunnistaa esimerkiksi simuloimalla reaaliajassa robotin nivelten liikuttamiseen tarvittavien servomoottorien sähkövirtoja ja vertailemalla näitä teoreettisia arvoja robotin ohjainyksikön antamiin tietoihin. Jos ohjainyksikön antamat sähkövirran arvot ylittävät teoreettisen lukeman enemmän kuin ohjelmoidun raja-arvon verran, voidaan olettaa, että robottiin kohdistuu jokin ennakoimaton ulkoinen voima, kuten törmäys käyttäjän tai jonkin muun asian kanssa. (Aivaliotis et al. 2019)



Kuva 4.4. Ihmisen keho jaettu 29 kontaktipisteeseen riskiarviota varten (ISO/TS 15066 2016, s. 22).

Standardin ISO/TS 15066 liitteessä A on kerrottu yhteistyörobotin aiheuttamasta voimasta ja paineesta, jotka ihmisen kehoon voidaan kohdistaa ilman kohtuutonta kivun tunnetta kontaktitilanteessa. Voiman ja paineen ohjearvot on koottu yhteen erityisesti tehon ja voiman rajoitusta käyttäviä yhteistyörobotteja varten, jotta niiden liikkeiden nopeudet voidaan säätää siten, että nämä ohjearvot eivät ylitä. Taulukoidut arvot perustuvat malliin, jossa ihmisen keho on jaettu 12 alueeseen ja 29 tarkempaan kohtaan. Mahdolliset kontaktipisteet yhteistyörobotin ja ihmisen kehon välillä selvitetään riskiarviossa, jolloin tarvittavat laskelmat osataan tehdä oikeilla arvoilla. Annetuissa arvoissa ei ole otettu huomioon minkäänlaisia suojavaarusteita, eli ne pätevät yleiseen tilanteeseen, jossa yhteistyörobotin käyttäjällä on tyypilliset työvaatteet päällään. Kontaktitilanteessa syntyvän voiman ja paineen arvot tulee laskea erikseen, sillä kontaktissa olevan pinta-alan suuruus vaikuttaa niiden suhteeseen. Jos esimerkiksi pieni osa yhteistyörobotin työkalusta osuu käyttäjän käteen, sen aiheuttaman kontaktin pinta-ala on pieni, jolloin se voi aiheuttaa paljon kipua pienelläkin voiman arvolla, koska aiheutuva paine on suuri. Voimasta aiheutuvaa painetta voidaan pienentää pinta-alaa kasvattamalla, joka voidaan saavuttaa esimerkiksi pehmusteiden asentamisella yhteistyörobottiin. (ISO/TS 15066 2016, s. 21–26)

4.5 Yhdistelmät

Tehon ja voiman rajoittaminen ja konenäkö. Tämän yhdistelmän ideana on käyttää konenäköä normaalin tehon ja voiman rajoittamisen lisänä tuotannon nopeuttamiseksi. Normaalisti tehon ja voiman rajoittamisessa robotti huomaa törmäyksen vasta siinä

tilanteessa, kun törmäys on jo tapahtunut, jolloin robotin on pakko pysähtyä ja varmistaa liikkeen turvallinen jatkuminen. Konenäöllä pyritään luomaan reaaliajassa robotille vaihtoehtoisia liikeratoja prosessoimalla tietokoneen avulla syvyyskameran syötettä, jotka väistävät törmäykset ja ovat optimaalisia liikkeeseen kuluvan ajan suhteen. (Zanchettin et al. 2019)

Tehon ja voiman rajoittaminen ja nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta. Tavoite tämän yhdistelmän takana on säilyttää täysi turvallisuus tehon ja voiman rajoittamisella ja nopeuttaa yhteistyörobotin toimintaa nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnan avulla silloin, kun käyttäjä ei ole yhteistyörobotin lähellä. Käyttäjän etäisyyttä yhteistyörobotista mitataan antureilla ja käyttäjää kohti olevaa nopeutta skaalataan pienemmäksi, kun mitattu etäisyys pienenee. Kun etäisyys on tarpeeksi pieni, käytetään normaalia työskentelynopeutta ja tehon ja voiman rajoittamista. Käyttäjistä poispäin olevaa nopeutta ei rajoiteta, eli loittoneva nopeus voi olla kuinka suuri tahansa. (Lucci et al. 2020)

