

Raimo Vähä

**YHTEISTOIMINTAROBOTIIKAN TURVALLISUUSSUUNNITTELU
PK-YRITYKSISSÄ**

YHTEISTOIMINTAROBOTIIKAN TURVALLISUUSSUUNNITTELU PK-YRITYKSISSÄ

Raimo Vähä
Opinnäytetyö
Kevät 2019
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Raimo Vähä

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Yhteistoimintarobotiikan turvallisuussuunnittelu
Pk-yrityksissä

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Safety Engineering of Collaborative Robot Systems

Työn ohjaaja: Esa Kontio

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2019

Sivumäärä: 29 + 1 liite

Työ tehtiin Oulun ammattikorkeakoulun TEHOJA-hankkeeseen. Hanke on saanut rahoitusta Euroopan aluekehitysrahastolta. Työssä laadittiin yhteistoimintarobotiikkaa hyödyntävien robottisolujen riskinarviointiin ohjeistus ja riskin arviointia helpottava Excel-työkalu. Lisäksi työssä laadittiin kooste markkinoilta saatavista voimamittauslaitteistoista, joita käytetään varmentamaan standardien vaatimukset.

Työssä koostettiin aiheeseen liittyvien standardien sisällöt ja ne tiivistettiin helposti luettavaan muotoon. Sovellettuja standardeja olivat esimerkiksi SFS-EN ISO 12100 ja ISO/TS 15066. Lisäksi standardien esimerkkien perusteella laadittiin Excel-työkalu, joka helpottaa riskien arviointia ja hallintaa. Työkalu sisältää toimintoja, jotka havainnollistavat, mihin riskeihin on puututtava. Tämä tapahtuu esimerkiksi kertomalla riskin suuruudesta eri värein.

Työn tulokset testattiin erään projektiryhmän toimesta ja niihin tehtiin muutoksia palautteen perusteella. Muutokset kuitenkin olivat vähäisiä, ja kommenttien perusteella kirjattiin myös jatkokehitysideoita. Työn tuotokset olivat kokeilun perusteella toimivia, eli ne helpottivat ja ohjasivat koeryhmän suorittamaa riskin arviointia.

Asiasanat: robotiikka, yhteistoiminta, turvallisuus, riskin arviointi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Mechanical Engineering, Machine Automation

Author: Raimo Vähä

Title of thesis: Safety Engineering of Collaborative Robot Systems

Supervisor: Esa Kontio

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2019

Pages: 29 + 1 appendices

This bachelor's thesis was commissioned by the TEHOJA project at Oulu University of Applied Sciences. TEHOJA project has received funding from the European Regional Development Fund. The purpose of this thesis was to compile instructions for safety engineering of collaborative robot systems, and to devise an Excel tool for simplifying the risk assessment process of the robot system. Additionally, a compilation of available measurement devices for verifying forces and pressures was made.

The relevant standards for this thesis were compiled and summarized into a form that was more accessible. For example, the summarized standards included SFS-EN ISO 12100 and ISO/TS 15066. Moreover, from the examples that were given in the standards, a risk assessment tool was compiled in an Excel spreadsheet form to make managing of the identified risks easier. The tool incorporates functions that ensure that proper actions are taken to reduce relevant risks. This was accomplished for example by displaying different colors.

The compiled instructions and the tool were tested on a project group and some changes were made according to the project groups recommendations. Also, some ideas for further development were written down. All in all, the results of this bachelor's thesis were a successful. The results provided good guidance for the test group in their risk assessment.

Keywords: robotics, collaborative, risk assessment, safety

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
2 LAIT JA STANDARDIT	9
2.1 Konedirektiivi	9
2.2 ISO/TS 15066, Tekninen spesifikaatio, kollaboratiiviset robotit	9
2.2.1 Yhteistoimintarobotti- ja konesovellusten vaatimukset	10
2.2.2 Robotin ja ihmisen kosketuksen riskin pienentäminen	11
2.3 SFS-EN ISO 12100, Yleinen riskin arviointi	11
2.3.1 Riskin arviointi	12
2.3.2 Riskin merkityksen arviointi	13
2.3.3 Riskin pienentäminen	13
2.4 SFS-EN ISO 10218-1 teollisuusrobottien turvallisuusvaatimukset	15
2.4.1 Yleisiä vaatimuksia	15
2.4.2 Ohjausjärjestelmän suorituskyky	16
2.4.3 Pysäytystoiminnot	16
2.5 SFS-EN ISO 10218-2 integrointivaiheen vaatimukset teollisuusroboteille	17
2.5.1 Vaarojen tunnistaminen ja riskien arviointi	17
2.5.2 Laitesijoittelu	18
2.5.3 Riskin arviointi	18
2.5.4 Vaarojen tunnistaminen	19
2.5.5 Turvallisuusvaatimusten ja suojaustoimenpiteiden todentaminen ja kelpuus	19
2.6 SFS-EN ISO 13855 turvalaitteiden sijoittaminen	21
2.7 SFS-ISO/TR 14121-2, Tekninen raportti, esimerkkejä riskin arvioinnista	23
2.7.1 Numeerinen pisteytys	23
3 RISKIN ARVIOINNIN OHJEISTUKSEN KOOSTAMINEN	26
4 RISKIN ARVIOINNIN TYÖKALUN KOOSTAMINEN	27

5 OHJEISTUKSEN JA TYÖKALUN KOEKÄYTTÖ	28
6 YHTEENVETO	29
LÄHTEET	30
LIITTEET	
Liite 1 Kooste voimanmittauslaitteistoista	

SANASTO

HRC	human-robot collaboration, ihmisen ja robotin yhteistoiminta
integraattori	robottisolun suunnittelija tai rakentaja
kollaboratiivinen	yhteistoiminnallinen
kvasistaattinen	puristumistapahtuma
proof-of-concept	soveltuvuus selvitys
robottisolu	kone, jossa on hyödynnetty robotiikkaa
transient	isku liikkeen aikana
yhteistoimintatila	tila, jossa ihminen voi työskennellä robotin läheisyydessä

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee yhteistoimintarobotiikan turvallisuussuunnittelua. Työssä laaditaan turvallisuussuunnittelua helpottava ohjeistus ja ohjaava työkalu. Työkaluun liitetään rinnalle yksinkertainen esimerkki, joka sisältää toimintoja, jotka varmistavat, että tarpeelliset standardit ja säännökset otetaan turvallisuussuunnittelussa huomioon. Lisäksi tämän raportin liitteeksi laaditaan kooste tällä hetkellä markkinoilla olevista voiman ja paineenmittauslaitteistoista, joita käytetään HRC-sovellusten turvallisuuden todentamiseen (liite 1).

