



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

YHTEISTOIMINTAROBOTTIEN TURVALLISUUS

Oskari Virtanen

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2019

TIIVISTELMÄ

Yhteistoimintarobottien turvallisuus

Oskari Virtanen

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2019, 30 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Tässä kandidaatintyössä käsitellään yhteistoimintarobottien turvallisuutta. Työn tavoitteena on luoda katsaus yhteistoimintarobottien turvallisuuteen niiden suunnittelun, käytön ja kehityksen kautta. Työ suoritettiin pohjautumalla saatavilla oleviin standardeihin, tutkimustietoihin, manuaaleihin sekä Fab Lab Oulun laitteistoon. Työssä havaitaan yhteistoimintarobottien kehityksen olevan ajankohtainen ja nopeasti kehittyvä ala.

Asiasanat: 3D-tulostus, riski, turvallisuus, yhteistoimintarobotti

ABSTRACT

Safety of collaborative robots

Oskari Virtanen

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2019, 30 p.

Supervisor at the university: Yrjö Louhisalmi

This bachelor's thesis studies the safety of collaborative robots. The idea is to study safety related issues in designing and operating of collaborative robots. I try to find out how safety is guaranteed for operator and what is done to achieve it in first place. Risk assessment and reduction is also important part of the study. This thesis is based on available standards, manuals, research, studies and Fab Lab Oulu's machines. Collaborative robots are developing fast and now the area of technology is growing. Collaborative robots or "cobots" are getting safer and safer without greatly reducing their performance. In this bachelor's thesis I use Universal Robot UR3 as an example and compare it to the successor UR3e. I also give an example of how Formlabs Form 2 3D-printer could be operated with help of UR3.

Keywords: 3D-printing, Collaborative robot, risk assessment, safety

ALKUSANAT

Työn tarkoituksena on tutustua olemassa oleviin tapoihin tehdä yhteistoimintarobottien käytöstä turvallisempaa. Työ on tehty kevään ja kesän 2019 aikana kesätöiden ohella. Tahtoisin kiittää työn ohjaajaani Yrjö Louhisalmea Oulun yliopistolta neuvoista ja opastuksesta myös kesän aikana.

Oulu, 13.08.2019

Oskari Virtanen
Työn tekijä

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	7
2 YHTEISTOIMINTAROBOTTIEN TURVALLISUUS.....	8
2.1 Riskienhallinta ja analysointi	8
2.2 Yleistä robottien turvallisuudesta.....	13
2.3 Tutkimuksia turvallistamisesta.....	16
3 UNIVERSAL ROBOTS	18
3.1 UR3-yhteistoimintarobotti ja Universal Robotsin käyttökohteita.....	19
4 CASE: UR3 APUNA 3D-TULOSTUKSESSA.....	23
4.1 Ohjelma ja laitteisto	23
4.2 Turvallistaminen	26
5 YHTEENVETO	28
6 LÄHDELUETTELO.....	29

TERMIT JA MÄÄRITELMÄT

valvoton pysäytys

”koneen liikkeen pysäyttäminen säilyttäen tehosyötöt koneen toimilaitteille pysäytystapahtuman ajan.” [SFS-EN 60204-1:2018 s.17]

valvottu pysäytys

”koneen liikkeen pysäyttäminen poistamalla sähköinen teho koneen toimilaitteilta.” [SFS-EN 60204-1:2018 s.21]

yhteistoimintarobotti

”robotti, joka on suunniteltu suoraan vuorovaikutukseen ihmisen kanssa määritetyssä yhteistyötilassa.” [SFS-EN ISO 10218-2:2011 s. 8]

yhteistyötila

”turvalaitteen suojaamassa tilassa oleva työtila, jossa robotti ja ihminen voivat suorittaa tehtäviä samanaikaisesti tuotantotehtävien aikana.” [SFS-EN ISO 10218-2:2011 s. 8]

integraattori

”taho, joka suunnittelee, toimittaa, valmistaa tai kokoonpanee robottijärjestelmän tai valmistusjärjestelmän koneyhdistelmän ja on vastuussa turvallisuusstrategiasta, johon kuuluu ohjausjärjestelmän suojaustoimenpiteet, valvonnan rajapinnat ja kytkennät” [SFS-EN ISO 10218-2:2011 s. 9]

kelpuus

”tutkimalla kohdetta ja hankkimalla objektiivista näyttöä vahvistetaan, että määrätyt vaatimukset käyttötarkoitukselle on täytetty” [SFS-EN ISO 10218-2:2011 s. 10]