5. YHTEISTYÖROBOTTIEN TURVALLINEN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA

Tässä osiossa käydään läpi yhteistyörobottien erilaisia käyttötapoja ja toteutuksia teollisuudesta turvallisuuden näkökulmasta, jolloin saadaan kuva siitä, että miten aidot käyttötilanteet on toteutettu ja miten yhteistyörobotteja nykyään käytetään. Käsiteltävät esimerkkitapaukset ovat pääasiassa videoita muun muassa kyseisten yhteistyörobottien valmistajilta tai muulla tavoin valmistajan kanssa yhteistyössä olevilta yrityksiltä, jolloin niissä annettuja tietoja käsiteltäessä täytyy muistaa niiden mahdollinen puolueellisuus. Yhteistyörobottien käyttö teollisuudessa ei rajoitu vain esiteltyihin käyttötapauksiin.

5.1 CNC-työstökeskuksen kappaleenvaihto

Tässä esimerkissä käsitellään Productive Robotics -yrityksen valmistamaa yhteistyörobottijärjestelmää, mallia OB7, joka käyttää robotin teknisten tietojen perusteella tehon ja voiman rajoittamista standardin ISO 10218-1 mukaisesti ja sen opettaminen tapahtuu käsin ohjaamisella yhteistyössä kosketusnäytön kanssa. Yhteistyörobotin tehtävänä on siirtää työstettäviä kappaleita CNC-ohjattuun työstökeskukseen ja työstön valmistumisen jälkeen siirtää valmis työkappale erilliselle alustalle. (Productive Robotics 2019; Five Nines - Plastics Division 2020)



Kuva 5.1. Kuva OB7 yhteistyörobottijärjestelmästä CNC-työstökeskuksen vieressä (Five Nines - Plastics Division 2020).

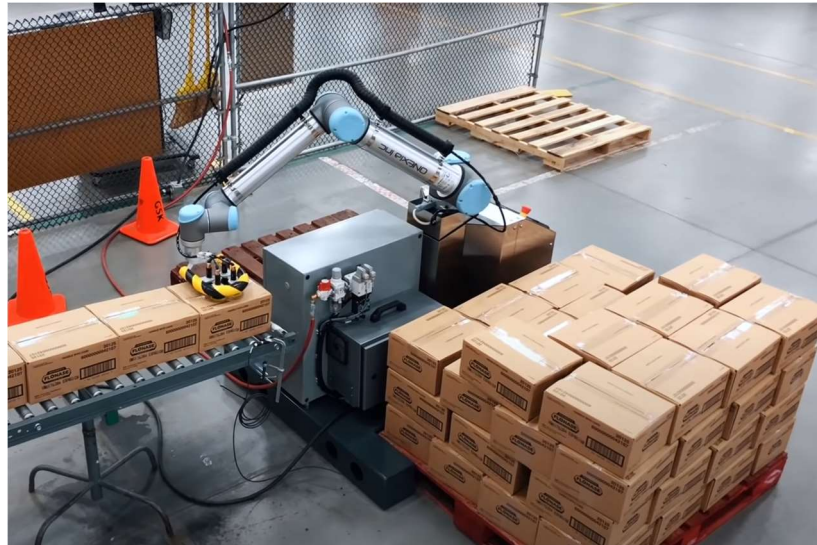
Yhteistyörobotin asennus tapahtuu siirtämällä se paikalleen pyörillä kulkevalla alustalla, lukitsemalla se paikalleen ja sen jälkeen asentamalla yhteistyörobotin ohjainyksikkö työstökeskukseen kiinni. Tarvittavat paineilmaliitännät ja sähkökaapelit liitetään yhteistyörobotista kiinni yhteistyörobotin ohjainyksikköön. Asennuksen jälkeen yhteistyörobotille voidaan opettaa sen suorittamat liikeradat ja toiminnot käyttämällä kosketusnäytöllistä ohjainlaitetta uuden ohjelman luomiseen tai vanhan ohjelman muokkaamiseen ja käsin ohjaamalla liikuttaa yhteistyörobotin tarttujaa halutulla liikeradalla. Tarttujan liikuttaminen käsin ohjauksella näyttää kykenevän sekä tarttujan paikoittamiseen että suuntaamiseen haluttuun kulmaan. Yhteistyörobotissa ei lähteenä käytetyn videon ja teknisten tietojen perusteella ole vaihtoehtoa muunlaiseen ohjelmointiin, vaan kaikki opetus tapahtuu käsin ohjaamisella. (Productive Robotics 2019; Five Nines - Plastics Division 2020)