Työn on tilannut Oulun ammattikorkeakoulun TEHOJA-hanke, joka tekee yrityksille proof-of-concept-tyyppisiä yhteistoimintarobotiikkaa hyödyntäviä demonstraatioita. TEHOJA-hanke on saanut rahoitusta Euroopan aluekehitysrahastolta. Robottisolujen suunnittelijoina toimivat usein henkilöt, joilla ei useinkaan ole käsitystä, millä tavoin turvallisuussuunnittelu tulisi näille soluille tehdä.

TEHOJA-hankkeen lisäksi Oulun ammattikorkeakoululla on useita yhteistoimintarobotiikkaa hyödyntäviä hankkeita. Työn tuloksena laadittava ohjeistus tulee hyödyttämään muitakin hankkeita ja opiskelijoita.

Vastaavaa näin laajaa työtä ei Oulun ammattikorkeakoulussa ei ole aiemmin tehty. Tämä luo vaikeuksia työn laatimisen kannalta, mutta samalla luo pohjaa mahdollisille tuleville töille.

2 LAIT JA STANDARDIT

Seuraavassa luvussa on laadittu kooste aiheeseen liittyvistä laeista ja standardeista. Niistä on referoitu opinnäytetyöhön soveltuvat osat. Työtä voidaan käyttää ohjeena ja apuna suunniteltaessa yhteistoimintarobotiikkaa käyttävää, yksinkertaista robottisolua sen turvallistamiseksi. Otteet standardeista on valittu sillä perusteella, että ne kertovat usein vastaan tulevista riskeistä.

2.1 Konedirektiivi

Konedirektiivin referointi tähän työhön on sivuutettu sillä perusteella, että kun noudatetaan harmonisoituja standardeja, noudatetaan myös konedirektiiviä. Konedirektiivin soveltaminen opinnäytetyöhön rajattiin ohjausryhmän katselmoinnissa työn ulkopuolelle.

2.2 ISO/TS 15066, Tekninen spesifikaatio, kollaboratiiviset robotit

Tekninen spesifikaatio ISO/TS 15066 asettaa turvallisuusvaatimukset kollaboratiivisille robottisovelluksille teollisuusympäristössä ja täydentää vaatimuksia ja ohjeita, joita annetaan standardeissa ISO 10218-1 ja ISO 10218-2. Tämä spesifikaatio ei päde ei-teollisuusrobotteihin. (1, s. 1.)

Kaikki kollaboratiiviset robottisolut vaativat jotain suojatoimenpiteitä varmistamaan operaattorin turvallisuuden robotin toiminnan aikana. Riskin arviointi on aina pakollinen sovelluksen vaarojen tunnistamisessa ja arvioinnissa. (1, s. 2.)

Kollaboratiivisen robottisolun suunnittelussa avainasemassa ovat vaarojen poisto ja riskin pienentäminen. Seuraavat asiat tulee ottaa suunnittelussa huomioon (1, s. 3):

- kollaboratiivisen työalueen kolmiulotteiset rajat
- kulkumahdollisuudet ja välietäisyydet
- ergonomia ja ihmisen interaktio laitteiden kanssa
- käytön rajoitukset
- aikarajoitukset.

Integraattorin vastuulla on suorittaa riskin arviointi standardin ISO 10218-2 kuvaamalla tavalla. Riskin arvioinnin tulee sisältää kohtuudella ennakoitava väärinkäyttö ja operaattorin pääsy kollaboratiiviseen työskentelytilaan. Lisäksi riskin arvio olisi suotavaa suorittaa loppukäyttäjän kanssa. (1, s. 4.)

Riskin arvioon liittyvät vaaralliset riskit ovat standardissa ISO 10218-2 liitteessä A. Merkittävien riskien luettelosta valitaan rakenteilla olevaan robottisoluun soveltuvat osat. Joka tapauksessa riskin arvioinnissa on oltava vähintään seuraavat asiat (1, s. 4):

- robottiin liittyvät vaarat
 - o robotin ominaisuudet
 - o kvasistaattinen kuorma eli puristuminen
 - o operaattorin työpiste robottiin nähden, eli onko operaattorilla esimerkiksi suora näköyhteys tarvittaviin paikkoihin
- robottisoluun liittyvät vaarat
 - o päätetyökalun ja työkappaleen vaarat
 - o operaattorin liikkeet solun ympärillä
 - o kiinnityspisteiden suunnittelu ja asettelu
 - o transient-iskujen mahdollisuus
- käyttötarkoitukseen liittyvät vaarat
 - o prosessikohtaiset vaarat, kuten esimerkiksi hitsaus
 - o henkilökohtaisten suojavaälineiden tarve
 - o ergonomian puute.

2.2.1 Yhteistoimintarobottiikkasovellusten vaatimukset

Sovellusten, joissa hyödynnetään yhteistoimintarobottiikkaa, tulee täyttää standardien SFS EN ISO 10218-1 ja 10218-2 asettamat vaatimukset. Tekninen raportti täydentää työssä käsiteltyjen standardien asettamia vaatimuksia. (1, s. 6.)

Yhteistoimintatilan tulee olla suunniteltu siten, että operaattori voi suorittaa kaikki vaadittavat tehtävät. Kaikki esiintyvät riskit tulee poistaa tai pienentää hyväksyttävälle tasolle riskin arvioinnissa kuvatulla tavalla. Laitteiden ja koneiden sijoittelu ei saa aiheuttaa ylimääräisiä riskejä. Yhteistoimintatila tulee pienentää niin pieneksi kuin se on käytännöllisistä syistä mahdollista. (1, s. 6.)

Yhteistoiminnallisen työskentelyn aikana operaattorilla tulee olla mahdollisuus pysäyttää robotin toiminta yhden toiminnon seurauksena tai olla mahdollisuus poistua esteettömästi yhteistoimintatilasta. Pysäyttäminen voidaan toteuttaa esimerkiksi sallintalaitteella, hätä-pysäytinlaitteella tai robotin pysäyttämällä käsin. (1, s. 7.)

2.2.2 Robotin ja ihmisen kosketuksen riskin pienentäminen

Kun on mahdollista, että ihmisen ja robotin välillä on kontaktia, jolla on mahdollisuus vahingoittaa ihmistä, tulee se ottaa huomioon riskin arvioinnissa. Aina, mikäli se on mahdollista, yhteistoiminnallinen työtila tulee suunnitella siten, että kontaktin mahdollisuus on harvinainen ja vältettävissä. (1, s. 16.)

Riskin arvioinnissa tulee olettaa, että operaattorilla ei ole mitään henkilökohtaisia riskin pienentämisen välineitä. Riskin arvioinnissa siis otetaan huomioon paljaat kehonalueet, kontaktitilanteiden alkuperä, tapahtuman todennäköisyys, tapahtuman tyyppi, eli transient-isku tai kvasistaattinentapahtuma, kontaktialue, -nopeus ja -voima. (1, s. 16.)