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on käsitellä yhteistoimintarobottien turvallisuutta. Aihe valikoitui yhteistoimintarobottien kehityksen ajankohtaisuuden ja niiden turvallisuuden kehittämisen tärkeyden vuoksi. Turvallisuuteen kuuluu oleellisena osana myös riskienarviointi sekä -hallinta, joten tätä aihetta käsitellään myös. Työssä tutustutaan standardeihin, jotka määrittelevät yhteistoimintarobotin käsitettä. Lisäksi työssä käytetään apuna tutkimustuloksia, manuaaleja sekä Fab Lab Oulun laitteistoa.

Yhteistoimintarobotteja ja niiden kehitystä tutkitaan esimerkin avulla, jossa vertaillaan Universal Robotsin valmistamaa UR3:a ja kyseisen yhteistoimintarobotin seuraajaa UR3e:tä. Työssä esitetään myös lyhyesti Universal Robotsin perustaminen ja kehitys. Työssä tutkitaan kuinka yhteistoimintarobotin turvallinen toiminta taataan alentamatta merkittävästi suorituskykyä. Yhteistoimintarobottien kehitys ja niiden turvallisuus on tärkeä osa-alue kehitettäessä uusia sovelluksia yhteistoimintaroboteille. Aihetta käsitellään esittämällä esimerkkejä jo valmiista ja käyttökelpoisista robottisovellutuksista sekä suunnitelma UR3:n käyttämisestä avuksi 3D-tulostuksessa Fab Lab Oulussa.

2 YHTEISTOIMINTAROBOTTIEN TURVALLISUUS

2.1 Riskienhallinta ja analysointi

Mahdollisten vaaranaiheuttajien tunnistaminen riskien analysoinnissa on luonnollisesti tärkeää. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty vaaran aiheuttajia ja niistä johtuvia seurauksia.

Taulukko 1. Mekaanisia vaaran aiheuttajia ja niiden seurauksia [ISO 10218-1 s. 48-50]

Vaaran aiheuttaja	Esimerkkejä seurauksista
-robotin käsivarren osan liike/pyöriminen	-puristuminen -viilto
-robotin työkalun liike/pyöriminen	-isku
-ulkoisten akseleiden liike	-lävistyminen
-robotin vikaantuminen	-pistäminen
-huollon aikana tapahtuva liike	-hankaumat
-materiaalin irtoaminen	-hiertymät
-vaatetus	-suurpainenesteen/kaasun aiheuttamat vammat
-potentiaalienergian vapautuminen hallitsemattomasti	-takertuminen

Taulukko 2. Muita vaaran aiheuttajia [ISO 10218-1 s. 50-52]

Tyyppi	Vaaran aiheuttaja	Esimerkkejä seurauksista
Sähköstä aiheutuvat vaarat	-jännitteiset osat ja liitokset -järjestelmässä tapahtunut sekaannus -valokaari -korkeajännitteiset sovellukset	-sähköshokki -palovamma -silmävamma
Lämpötilasta aiheutuvat vaarat	-kuumat pinnat työkalussa, liitetyissä laitteissa tai työkappaleessa -kylmät pinnat ja kappaleet -prosessin aiheuttama räjähdysvaarallinen tila -myrkylliset höyryt	-palovammat -tulipalo -räjähdys -myrkytys
Melu	-sekavuus -kommunikoinnin hankaloituminen -hälytysäänten huomioon hankaloituminen -korkealle melutasolle altistuminen	-kuulon menetys -tasapainon menetys -epätietoisuutta ympäristöstä