Yhteistyörobotijärjestelmän ympärillä ei ole asennettuja suoja- eikä myöskään antureita, joilla käyttäjiä voitaisiin havaita. Tämän perusteella voidaan olettaa, että yhteistyörobotin käyttämä voima ja liikenopeudet on riskiarvion aikana säädetty tarpeeksi mataliksi, jotta vakavia vahinkoja ei voi syntyä törmäystilanteissa. Tämän seurauksena myös yhteistyörobotin asennus näyttää olevan melko nopeaa, sillä pysyviä asennuksia ei vaadita. Teknisten tietojen perusteella yhteistyörobotin suurin liikutettava kuorma on viisi kiloa. Työkappaleen vaikutusta turvallisuuteen ei ole mainittu, eli esimerkiksi terävän ja painavan työkappaleen liikuttelussa lisätoimet turvallisuuden varmistamiseksi voisivat olla tarpeen. Yhteistyörobotijärjestelmän ainut hätäpysäytyspainike näyttää sijaitsevan sen yhteydessä olevan työtason alapuolella, joka on hieman hankalassa paikassa. Turvallisuutta voisi parantaa lisäämällä toisen painikkeen paikkaan, johon käyttäjällä on helpompi pääsy. (Productive Robotics 2019; Five Nines - Plastics Division 2020)

5.2 Laatikoiden pinoaminen

Tässä esimerkissä käsitellään ONExia Inc. yrityksen rakentamaa yhteistyörobotijärjestelmää laatikoiden pinoamiseen, nimeltään PalletizUR. Järjestelmässä käytetty yhteistyöroboti on mallia Universal Robotics 10e, eli järjestelmän rakentaja on käyttänyt eri yrityksen valmistamaa yhteistyörobotia ja integroinut sen osaksi omaa, tiettyyn käyttötarkoitukseen tarkoitettua järjestelmää. Universal Robotics:n mukaan sen valmistamat yhteistyörobotit tukevat turvaluokiteltua valvottua pysäytystä sekä tehon ja voiman rajoittamista, joiden avulla yhteistyörobotin toiminta ilman asennettuja suoja- on mahdollista. Yhteistyörobotin tehtävänä on nostaa pahlilaatikoita liukuhihnalta ja pinota niitä kuormalavoille määriteltyyn järjestykseen. Järjestelmä ylettää kahden kuormalavan

ylle, jolloin se voi vaihtaa pinottavaa kohdetta toisen tullessa täyteen. (ONExia Inc. 2021; ONExia Inc. 2018; Universal Robots A/S 2019)



Kuva 5.2. PalletizUR yhteistyörobottijärjestelmä laatikoiden pinoamiseen (ONExia Inc. 2018).

Yhteistyörobottijärjestelmän asennus tapahtuu melko vastaavalla tavalla kuin aiemman esimerkin tapauksessa. Järjestelmä liikutetaan halutulle paikalle pumppukärrien tai trukin avulla ja järjestelmään liitetään sähkövirta- sekä paineilma-liitännät. Tämän jälkeen yhteistyörobotille tulee opettaa sen tekemä työtehtävä. Yhteistyörobotin opettaminen tapahtuu käsin ohjauksella ja kannettavaa ohjainlaitetta käyttämällä. Lisäksi järjestelmässä on erillinen kosketusnäyttö laatikoiden pinoamisen järjestyksen säätämiseksi ja muita asetuksia varten. Käsin ohjaus näyttää tapahtuvan kohdistamalla voimaa yhteistyörobotin runkoon tai niveliin, eli erillistä ohjainlaitetta ei tarvita yhteistyörobotin työkalun läheisyyteen. (ONExia Inc. 2018)

Kuten aiemmassa esimerkissä, yhteistyörobottijärjestelmän ympärille ei ole asennettu suojia, jolloin yhteistyörobotti liikkuu melko hitaasti vaarojen välttämiseksi. Järjestelmään on valmistajan sivujen mukaan saatavilla täydet suojat sekä aluetunnistimia, joiden avulla yhteistyörobotin liikenopeuksia ja tuottavuutta voidaan nostaa, mutta tällöin järjestelmä vastaisi käytännössä normaalia teollisuusrobotisoluun toiminnan aikana. Suurin pinottavan laatikon massa on 18 paunaa eli noin 8,2 kg, joka on hyvä ottaa huomioon toiminnan turvallisuutta arvioidessa. Järjestelmässä näyttää olevan yksi hätäpysäytyspainike, joka on asennettu järjestelmän ohjaukseen tarkoitetun kosketusnäytön viereen. Käyttäjällä näyttää olevan helppo pääsy tälle painikkeelle, jolloin yhteistyörobotin toiminta saadaan helposti pysäytettyä. Järjestelmään tulevat sähkökaapelit ja paineilmaletkut kulkevat lattialla hieman vaarallisen näköisesti, mutta niiden viereen on

asetettu punaiset varoituskartiot. Kaapelien ja letkujen sijoittelua voisi silti parantaa. (ONExia Inc. 2021; ONExia Inc. 2018)