Edellä mainittuja riskejä pienennetään passiivisesti esimerkiksi kasvattamalla kontaktialuetta kulmien pyörityksillä tai sileillä pinnoilla, lisäämällä pehmusteita tai rakentamalla joustavia rakenteita sekä rajoittamalla liikkuvia massoja. Aktiivisesti riskejä pienennetään esimerkiksi rajoittamalla voimia ja momenteja, liikkuvien osien nopeuksia tai ohjelmallisesti työskentelytilaa. (1, s. 17.)

Transient-iskujen ja kvasistaattisten tapahtumien raja-arvot löytyvät ISO/TS 15066:n liitteestä A. Liitteen A taulukosta löytyvien raja-arvojen noudattaminen tulee varmentaa sopivalla tavalla.

2.3 SFS-EN ISO 12100, Yleinen riskin arviointi

Standardi SFS-EN ISO 12100 käsittelee yleisesti koneiden suunnittelua turvallisuuden näkökulmasta. Standardissa esitetään peruskäsitteitä, periaatteita ja menetelmiä koneen turvalliseen suunnitteluun. Standardin periaatteiden esimerkkejä on kuvattu teknisessä raportissa ISO/TR 14121-2. (2, s. 12.)

Riskin arviointi ja pienentäminen tulee suorittaa seuraavassa järjestyksessä (2, s. 28):

- määritetään koneen raja-arvot, jotka sisältävät tarkoitetun käytön ja kohtuudella ennakoitavan väärinkäytön
- tunnistetaan vaarat ja niihin liittyvät vaaratilanteet
- arvioidaan riskin suuruus jokaisen vaaran tai vaaratilanteen osalta erikseen
- arvioidaan riskin merkitys ja tehdään päätös riskin pienentämisestä
- poistetaan vaara tai pienennetään vaaraan liittyvää riskiä asiaan sopivalla suojaustoimenpiteellä.

Edellä kuvattua prosessia toisestaan niin kauan, että riskit ovat hyväksyttävällä tasolla. Suunnitteluvaiheessa tapahtuva turvallisuuden parantaminen on aina ensisijainen vaihtoehto koneen turvallistamiseen. (2, s. 28.)

Koneen turvallistamiseen suunnitteluvaiheessa tulee ottaa seuraavat asiat huomioon, ja niiden tärkeysjärjestys on seuraava (2, s. 32):

1. luontaisesti turvalliset suunnitteluratkaisut
2. suojaustekniset ja täydentävät suojaustoimenpiteet
3. käyttöä koskevat ohjeet, varoituskilvet, varoituslaitteet ja koulutus.

2.3.1 Riskin arviointi

Riskin arvion suorittamiseen tarvitaan tietoa koneen kuvauksesta, säädöksistä, käyttökokemuksista ja ergonomiasta. Koneen kuvaus sisältää esimerkiksi eritelvät koneen hyödyntäjiltä, koneen koko elinkaaren vaiheiden kuvauksen, rakennepiirustukset, mahdollisesti samankaltaisten koneiden suunnitelmien dokumentaatio ja käytettävissä olevat koneen käyttöä koskevat tiedot. Käyttökokemukset voivat sisältää esimerkiksi samankaltaisen koneen tapaturmatietoja tai toimintahäiriötietoja, tietoa terveyshaitoista ja samankaltaisen koneen käyttäjien kokemuksia. (2, s. 34.)

Riskeihin vaikuttaa erityisesti vahingon vakavuus ja esiintymistodennäköisyys. Toisin sanottuna riski on vakavuuden ja esiintymistodennäköisyyden funktio. (2, s. 42.)

Vahingon vakavuus jaetaan kolmeen luokkaan: lievään, vaikeaan ja kuolemaan. Vahingon laajuus taas jaetaan kahteen luokkaan: yhteen henkilöön kohdistuvaan ja useaan henkilöön kohdistuvaan. (2, s. 44.)

Riskin suuruuden arvioinnissa tulee ottaa huomioon se, että turvatekninen laite on ohitettuna tai se on kierretty. Lisäksi huomioon on otettava suojalaitteen kiertämisen syy, esimerkiksi kun suojaustoimenpide hidastaa tuotantoa tai se on vaikea käyttää. (2, s. 48.)

2.3.2 Riskin merkityksen arviointi

Riskin arvioinnin jälkeen tulee suorittaa riskin merkityksen arviointi. Sen tehtävänä on määrittää riskin pienentämisen tai poistamisen tarve. Mikäli on tarve pienentää riskiä, valitaan tähän kyseiseen riskiin soveltuva pienentämisen menetelmä. Riskin pienentämisen jälkeen on myös syytä arvioida prosessissa mahdollisesti syntyviä uusia riskejä. (2, s. 50.)

Riskin riittävä pienentäminen on saavutettu, kun (2, s. 50)

- kaikki toimintaolosuhteet ja toimintapuutteet ovat tarkasteltu
- vaarat ja riskit ovat poistettu tai pienennetty alimmalle käytännössä mahdolliselle tasolle
- suojaustoimenpiteiden uudet riskit ovat otettu huomioon ja käsitelty
- koneen käyttäjiä on tiedotettu jäännösriskeistä
- suojaustoimenpiteet ovat yhteensopivia toistensa kanssa
- suojaustoimenpiteillä ei ole kielteisiä vaikutuksia koneen käytettävyyteen tai työskentelyolosuhteisiin.

2.3.3 Riskin pienentäminen

Riskin pienentämiseen tulee soveltaa kuvassa 1 selostettua kolmen askeleen menetelmää. Näistä ainoastaan ensimmäinen askel on sellainen, jossa voidaan

välttää vaaroja siten, ettei muita turvateknisiä tai täydentäviä suojausratkaisuja vaadita. (2, s. 52.)

- ▶ Kiinteät ratkaisut
 - ▶ Suunnitellaan suojaukset siten, että väliin puristuminen on mahdotonta
 - ▶ Suunnitellaan joustavia rakenteita
 - ▶ Rajoitetaan ulottuvuutta vaaravyöhykkeelle
 - ▶ Toimintaan kytketyt kiinteät suojat
- ▶ Turvatekniset laitteet
 - ▶ Valoverho
 - ▶ Turvalaserskanneri
- ▶ Ohjeistaminen
 - ▶ Koulutukset
 - ▶ Perehdyttäminen
 - ▶ varoituskyltit



KUVA 1. Riskin pienentämisen periaate ja esimerkkejä (2, s. 32)

Koneen geometriset tekijät vaikuttavat koneen turvallisuuteen. Kone tulee suunnitella siten, että työalueelle on hyvä ja suora näkyvyys esimerkiksi katvealueiden pienentämisellä. Ohjauspaikalta pitää pystyä varmistamaan, ettei vaaravyöhykkeillä ole ihmisiä. Lisäksi koneessa tulee välttää teräviä kulmia, ulkonevia laitoja ja aukkoja, joihin esimerkiksi vaatteet voivat jäädä loukkuun. (2, s. 54.)