Taulukoissa esitettyjen vaarojen lisäksi vaaroja voi aiheutua myös tärinästä, säteilystä, käytetyistä materiaaleista ja aineista, huonosta ergonomiasta, käyttöympäristöstä sekä näiden vaaratekijöiden yhdistelmistä. Tärinä voi johtaa esimerkiksi liitosten löystymiseen ja näin aiheuttaa vakaviakin seurauksia osan irrotessa tai robotin pysähtyessä. Robotin käyttäminen tehtävässä, joka aiheuttaa säteilyä, esimerkiksi hitsaamisessa, voi johtaa palovammoihin ihmisen ollessa lähietäisyydellä ilman asianmukaisia suojaamia. Robotin huollon aikana vaihdettaessa esimerkiksi jäähdytys- tai prosessinesteitä, käyttäjä voi

altistua myrkyllisille aineille. Huonosta ergonomiasta, kuten esimerkiksi huonosti suunnitellusta valaistuksesta, sallintalaitteista tai työskentelypaikasta, johtuvat vaaratilanteet on myös otettava huomioon. Huono ergonomia voi aiheuttaa väsymystä sekä stressiä ja sitä kautta lisätä inhimillisiä virheitä. [ISO 10218-1 s. 50-52]

Työtehtävien tunnistaminen on oleellinen osa vaarojen tunnistamista. Integraattorin tehtävänä on robottisovelluksen käyttäjien sekä samassa tilassa työskentelevien henkilöiden työtehtävien tunnistaminen ja dokumentointi. Työtehtävistä koituvien suorien ja epäsuorien vaarallisten ja kohtuudella ennakoitavissa olevien tilanteiden tunnistamiseksi robottijärjestelmän käyttäjiä on konsultoitava. Vaaraa aiheuttavia työtehtäviä ovat esimerkiksi prosessin ohjaukseen ja valvontaan liittyvät tehtävät, työkappaleen asettaminen robotille saatavaksi, ohjelmointi ja todentaminen sekä vianetsintä ja kunnossapito. Näiden lisäksi tunnistettavia työtehtäviä ovat virhetoimintojen korjaus, robotin tai työtilan puhdistus, asetustyöt sekä käyttäjän suorittamat käsityövaiheet, joiden suorittamiseen ei vaadita laitteiden purkua. [SFS-EN ISO 10218-2:2011 s.14]

Riskien arviointi ja riskien pienentämisprosessi on suoritettava erikseen jokaiselle työtehtävälle ja niissä esiintyvillä vaaroilla. Tämä iteratiivinen pienentämisprosessi suoritetaan ensimmäisenä toimenpiteenä ja se alkaa koneen raja-arvojen määrittelemisellä. Raja-arvojen määrittäminen käsittää käyttörajojen, tilarajojen ja aikarajojen sekä muiden tekijöiden, kuten esimerkiksi materiaalin ja ympäristön, asettamien rajojen määrittämisen. Tämän jälkeen edetään vaarojen tunnistamiseen, jossa käydään läpi ihmisen ja laitteen vuorovaikutustilanteet laitteen elinkaaren eri vaiheissa, laitteen toimintatilat sekä laitteen mahdollinen odottamaton käyttötapa. Vaarojen tunnistamiseen kuuluu oleellisesti käydä läpi taulukoissa 1 ja 2 esitetyt vaarat ja vaaranaiheuttajat. Vaarojen tunnistamisen jälkeen riskien hallintaprosessissa siirrytään tunnistettujen vaarojen aiheuttamien riskien suuruuden arviointiin. Riskin suuruus määräytyy vahingon esiintymistodennäköisyyden sekä vahinkojen aiheuttamien seurausten vakavuuden mukaan. [SFS-EN ISO 12100 s. 42]

Riski on sitä merkittävämpi, mitä vakavampi seuraus ja suurempi esiintymistodennäköisyys vahingolla on. Vahingosta aiheutuvien vammojen vakavuus

sekä vahingon kohteeksi joutuneiden henkilöiden lukumäärä vaikuttavat vahingon vakavuuteen. Vahinkojen esiintymisen todennäköisyys määräytyy henkilöiden vaaroille altistumisen määrästä, vaaroja aiheuttavien tapahtumien esiintymistaajuudesta sekä vahingon välttämisen mahdollisuuksista. Hyvä ammattitaito ja tietoisuus riskistä pienentävät todennäköisyyttä. Kun riskin suuruus on arvioitu, tulee seuraavaksi tutkia riskin merkittävyyttä. Merkittävyyden perusteella päätetään, tuleeko ryhtyä toimenpiteisiin riskin pienentämiseksi. [SFS-EN ISO 12100 s. 36-40]