5.3 Auton osien kokoonpano

Tässä esimerkissä käsitellään kiinteästi asennettua yhteistyörobottia auton osien kokoonpanotehtävissä. Yhteistyörobotin on valmistanut KUKA ja se käyttää sen teknisten tietojen mukaan tehon ja voiman rajoittamista turvalliseen yhteistyöhön ilman kiinteitä suoja. Yhteistyörobotin työtehtävänä on kiristää neljä vetoniittiä jokaiseen koottavaan kappaleeseen sen jälkeen, kun käyttäjä on asettanut ne ensin alustavasti oikeille paikoilleen. (KUKA 2018; KUKA AG)



Kuva 5.3. KUKA yhteistyörobotti integroituna vetoniittien asennustehtävään (KUKA 2018).

Yhteistyörobotti näyttää olevan asennettu kiinteästi yhteistyöalueena toimivan pöydän takaosaan. Vetoniittien kiristämiseen tarkoitettu työkalu on kiinnitetty yhteistyörobotin päähän ja se näyttää olevan pehmustettu jonkinlaisella mustalla pehmustelevyllä. Pehmusteen tarkoituksena on todennäköisesti kasvattaa mahdollisen käyttäjän ja yhteistyörobotin välisen kontaktin pinta-alaa standardin ISO/TS 15066 mukaisesti (ISO/TS 15066 2016, s. 26). Yhteistyörobotin hallinta tapahtuu tässä integroidussa käyttötilanteessa muutamien painikkeen avulla, joilla yhteistyörobotin ohjelma käynnistetään ja ohjataan toimintaa esimerkiksi vikatilanteiden aikana. Lisäksi yhteistyöalueen molemmilla puolilla näyttää olevan hätäpysäytyspainikkeet, joihin on helppo pääsy.

Yhteistyörobotin turvallisuutta esitellään asettamalla käyttäjän käsi tahallisesti vetoniittien kiristystyökalun alle toiminnan aikana, jolloin se huomaa poikkeavan tilanteen ja käyttäjälle ei aiheudu vaaratilannetta. Käyttäjä pystyy myös esimerkkitalanteen mukaan työntämään yhteistyörobotin kauemmas itsestään pienellä voimalla esimerkiksi mahdollisesti vaarallisen tilanteen havaittuaan. Kun yhteistyörobotti huomaa poikkeavan tilanteen, se pysähtyy ja odottaa käyttäjän syötettä toiminnan käynnistämiseksi uudelleen. (KUKA 2018)

6. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli löytää keskeiset tiedot ja säädökset, joiden avulla yhteistyörobottisovellukset voidaan turvallisesti toteuttaa. Lisäksi esiteltiin esimerkkejä yhteistyörobottien nykyisistä käyttökohteista keskittyen niiden toteutuksien turvallisuuden vaikuttaviin yksityiskohtiin. Työssä löydettiin, että yhteistyörobottisovellusten turvallisessa toteutuksessa on monia eri vaihtoehtoja ja käyttäjän ja yhteistyörobotin välisellä yhteistyöllä voi olla monia eri tasoja käyttökohteesta ja ympäristön olosuhteista riippuen. Työssä pyrittiin löytämään vastauksia tutkimusongelmaan: Miten yhteistyörobottisovellukset toteutetaan turvallisesti teoriassa ja miten ne toimivat todellisissa käytötapauksissa? Tähän etsittiin vastauksia kolmen tutkimuskysymyksen avulla, joihin vastataan yksitellen.