Liikkuvien osien väliin puristumisen vaara tulee minimoida sopivalla tavalla. Tästä lisätietoa on saatavilla standardeissa SFS-EN ISO 13854 ja SFS-EN ISO 13857. (2, s. 54.)

Suojausteknisiä laitteita käytetään, kun kuvassa yksi mainittuja periaatteita ei voida luontevasti soveltaa tai ne eivät pienennä riskiä riittävästi. Joitain suojausteknisiä laitteita voidaan käyttää estämään usealle vaaralle altistumista. Tietyn suojausteknisen laitteen valinta on tehtävä kyseisen koneen riskin arvioinnin perusteella. Kuitenkin suunnittelija tulee suosia kiinteitä suoja-aittoja aina, kun käyttäjän ei ole tarpeellista päästä koneen liikkuviin osiin käsiksi koneen normaalin toiminnan aikana. (2, s. 74.)

Laitteen asiakirjoista tulee käydä ilmi riskin arvioinnissa käytetty menetelmä ja sen tulokset. Näihin kuuluvat esimerkiksi koneen tiedot, merkitykselliset oletta-

mukset, tiedot tunnistetuista vaaroista, tiedot riskin pienentämisestä, tiedot jäännösriskeistä ja riskin arvioinnin lopputulos. Lisäksi, mikäli riskin arvioinnissa on käytetty muita standardeja, kuten suojaustoimenpiteiden valinnassa, tulee niihin viitata. (2, s. 102.)

2.4 SFS-EN ISO 10218-1 teollisuusrobottien turvallisuusvaatimukset

Standardi SFS-EN ISO 10218-1 käsittelee teollisuusrobottien turvallisuusvaatimuksia. Standardiin on määritelty vaatimuksia ja ohjeita teollisuusrobottien turvallisuudesta suunnittelusta, turvallisuustoimenpiteistä ja käyttöä koskevista tiedoista. Lisäksi standardi kuvaa perusvaaroja ja niihin liittyvien riskien vähentämistä tai poistamista. (3, s. 10.)

Vaarojen kartoitusvaiheessa on suoritettava tunnistetuille riskeille riskien arviointi. Arvioinnin aikana on kiinnitettävä erityistä huomiota seuraaviin asioihin (3, s. 20):

- 1) robotin suunniteltu käyttö, joka sisältää ohjelmoinnin, kunnossapidon, asetukset ja puhdistuksen
- 2) vahinkokäynnistys
- 3) henkilöiden lähestyminen
- 4) ennakoitavissa oleva väärinkäyttö
- 5) ohjausjärjestelmän vikaantumisen vaikutukset
- 6) tarvittaessa muut sovelluksesta aiheutuvat vaarat.

Robotti tai robottisolun tulee suunnitella SFS-EN ISO 12100 -standardin mukaisesti niille ominaisten vaarojen kannalta. Standardin ensimmäinen osa ei ota kantaa teräviin kulmiin, vaan ne ovat SFS-EN ISO 10218-2 -standardissa. (3, s. 20.)

2.4.1 Yleisiä vaatimuksia

2.4.1.1 Voimansiirtoelimet

Kaikki voimansiirtokomponentit, joiden väliin voi joutua puristuksiin, esimerkiksi hammaspyörät tai hihnat, tulee suojata kiinteillä tai irrotettavilla suojilla. Lisäksi suojat tulee varustella siten, että laite pysähtyy, jos suoja avataan tai irrotetaan. (3, s. 20.)

2.4.1.2 Tehon syöttö

Robottisolu on suunniteltava siten, että tehon syötön häviäminen tai muutokset eivät aiheuta vaaraa. Tämä koskee myös muita mahdollisesti kytkettyjä järjestelmiä, kuten alipainetta, hydraulikkaa tai pneumatiikkaa. (3, s. 20.)

2.4.1.3 Robotin tai robottisolun hallintaelimet

Hallintaelimet tulee rakentaa tai sijoittaa siten, että niiden tahaton käyttö on estetty. Tämä voidaan esimerkiksi toteuttaa valintakytkimillä tai avaimilla toimivilla kytkimillä. Hallintaelimen tila tulee olla selkeästi ilmaistu. (3, s. 22.)

Robottisolun hallintaelimissä tulee olla niiden toimintojen ilmaisevat merkinnät. Mikäli robottia on mahdollista hallita muuten kuin paikallisesti, tulee paikallisen hallinnan estää robotin käynnistäminen etänä. (3, s. 22.)

2.4.2 Ohjausjärjestelmän suorituskyky

Robotin tai robottisolun ohjausjärjestelmän tulee noudattaa joko standardia SFS-EN ISO 13849 tai standardia IEC 62061:2005. Ohjausjärjestelmän suorituskyky on määritelty tarkemmin standardissa SFS-EN ISO 13849-1. Mikäli käytetään jotain muuta suorituskykyvaihtoehtoa, tulee siitä ilmoittaa selkeästi, kuitenkin siten, että (3, s. 24)

- minkään osan yksittäinen vika ei johda turvatoiminnon menettämiseen
- kohtuuden rajoissa yksittäiset viat tulisi olla havaittavissa ennen turvatoiminnon tarvetta
- yksittäisen vian sattuessa turvatoiminto suoritetaan ja turvallinen tila säilyy vian korjaukseen asti.

2.4.3 Pysäytystoiminnot

Kaikissa roboteissa tai robottisoluissa on oltava hätä- ja suojapysäytystoiminto. Lisäksi hätäpysäytinpainikkeita on oltava riittävä määrä. Tämä määrä määräytyy standardissa SFS-EN ISO 13855. Kaikki nämä toiminnot on voitava kytkeä mahdollisiin ulkoisiin turvalaitteisiin. (3, s. 26.)

Robotin tai robottisolun jokaisessa ohjauspaikassa, josta robotti tai solu voidaan käynnistää, tulee olla hätäpysäytinpainike. Hätäpysäyttimen vaatimukset on kerrottu tarkemmin standardissa IEC 60204-1. Hätäpysäyttimen tulee täyttää seuraavat kriteerit (3, s. 26):

- on muihin ohjauksiin nähden esisijainen
- kaikki ohjattavat vaarat pysähtyvät
- poistaa käyttövoiman robotin toimilaitteilta
- pysyy voimassa kuitaamiseen asti
- voidaan kuitata ainoastaan käsin.

Robotissa tai robottisolussa tulee olla vähintään yksi suojapysäytystoiminto, johon on mahdollista kytkeä ulkoisia turvalaitteita (3, s. 28). Suojapysäytys voidaan saada aikaan esimerkiksi turvaskannereita tai valoverhoja käyttämällä.

2.5 SFS-EN ISO 10218-2 integrointivaiheen vaatimukset teollisuusroboteille

Standardi SFS EN-ISO 10218-2 käsittelee teollisuusrobottien integrointivaiheen vaatimuksia. Integrointivaiheeseen kuuluu teollisuusrobottisolun suunnittelu, valmistus, asennus, käyttö, kunnossapito ja käytöstä poisto. Tämä myös koskee robottisolun komponentteina olevia laitteita. (4, s. 7.)