Mikäli riskit ovat liian suuria, on riskin osatekijöitä pienennettävä tai vaara poistettava. Riskin pienentämiseen käytettävät suojaustoimenpiteet on toteutettava ”kolmen askeleen menetelmällä”. Ensimmäisellä askeleella riskejä pienennetään luontaisesti turvallisella suunnittelulla. Tässä tärkeimmässä askeleessa koneen rakenneominaisuuksien sekä koneen ja ihmisen vuorovaikutustavan sopiva valinta pienentää riskiä. Luontaisesti turvalliseen suunnitteluun kuuluu geometrinen tekijöiden ja fyysisten näkökohtien huomioimisen lisäksi muun muassa kunnossapidettävyyden, sähköstä, pneumatiikasta tai hydraulikasta aiheutuvien vaarojen huomiointi, teknologian valinta ja kriittisten komponenttien tutkiminen ja niiden riittävyyden ja luotettavuuden varmistaminen. Luontaisesti turvallisten suunnittelutoimenpiteiden soveltamisella ohjauksjärjestelmissä pyritään estämään laitteen hallitsemattomat liikkeet ja arvaamattomat koneen käynnistymiset. Turvallisuudelle tärkeitä komponentteja voi olla hyvä lisätä laitteeseen myös ylimääräisiä siltä varalta, että joku niistä vikaantuu. Käytettäessä komponentteja, joiden kulumistapa tunnetaan, voidaan kyseisten komponenttien vikaantuminen ennakoita ja näin pienentää siitä koituvaa riskiä. Ensimmäisen askeleen suojaustoimenpiteet siis vaikuttavat todennäköisesti jatkuvasti läpi laitteen käyttöiän. [SFS-EN ISO 12100 s. 52-74]

Toisella askeleella riskiin, johon ei voida soveltaa ensimmäisen askeleen toimenpiteitä, pyritään vaikuttamaan suojausteknisillä ja täydentävillä suojaustoimenpiteillä (SFS-EN ISO 12100 s. 52). Toisen askeleen toimenpiteitä ovat turvalaitteiden, suojusten ja erilaisten rajoittimien, kuten esimerkiksi nopeuden-, kulman tai voimanrajoittimien, valinta sekä soveltaminen. Toisessa askeleessa määritetään myös vaatimukset suojuksille ja turvalaitteille. Vaatimusten lisäksi toisessa askeleessa käsitellään melun, värinän, säteilyn sekä vaarallisten aineiden aiheuttamia toimenpiteitä. Lisäksi käsitellään

täydentäviä suojaustoimenpiteitä, johon kuuluvat esimerkiksi koneen hätäpysäytyksessä käytettävät komponentit, pelastus- ja irrotustehtävissä ja koneen energian erotuksessa käytettävät toimenpiteet. Painavien ja hankalasti kuljetettavien osien kuljetukseen liittyvät komponentit käydään myös läpi toisessa askeleessa. Toisin kuin ensimmäisen askeleen suojaustoimenpiteet, toisen askeleen suojaustekniset laitteet voivat vikaantua ja rikkoutua tai niiden käyttöä voidaan laiminlyödä. [SFS-EN ISO 12100 s. 74-94]

Kolmannella askeleella puututaan niihin jäännösriskeihin, joihin ei voitu vaikuttaa kahdella ensimmäisellä askeleella. Kolmas askel käsittelee käyttöä koskevia tietoja. Tietoihin kuuluu vähintään koneen käyttöön liittyvät koneenkäyttäjien kykyihin suhteutetut toimintamenettelyt, turvalliset työmenetelmät ja koulutusvaatimukset, tietoa koneesta ja mahdollisista jäännösriskeistä sekä suositeltujen henkilönsuojaimien kuvaus. Tällä askeleella käydään läpi mitä laitteen mukana toimitettavissa asiakirjoissa ja ohjeissa on, sekä mistä käyttäjä löytää tarpeelliset tiedot. Kolmanteen askeleeseen lukeutuu myös varoituslaitteet, merkit, kyltit ja varoitustekstit. Kolmannen askeleen antamat käyttöä koskevat tiedot eivät kuitenkaan korvaa kahden ensimmäisen askeleen kuvaamien toimenpiteiden noudattamista. [SFS-EN ISO 12100 s. 94-102]