T1. Mistä asioista yhteistyörobotin turvallisuus rakentuu ja mitkä standardit tätä ohjaavat? Yhteistyörobotin turvallisuus rakentuu turvallisten koneiden suunnittelun perusperiaatteista lähtien ja käyttämällä tietoa aikaisemmin tapahtuneista vaaratilanteista apuna suunnittelussa. Suunnittelussa arvioidaan jatkuvasti tehtyjen ratkaisujen riskejä ja mahdollisia vaaroja riskiarviolla, jolloin suunnittelua muokataan turvalliseen suuntaan. Riskiarvio tehdään aina myös yhteistyörobotin käyttöympäristö huomioiden, sillä tavoitteena on turvallinen kokonaisuus. Tässä työssä arvioitiin standardien ISO 12100, ISO 10218-1, ISO 10218-2 ja ISO/TS 15066 olevan keskeisimpiä yhteistyörobottien turvallisuutta käsitteleviä standardeja, jotka ottavat kokonaisuutena myös robotin ympäristön huomioon ja antavat kattavan kokonaiskuvan aiheesta. Tuloksista nähdään, että turvallisuusstandardit kertovat kattavasti yhteistyörobottien turvallisuudesta ja niiden antamia säädöksiä tulee noudattaa turvallisen lopputuloksen saavuttamiseksi.

T2. Kuinka tehon ja voiman rajoittaminen- ja käsin ohjaaminen -tekniikat toimivat ja miten ne toteutetaan turvallisesti teoriassa ja todellisissa käytötapauksissa? Tehon ja voiman rajoittaminen toimii nimensä mukaisesti rajoittamalla yhteistyörobotin käyttämää tehoa ja voimaa turvalliselle tasolle, jotta robotti ja käyttäjä voivat olla turvallisesti toistensa lähellä työtehtävissä samanaikaisesti. Turvalliset tehon ja voiman arvot laskeaan käyttämällä standardissa ISO/TS 15066 annettuja ihmisen kehoon kohdistetun voiman ja paineen arvoja, jotka eivät saa ylittyä yhteistyörobotin toiminnassa. Työssä löydettiin, että tekniikka voidaan toteuttaa kahdella tavalla: luonnostaan turvallisella suunnittelulla tai turvallisuudesta huolehtivalla ohjainyksiköllä. Luonnostaan turvallis-

sa suunnittelussa yhteistyörobotti suunnitellaan esimerkiksi siten, että se ei voi vahingoittaa käyttäjää edes suoran törmäyksen sattuessa, koska sen käyttämä voima ja liikenopeus on rajoitettu niin alhaiselle tasolle. Turvallisuudesta huolehtivalla ohjainyksiköllä voidaan käyttää erillisiä antureita yhteistyörobotin nivelissä tai mitata robotin liikuttamiseen vaadittuja sähkövirtoja törmäyksien havaitsemiseksi ja pysäyttää robotin liike niiden sattuessa.

Käsin ohjaamisessa yhteistyörobottia voidaan liikuttaa manuaalisesti aktivoitavalla ohjainlaitteella, joka sijaitsee robotin työkalussa tai sen lähellä. Tekniikalla voidaan saavuttaa intuitiivisempi tapa ohjelmoida yhteistyörobottia verrattuna perinteiseen ohjelmointilaitteeseen. Tekniikka voidaan toteuttaa esimerkiksi asentamalla yhteistyörobotin työkalun läheisyyteen anturi, joka mittaa siihen kohdistettua voimaa ja vääntöä. Tämän anturin mittaamat tiedot välitetään yhteistyörobotin ohjainyksikölle, joka liikuttaa robotin akseleita syötteen mukaisesti. Tekniikan turvallisuus toteutetaan käyttämällä turvaluokiteltua valvottua pysäytystä ennen käsin ohjauksen aloittamista, jonka jälkeen kaikki tapahtuva liike on käyttäjän ohjauksen mukaista.

Tuloksista nähdään tehon ja voiman rajoittamisen ja käsin ohjauksen olevan tehokkaita tekniikoita yhteistyörobotin turvallisuuden rakennukseen. Ne mahdollistavat intuitiivisemmän yhteistyörobotin käytön ja ohjelmoinnin verrattuna esimerkiksi kannettavan ohjelmointilaitteen käyttöön.

T3. Minkälaisissa tehtävissä yhteistyörobotteja käytetään teollisuudessa ja miten turvallisuus on näissä toteutettu? Yhteistyörobotteja käytetään teollisuudessa monenlaisissa eri tehtävissä, joista tässä työssä käsiteltiin CNC-työstökeskuksen kappaleenvaihtoa, laatikoiden pinoamista ja auton osien kokoonpanoa. Yhteistä näille tehtäville on toiminta lähellä ihmisiä ja ilman suojia erottamassa työalueita. Työtehtävät ovat tarpeeksi yksinkertaisia, jolloin yhteistyörobottien ohjelmointi on nopeaa ja toistoa vaativien tehtävien automatisointi parantaa ihmisten ergonomiaa. Yhteistyörobottien turvallisuus on käsitellyissä esimerkkitapauksissa toteutettu muun muassa käyttämällä tehon ja voiman rajoittamista sekä käsin ohjaamista, jotka mahdollistavat tarpeeksi suuren turvallisuuden tason, jotta suojat voidaan jättää pois työalueen ympäriltä.