Standardi esittelee robottisoluihin liittyviä perusvaaroja ja näiden riskien vähentämiseen tai poistoon liittyviä vaatimuksia. Tämä standardi ei koske robottisovelluksesta aiheutuvaa melua. (4, s. 7.)

2.5.1 Vaarojen tunnistaminen ja riskien arviointi

Yleisesti robottien toiminallisuudet ovat huomattavasti erilaiset kuin muiden koneiden. Esimerkiksi robotit voivat liikkua suurella toiminta-alalla suurella energialla. Lisäksi niiden käynnistyminen ja liikerata ovat vaikeasti ennustettavia. Robotti voi työskennellä myös muiden koneiden työskentelyalueella ja usein operaattorin tulee olla erittäin lähellä toimivaa robottijärjestelmää. (4, s. 10.)

Robottisolujen turvallisuuden parantaminen tapahtuu muutamalla perusperiaatteella. Vaaroja ja riskejä vähennetään, poistetaan tai pienennetään suunnittelulla,

estetään operaattorin pääsy vaarallisiin osiin solun käydessä ja pienennetään riskejä, kun puututaan koneen toimintaan. (4, s. 10.)

Robottisolun suojaustoimenpiteiden valintaan ja suunnitteluun vaikuttaa käytetyn robotin tyyppi, käyttösovellus, robotin suhde muihin koneisiin, sekä solun suhde muihin laitteisiin. Robotin on aina oltava soveltuva kyseiseen käyttökohteeseen. (4, s. 11.)

2.5.2 Laitesijoittelu

Robottijärjestelmän sijoituskaavio on avainprosessi vaarojen poistamiseen ja riskien pienentämiseen. Tähän prosessiin tulee ottaa huomioon seuraavat asiat (4, s. 12):

- robottisolun fyysiset rajat
- työtila, kulkuväylät ja väljetäisyydet
- mahdolliset käsityövaiheet
- ergonomia
- ympäristöolosuhteet
- työkappaleiden lastaus ja purku tai työkalun vaihto
- ympäröivät turvatoimenpiteet
- vaatimukset hätäpysäytinlaitteista
- vaatimukset sallintalaitteille
- huomion kiinnittäminen jokaisen komponentin käyttötarkoitukseen.

2.5.3 Riskin arviointi

Integraattorin tulee aina tehdä riskin arviointi, jotta voidaan päättää tarvittavista toimenpiteistä riskien poistamiseksi tai pienentämiseksi. Erityistä huomiota kiinnitetään koneisiin, joista on poistettu turvalaitteita kokonaisuuden aikaansaamiseksi. Riskin arviointi tulee tehdä siksi, että voidaan systemaattisesti analysoida soluun liittyvät riskit koko sen elinkaaren ajalta. (4, s. 12.)

2.5.4 Vaarojen tunnistaminen

Integraattorin tulee tunnistaa ja kirjata kaikki tehtävät, joita robottisolun ja sen oheislaitteiden käyttäjät suorittavat. Näihin tehtäviin kuuluvat esimerkiksi (4, s. 14)

- prosessin valvonta ja ohjaus
- työkappaleen lastaus
- ohjelmointi ja todentaminen
- lyhyet käsityövaiheet, jotka eivät vaadi koneen purkamista
- asetustyö
- vianetsintä
- mahdollisten virhetoimintojen korjaaminen
- vaarallisen energian valvominen
- kunnossapito ja huolto
- laitteen puhdistus.

Vaarojen tunnistamisen jälkeen tulee arvioida robottisoluun liittyviä riskejä, ennen riittävien toimenpiteiden soveltamista riskien pienentämiseksi. Nämä toimenpiteet perustuvat seuraaviin peruseriaatteisiin (4, s. 14):

- vaarojen tai riskien poistaminen suunnittelun avulla
- turvateknisten laitteiden käyttö
- järjestelmää täydentävät toimenpiteet, esimerkiksi ohjeistaminen ja koulutus.

2.5.5 Turvallisuusvaatimusten ja suojaustoimenpiteiden todentaminen ja kelpuus

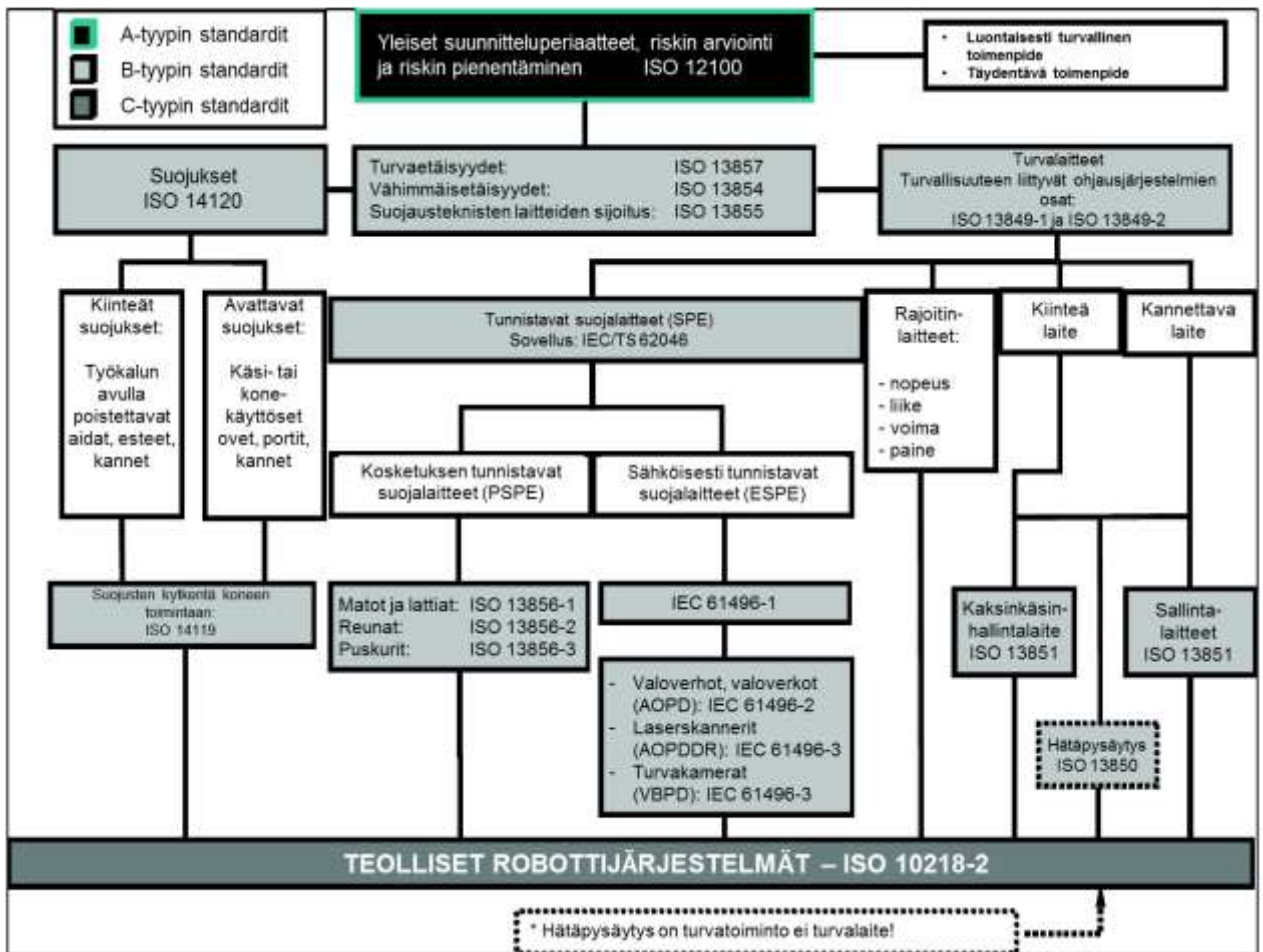
Robottijärjestelmän integraattorin tulee suorittaa robottijärjestelmän suunnitelman ja toteutuksen todentaminen ja kelpuus. Todentaminen ja kelpuus sisältää myös järjestelmään kuuluvat turvalaitteet. Todentaminen suoritetaan edellä lueteltuja peruseriaatteita käyttäen. (4, s. 42.)