Vaaran aiheuttaman riskin pienentämisen jälkeen tarkistetaan, riippuuko käytetty suojaustoimenpide ohjausjärjestelmästä. Mikäli suojaustoimenpide riippuu ohjausjärjestelmästä, täytyy suorittaa turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmän osien suunnittelun iteratiivinen prosessi. Prosessiin kuuluu suunniteltujen turvatoimintojen tunnistaminen ja niiltä vaadittavien ominaisuuksien määrittely. Tämän jälkeen jokaiselle turvatoiminnolle määritetään vaadittava suoritustaso, minkä jälkeen turvatoiminto suunnitellaan ja toteutetaan teknisesti. Tämän jälkeen arvioidaan saavutettu suoritustaso, johon vaikuttaa luokat, jotka ilmaisevat osalta vaadittavan käyttäytymisen suhteessa sen vikasietoisuuteen. Lisäksi suoritustasoon vaikuttavat vaarallinen keskimääräinen vikaantumisaika, diagnostiikan kattavuus, yhteisvikaantuminen, systemaattinen vikaantuminen ja mahdolliset edellä mainittujen turvallisuuteen liittyvien osien ohjelmistot. Saavutettua suoritustasoa verrataan vaadittuun suoritustasoon ja mikäli vaadittua suoritustasoa ei saavutettu, on suunniteltava uusi turvatoiminto. Jos kuitenkin vaadittu suoritustaso saavutetaan, on tutkittava, kelpuutetaanko turvatoiminnon ohjausjärjestelmän osien yhdistelmä. Ohjausjärjestelmän osien yhdistelmä voidaan

kelpuuttaa, mikäli se toteuttaa standardissa ISO 13849 määritellyt vaatimukset. Lisäksi kelpuutukseen liittyviä yksityiskohtia löytyy standardista ISO 13849-2. Kun kaikki turvatoiminnot on järjestelmällisesti analysoitu, voidaan siirtyä tutkimaan muita vaaroja. Kun aiheutuva riski on pienennetty hyväksyttävälle tasolle, voidaan todeta laitteen olevan riittävän turvallinen, jolloin suoritetaan lopullinen dokumentointi. [SFS-EN ISO 13849-1 s.30]

2.2 Yleistä robottien turvallisuudesta

Yhteistoimintaan suunnitellun robotin on täytettävä standardien mukaiset vaatimukset, jotta sitä voidaan käsitellä yhteistoimintarobottina. On hyvä muistaa, että standardeissa esitetyt vaatimukset ovat vain vähimmäisvaatimuksia. Näitä myös seuraavaksi läpikäytäviä vaatimuksia esitetään ISO 10218 standardin osissa 1 ja 2. ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices - Collaborative robots on ISO 10218 standardia täydentävä tekninen spesifikaatio, joka myös tarkentaa yhteistoimintaan suunnitellun teollisuusrobottijärjestelmän ja sen työympäristöön liittyviä turvallisuusvaatimuksia.

Robotin liikkeen pysäyttämiseen käytetään erilaisia keinoja, jotka jaetaan kolmeen eri pysäytysluokkaan sen perusteella mistä kaikkialta teho poistetaan. Pysäytysluokat ja niiden erot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Pysäytysluokat [SFS-EN 60204-1:2018 s. 46]

	Pysäytys	Tehonsyöttö
Pysäytysluokka 0	valvoton	Keskeytetään välittömästi
Pysäytysluokka 1	valvottu	Keskeytetään pysäytystapahtuman jälkeen
Pysäytysluokka 2	valvottu	Säilytetään toimilaitteille