Selvisi, että useissa käyttökohteissa käytetään samankaltaisia yhteistyörobotteja, jotka on joko valmistettu helposti liikuteltavaksi järjestelmäksi tai ne on integroitu osaksi jotakin tarkempaan käyttötarkoitukseen tarkoitettua järjestelmää. Kaikki löydetyt esimerkit käyttivät tehon ja voiman rajoittamista ja käsin ohjausta jollakin tavalla osana niiden järjestelmää. Vaikuttaa siltä, että nämä tekniikat ovat suosittuja yleismallisissa yhteistyöroboteissa, sillä ne ovat hyödyllisiä ja soveltuvat monenlaisiin käyttökohteisiin.

LÄHTEET

Aivaliotis, P., Aivaliotis, S., Gkournelos, C., Kokkalis, K., Michalos, G. & Makris, S. (2019). Power and force limiting on industrial robots for human-robot collaboration. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 59, pp. 346–360.

Amarillo, A., Sanchez, E., Caceres, J. & Oñativia, J. (2021). Collaborative Human-Robot Interaction Interface: Development for a Spinal Surgery Robotic Assistant. *International journal of social robotics*, vol. 13, pp. 1473–1484.

Five Nines - Plastics Division (2020). No Programming Simple Setup and Teaching with OB7 Cobot. YouTube-video, julkaistu 15.8.2020, viitattu 30.12.2021: <https://www.youtube.com/watch?v=keh99z1M5LI>

Franklin, C. S., Dominguez, E. G., Fryman, J. D. & Lewandowski, M. L. (2020). Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace. *Journal of safety research*, vol. 74, pp. 153–160.

Haddadin, S., Albu-Schäffer, A. & Hirzinger, G. (2008). Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing. *Robotics: Science and Systems*, vol. 3, pp. 217–224.

ISO/TS 15066 (2016). Robots and robotic devices — Collaborative robots. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

KUKA AG. The LBR iiwa. Pdf-dokumentti. Saatavissa (viitattu 30.12.2021): <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa> -> Data sheet

KUKA (2018). Innovative Human-Robot Collaboration for BMW/MINI Crash Can Assembly. YouTube-video, julkaistu 7.3.2018, viitattu 30.12.2021: <https://www.youtube.com/watch?v=keh99z1M5LI>

Lucci, N., Lacevic, B., Zanchettin, A. M. & Rocco, P. (2020). Combining Speed and Separation Monitoring With Power and Force Limiting for Safe Collaborative Robotics Applications. *IEEE robotics and automation letters*, vol. 5, no. 4, pp. 6121–6128.

ONExia Inc. (2021). PALLETIZER SPECIFICATIONS. Verkkosivu, saatavissa (viitattu 30.12.2021): <https://palletizur.com/palletizing-robot/palletizing-robot-specs.html>

ONExia Inc. (2018). PalletizUR - Collaborative Palletizer. YouTube-video, julkaistu 15.8.2018, viitattu 30.12.2021: https://www.youtube.com/watch?v=x_42owiCUqU

Productive Robotics (2019). OB7 Robot Comparison. Pdf-dokumentti. Saatavissa (viitattu 30.12.2021): <https://www.productiverobotics.com/downloads> -> Spec Sheet

Safeea, M., Bearee, R. & Neto, P. (2017). End-Effector Precise Hand-Guiding for Collaborative Robots. ROBOT 2017: Third Iberian Robotics Conference, vol. 694, pp. 595–605.

SFS-EN ISO 10218-1:en (2011). Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 10218-2:en (2011). Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 12100:en (2010). Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Universal Robots A/S (2019). Eliminate the mystery about safety. Pdf-dokumentti. Saatavissa (viitattu 30.12.2021): https://www.universal-robots.com/media/1804549/08_03_2019-ur_safety_made_easy.pdf

Villani, V., Pini, F., Leali, F. & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. Mechatronics (Oxford), vol. 55, pp. 248–266.

Zanchettin, A. M., Rocco, P., Chiappa, S. & Rossi, R. (2019). Towards an optimal avoidance strategy for collaborative robots. Robotics and computer-integrated manufacturing, vol. 59, pp. 47–55.