Todentamiseen ja kelpuuttamiseen voidaan esimerkiksi käyttää seuraavia menetelmiä (4, s. 43):

- visuaalinen tarkastus

- käytännön testit
- mittaukset
- toiminnan aikaiset havainnot
- sovelluksen suunnitelmien, piirikaavioiden, suunnitteluaineistojen arviointi
- turvallisuusdokumenttien läpikäynti
- tehtäväkohtaisen riskin arvioinnin läpikäynti
- layout dokumentin läpikäynti
- spesifikaatioiden läpikäynti
- koneen käyttöä koskevien tietojen läpikäynti.

Kuvassa 2 on kuvattu standardin SFS-EN ISO 10218-2 turvalaitteiden sidosstandardien väliset suhteet. Kuvasta nähdään, mitä standardia tulee missäkin tapauksessa lukea.



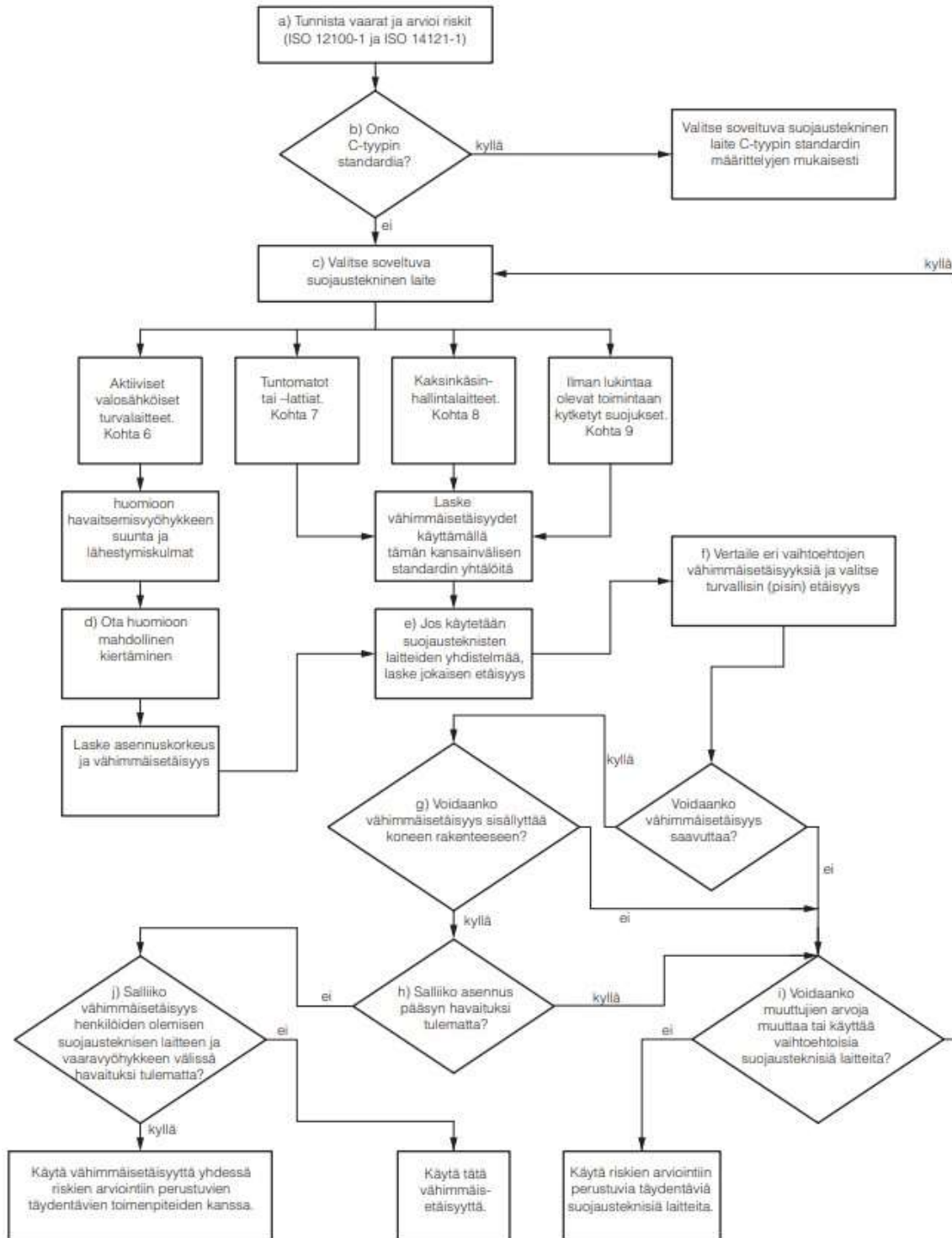
KUVA 2. Standardien väliset suhteet (4, s. 53)

A-tyyppin standardit ovat turvallisuuden perustandardreja, ja ne esittävät yleisiä perusteita ja näkökulmia, joita voidaan soveltaa kaikkiin koneisiin. B-tyyppin standardit, eli turvallisuuden ryhmästandardit, käsittelevät tarkemmin jotain turvallisuusnäkökulmaa tai suojausteknistä laitetta. C-tyyppin standardit, eli konekohtaiset turvallisuusstandardit käsittelevät usein tietyn koneen tai koneryhmän turvallisuusvaatimuksia. (5, s. 6)

2.6 SFS-EN ISO 13855 turvalaitteiden sijoittaminen

Standardi SFS EN-ISO 13855 käsittelee turvalaitteiden sijoittamista eri kehonosien lähestymisnopeuksien perusteella. Standardi kuvaa menetelmän, jonka avulla määritetään suojausteknisten laitteiden vähimmäisetäisyys vaaravyöhykkeestä. Standardin käsittelemät laitteet ovat koskettamatta tunnistavat, kosketuksen tunnistavat, kaksikäsihallintalaitteen ja ilman lukitusta olevat koneen toimintaan kytketyt suojaukset. (6, s. 10.)