Robotin on reagoitava ihmisen ollessa samassa tilassa, jossa robotin ja ihmisen on määrä työskennellä samaan aikaan. Robotissa on oltava vähintään yksi seuraavista ominaisuuksista: turvaluokiteltu valvottu pysäytys, käsin ohjaaminen, nopeuden ja vähimmäisetäisyyksien valvonta tai tehon ja voiman rajoittaminen luontaisesti turvallisella suunnittelulla tai ohjauksella. [ISO 10218-1 s.36]

Ihmisen tullessa yhteiseen työtilaan robotin kanssa, jossa on turvaluokiteltu valvottu pysäytys, on robotin joko pysähdyttävä kokonaan tai sitten sen on hidastettava nopeutta ja pysähdyttävä katkaisematta käyttövoimaa. Mikäli pysäytystoiminto vikaantuu, on robotin välittömästi pysähdyttävä ja poistettava teho koneen toimilaitteilta. Vasta ihmisen poistuttua yhteisestä työtilasta saa robotti jatkaa automaattista toimintaa. [ISO 10218-1 s.36]

Käsin ohjattavassa robotissa ohjauslaitteiston on oltava lähellä robotin työkalua. Robotissa tulee myös olla hätäpysäytin ja sallintalaite. Hätäpysäytyksen on oltava standardien mukainen toiminto, joka pysäyttää robotin siten, ettei robotti enää pysäytyksen jälkeen reagoi muualta tuleviin ohjaukskäskyihin ennen kuin pysäytys on kuitattu käsin. Kuittauksen ei tule käynnistää robottia uudelleen, vaan pelkästään sallia uudelleen käynnistys. Hätäpysäytyksen aktivoiduttua robotin toimilaitteilta poistuu käyttövoima riskien ja vaarojen hallinnan varmistamiseksi. Sallintalaite on kolmiasentoinen erillinen laite, joka voi olla esimerkiksi yhdellä kädellä puristettava. Asennossa 1 ohjainta ei käytetä eikä robotin liikkeitä tällöin sallita, asennossa 2 eli keskiasennossa ollessa laite sallii robotin liikkeen ja kun sallintalaite on asennossa 3, niin se estää robotin liikkeen. Sallintalaitteita voi olla useampia, jolloin jokaisen sallintalaitteen on oltava asennossa 2, jotta robotin liikkeitä sallitaan. Sallintalaitteen on toimittava riippumatta muista ohjauslaitteista tai -toiminnoista. Sallintalaitteella pysäytetty robotti ei saa aiheuttaa vaaraa käyttäjälle eikä se saa lähteä liikkeelle ennen kuin sallintalaite on käytetty asennossa 1. [ISO 10218-1 s.36]

Kolmiasentoisen sallintalaitteen toimintaperiaate perustuu siis siihen, että robotin liikkeitä sallitaan vain koskettimien koskettaessa toisiaan. Sallintalaitteen ollessa asennossa 1 koskettimet ovat näin ollen irti toisistaan. Kun sallintalaitetta puristetaan kevyesti, koskettimet menevät yhteen ja sallinta laite menee asentoon 2. Puristettaessa pohjaan

saakka koskettimet irtoavat toisistaan ja sallintalaite menee asentoon 3. [ISO 10218-1 s.62]

Robottiin, jossa on vähimmäisetäisyyden ja nopeuden valvonta, määritetään vähimmäisetäisyys samassa tilassa työskentelevästä ihmisestä sekä nopeus, joita sen on tarkkailtava ja tarvittaessa suoritettava suojapysäytys. Suojapysäytys on suoritettava, mikäli ihminen tulee määritetyn vähimmäisetäisyyden päähän robotista, määritetyn nopeuden ylläpito estyy tai vähimmäisetäisyyden tai nopeuden valvonnassa ilmenee häiriö. Nopeus ja etäisyys toteutetaan joko yhdistelemällä ulkoisia sisääntuloja tai kiinteillä osilla. Riskien arviointi ja hallinta on tärkeää tämänkaltaisissa roboteissa, joten tarkat tiedot laitteen nopeudesta ja vähimmäisetäisyydestä on oltava toiminnon suunnitteluvaiheessa tarkkaan harkittuja sekä käyttäjän tiedossa. Laitteille voidaan itse asettaa arvot nopeudelle ja etäisyydelle, jolloin laitteen ohjeissa on oltava kyseiselle laitteelle suositellut arvot sekä ohjeet niiden asettamiseen. Kun määritellään vähimmäisetäisyyttä, on otettava huomioon myös käyttäjän liike suhteessa robottiin. [ISO 10218-1 s.36]