Kuvassa 3 on esitetty kuvamuodossa standardin mukaisten suojausteknisten laitteiden tai hallintaelimien oikean sijoituksen määrittäminen (6, s. 16). Myöhemmin kerrotaan kaavion sisältämistä laskukaavoista.



KUVA 3. Menetelmävuokaavio (6, s. 20)

Järjestelmän kokonaispysähtymisaika lasketaan kaavalla 1 (6, s. 22).

$$T = t_1 + t_2$$

KAAVA 1

T = kokonaispysähtymisaika

t_1 = pisin aika suojausteknisen laitteen signaalin ja POIS-tilan saavuttamisen välillä

t_2 = pisin aika, joka tarvitaan, että vaaralliset toiminnot lakkaavat POIS-signaalin saavuttua.

Vähimmäisetäisyys vaaravyöhykkeestä saadaan käyttämällä kaavaa 2 (6, s. 24).

$$S = (K \times T) + C$$

KAAVA 2

S = vähimmäisetäisyys [mm]

K = muuttuja, esimerkiksi kehon lähestymisnopeus [mm/s]

T = kokonaispysähtymisaika [s]

C = lähestymisetäisyys [mm]

2.7 SFS-ISO/TR 14121-2, Tekninen raportti, esimerkkejä riskin arvioinnista

Teknisessä raportissa SFS-EN ISO 14121-2 esitetään esimerkkejä riskin arviointiin SFS-EN ISO 12100 standardin pohjalta. Standardi esittää useita eri menetelmiä riskin suuruuden arviointiin. (7, s. 8.) Tässä kuitenkin keskitytään näistä esitetyistä menetelmistä viimeiseen.

2.7.1 Numeerinen pisteytys

Numeerisessa riskin arvioinnin työkalussa on kaksi tai useampi muuttuja, joiden painoarvoa muuttamalla saadaan riskille numeerinen arvo. Tämä arvo kertoo pitääkö riskiä pienentää. Taulukot 1, 2, 3 ja 4 ovat mukaelmia teknisessä raportissa esitetyistä esimerkeistä (7, s. 32).

Taulukoiden avulla riskille määritetään numeroarvo. Numeroarvo kertoo, pitääkö riskiä pienentää.

TAULUKKO 1. Tapahtuman vakavuuden esimerkkipisteytys

Tapahtuman vakavuus	SS, Severity score
Tuhoisa	SS = 100
Vaikea	99 ≥ SS ≥ 90
Kohtalainen	89 ≥ SS ≥ 30
Vähäinen	29 ≥ SS ≥ 0

TAULUKKO 2. Tapahtuman todennäköisyyden esimerkkipisteytys

Tapahtuman todennäköisyys	PS, Probability score	Selitys
Erittäin todennäköinen	PS = 100	Tapahtuu varmasti tai todennäköisesti
Todennäköinen	99 ≥ PS ≥ 70	Voi tapahtua, mutta ei todennäköisesti
Epätodennäköinen	69 ≥ PS ≥ 30	Todennäköisesti ei tapahdu
Erittäin epätodennäköinen	29 ≥ PS ≥ 0	todennäköisyys lähes nolla

Riskin suuruus lasketaan kaavalla 3, ja riskin luokitus katsotaan taulukosta 4. Taulukosta 3 katsotaan kaavan 3 tulos.

$$RS = SS + PS$$

KAAVA 3

RS = Risk Score

SS = Severity score

PS = Probability score

TAULUKKO 3. Riskin suuruus

RS, Risk score	Riskin suuruus
RS ≥ 160	Suuri
159 ≥ RS ≥ 120	Keskimääräinen
119 ≥ RS ≥ 90	Pieni
80 ≥ RS ≥ 0	Merkityksetön

TAULUKKO 4. Riskin luokitus

Riskin luokitus	Toimenpide
Suuri	Työtä ei saa aloittaa, ennen kuin riski on pienennetty vähintään keskimääräiseksi
Keskimääräinen	Riskiä on pienennettävä
Pieni	Riskiä seurataan ja arvioidaan mahdollisesti uudestaan jälkiarvioinnissa
Merkityksetön	Ei tarvittavia toimenpiteitä

3 RISKIN ARVIOINNIN OHJEISTUKSEN KOOSTAMINEN

Työssä laadittavan ohjeistuksen koostaminen aloitettiin tutkimalla useita erilaisia vaihtoehtoja tiedon esittämiseksi. Vaihtoehtoina harkittiin Word-pohjaista ohjeistusta, mutta lopuksi päädyttiin Powerpoint-muotoiseen ohjeistukseen.

Powerpoint-esitykseen päädyttiin siksi, että aiheena riskin arvioinnin ohjeistus on niin laaja eikä kysymyksiin ole suoria vastauksia ja Powerpoint-esityksessä voidaan aiheet pilkkoa käyttäjäystävälliseen muotoon. Lisäksi asiakokonaisuudet ovat helposti siirrettävissä eri järjestykseen.

Ohjeistuksen kirjoittaminen aloitettiin kirjaamalla aihealueittain paljon kysymyksiä, joita riskin arvioinnin tekijän tulee miettiä robottisolun riskin arvioinnin aikana. Näihin kysymyksiin kuitenkin ei ole suoria vastauksia vaan ohjeistukseen kirjattiin riskin pienentämisen yleinen periaate. Lisäksi asiakokonaisuuksien kohdalle merkittiin standardit, joista voi etsiä lisätietoa kyseiseen kohtaan.

Ohjeistus muodostui sellaiseen muotoon, että se ohjaa lukijaa kyseenalaistamaan oikeita asioita rakennetusta robottisolusta. Lisäksi ohjeistus koostaa oikeat standardit, joista voi hankkia lisätietoa.

4 RISKIN ARVIOINNIN TYÖKALUN KOOSTAMINEN

Ohjeistuksen rinnalle laadittavan riskin arvioinnin työkalun koostaminen aloitettiin tutkimalla eri vaihtoehtoja siitä, kuinka riskin arvioinnin tulokset saadaan helposti lähestyttävään muotoon. Vaihtoehtoina työkalulle olivat Google Forms, Microsoft Forms ja Excel-taulukko. Lopulta näistä Googlen ja Microsoftin tarjoamat palvelut karsittiin pois, koska niillä ei voinut käsitellä niihin kirjoitettuja vastauksia tarpeeksi monipuolisesti.

Riskin arvioinnin työkaluun kirjattiin edellä mainitut taulukot riskin pisteyttämisestä, ISO/TS 15066 -spesifikaatiosta löytyvä voimien raja-arvo taulukko ja useita työkalun käyttöä helpottavia ohjeita. Työkaluun kirjataan edellä mainitun ohjeistuksen perusteella tarvittavat tiedot tunnistetuista riskeistä, ja se kertoo etusivullaan, pitääkö riskiä pienentää.

5 OHJEISTUKSEN JA TYÖKALUN KOEKÄYTTÖ

Ohjeistus ja työkalu luovutettiin koekäyttöön eräälle yhteistoimintarobotiikkaa hyödyntävälle projektiryhmälle. Projektiryhmä testasi ohjeistuksen ja työkalun toimivuutta, helppokäyttöisyyttä sekä luettavuutta ja antoi palautetta näiden toimivuudesta. Projektiryhmän riskin arviointia verrattiin verrokkiin, jonka opinnäytetyön tekijä oli laatinut.

Projektiryhmän laatima riskin arviointi oli hyvin kattava ja sisälsi kaikki samat asiat kuin verrokkikin. Verrokki sisälsi vain yhden kohdan, jota projektiryhmä ei ollut kirjannut muistiin. Näin ollen projektiryhmä onnistui laatimaan kattavan riskin arvioinnin heille annettujen dokumenttien perusteella.

Projektiryhmän palaute saamistaan dokumenteista oli positiivista. Heidän mukaansa ohjeistus oli helposti lähestyttävä ja helppolukuinen. Excel-työkalu oli informatiivinen ja helppokäyttöinen.

Projektiryhmä ehdotti Excel-työkaluun jatkokehitysideoina taulukoiden lukitsemista ja tietyille välilehdille lisätietoa-solujen lisäämistä. Ohjeistukseen ei ollut lisättävää.

6 YHTEENVETO

Työn tilaaja oli Oulun ammattikorkeakoulun TEHOJA-hanke. Opinnäytetyön pää-tarkoitus oli laatia helpottava ohjeistus ja työkalu yhteistoimintarobotiikkaa hyödyntävien robottisolujen riskinarviointiin. Työssä onnistuttiin hyvin aikataulupai-neista huolimatta. Työn vaativuuden ja laajuuden kannalta työ oli haastava ja monipuolinen. Tuotokset kuitenkin muotoutuivat työn suorittamisen aikana hie-man eri muotoon kuin alkuperäisissä tavoitteissa ja rajauksissa, mutta lopputu-lokset kuitenkin palvelevat suurempaa käyttäjäkuntaa kuin alkuperäisen suunni-telman mukaiset tuotokset.

Työn tuloksina tuotetut dokumentit onnistuivat koekäytön perusteella hyvin. Kui-tenkin tuotettuihin dokumentteihin on jatkokehitysmahdollisuuksia, kuten riskin arvioinnin työkalun voisi kehittää puhelinsovellukseksi tai sen toiminnallisuuksia voitaisiin muokata paremmiksi.

Työn liitteenä 1 oleva kooste voimanmittauslaitteistoista laadittiin lyhyenä vertai-luna markkinoilla saatavana olevista laitteistoista. Laitteita käytetään yhteistoi-mintarobotiikkaa hyödyntävien robottisolujen voimien ja pintapaineiden raja-ar-vojen todentamiseen. Koosteeseen valikoituvat laitteistot, joista oli tietoa saata-villa kirjoittamishetkellä.

Työssä koostettu tieto oli joissakin tilanteissa vaikeasti tulkittavaa, eikä aihee-seen ole valmiita ratkaisuja. Tästä syystä työssä linjataan vain peruseriaatteita ja annetaan vain muutama esimerkki riskin pienentämiseen.

LÄHTEET

1. ISO/TS 15066. 2016. Robots and robotic devices – Collaborative robots. Sveitsi: ISO copyright office.
2. SFS-EN ISO 12100. 2010. Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, riskin arviointi ja riskin pienentäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
3. SFS-EN ISO 10218-1. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
4. SFS-EN ISO 10218-2. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
5. SFS-EN ISO 13849-1. 2015. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
6. SFS-EN ISO 13855. 2010. Koneturvallisuus. Suojausteknisten laitteiden sijoitus ottaen huomioon kehon osien lähestymisnopeudet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
7. SFS-ISO/TR 14121-2. 2013. Koneturvallisuus. Riskin arviointi. Osa 2: Käytännön opastusta ja esimerkkejä menetelmistä. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

325-2811-001_EN10_Flyer_CoboSafe_CBSF-75-Basic. GTE Industrieelektronik GmbH. Saatavissa: https://www.gte.de/material/325-2811-001_EN10_Flyer_CoboSafe_CBSF-75-Basic.pdf. Hakupäivä 16.4.2019; 325-2811-004_EN22_Flyer_CoboSafe Kopie. GTE Industrieelektronik GmbH. Saatavissa: https://www.gte.de/material/325-2811-004_EN22_Flyer_CoboSafe.pdf. Hakupäivä 16.4.2019; PILZ myyntiedustaja 2019. Re: Mittauslaitteisto. Sähköpostiviestin liite. Vastaanottaja: Raimo Vähä. 17.4.2019.

GTE Industrieelektronik		GTE Industrieelektronik		PILZ	
CoboSafe CBSF-XX		CoboSafe-75-Basic		PROBms	
9 eri laitetta, kaikilla eri jousivakio		Yksi laite, 20-500N		Yksi laite, 9 eri joustaa	
Mittausala	80mm	Mittausala	80mm	Mittausala	50mm
Voiman maksimi mittausvirhe	±3%	Voiman maksimi mittausvirhe	±3%	Maksimi mittausvirhe	Tietoja ei saatavilla kirjoittamishetkellä
Tarkkuus	±1%	Tarkkuus	±1%	Tarkkuus	
Muistin koko	100 yksittäistä mittausta	Muistin koko	100 yksittäistä mittausta	Muistin koko	
Virtalähde	Sisäiset akut	Virtalähde	Sisäiset akut	Virtalähde	
Liitettävyys	USB/Wifi	Liitettävyys	USB	Liitettävyys	
Suojausluokka	IP20	Suojausluokka	IP20	Suojausluokka	
Paino	noin 790g	Paino	1400g	Paino	
Paineenmittaus skannaamalla		Paineenmittaus skannaamalla			
Tarkkuus	±10% maksimi	Tarkkuus	±10% maksimi		
Käyttölämpötila	20-30 °C	Käyttölämpötila	20-30 °C		
Filmin mittausala LLW	50-250 N/cm2	Filmin mittausala LLW	50-250 N/cm2		
Filmin mittausala LW	250-1000 N/cm2	Filmin mittausala LW	250-1000 N/cm2		