Robotissa, jonka tehoa ja voimaa on rajoitettu luontaisesti turvallisella suunnittelulla tai ohjauksella, on oltava määritetty rajat, joita teho tai voima eivät saa ylittää. Tehon tai voiman ylittyessä robotin on turvallisen yhteistoiminnan takaamiseksi pysähdyttävä automaattisesti suojauspysäytyksellä. Suojauspysäytyksellä pienennetään riskejä, joita liiallinen teho tai voima voisivat kohdistaa niin laitteille kuin käyttäjälle. Toimenpiteet ohjattavan robotin tehon ja voiman rajoittamiseksi on esitettävä ohjeissa. [ISO 10218-1 s.36]

On otettava huomioon, että robotin turvallisuus ei yksinään riitä takaamaan yhteistoiminnan turvallisuutta. Kuten käytettäessä vähimmäisetäisyyttä ja nopeutta valvovia robotteja yhteistoiminnassa ihmisen kanssa, myös tehoa ja voimaa rajoittavia robotteja käytettäessä on suoritettava riskin arviointi jo toiminnon suunnittelun aikana hyväksyttävän pienen riskin aikaansaamiseksi. [ISO 10218-1 s.36]

2.3 Tutkimuksia turvallisesta

Robottien yhteistoimintasovellusten turvallisuutta on tutkittu paljon hyvällä menestyksellä. Collaborative Work Between Human And Industrial Robot In Manufacturing By Advanced Safety Monitoring System -artikkelissa ROS:ssa eli Robot Operating Systemsissä simuloitu teollisuusrobotti saatiin pysähtymään sen havaittua ohjelmoidusta poikkeavan objektin sen kulkureitillä ja jatkamaan automaattisesti objektin poistuttua sensorin mittausalueelta. Robotti siis reagoi muuttuviin olosuhteisiin. Tämä saatiin toteutettua tavanomaisella ohjelmoinnilla eli OLP:llä luotua ohjelmaa käyttämällä mutta soveltamalla eri tekniikkaa kuin tavallisesti. OLP eli offline programming tarkoittaa yleensä käytännössä sitä, että ohjelma, jonka robotin on määrä suorittaa, simuloidaan tietokoneella tai valmistajan ohjelmistolla, minkä jälkeen se ladataan robotin ohjausyksikön muistiin. Ohjelmaa myöhemmin käytettäessä se ladataan RAM-muistiin. Nyt ohjelma kuitenkin ladattiin ROS:iin, joka toimii erillisenä ohjaustyökaluna. [Kuts, V., Sarkans, M., Otto, T. & Tahemaa, T. 2017: 996-998]

Tämä toimintatapa mahdollistaa prosessin monitoroinnin ja ohjaamisen, ohjelman joustavan muokkaamisen sekä päätöksenteon automatisoinnin robotille. Lisäksi kameran avulla voidaan ohjelmoida robotti tekemään muutoksia jo ohjelmoituun reittiin. Tässä tutkimuksessa saatiin lisättyä tekoälyä käyttämällä lisätekiötä, joka määritteli eri kohtien turvallisuusasteen anturoinnin ja kameran avulla. Turvallisuusaste määriteltiin 1-10 asteikolla siten, että mitä korkeampi arvo kohdan turvallisuusasteella oli, sitä turvallisempi kohta oli. Koodiin lisättiin robotille ohjeita, miten toimia erillisillä turvallisuusasteen arvoilla. Mahdolliset toimenpiteet olivat virran sammutus, siirtyminen lepotilaan, reitin muuttaminen tai kyseiselle alueelle sijoittuvan tehtävän välistä jättäminen. Turvallisuusastetta päivitettiin 0,01 s välein. Turvallisuusaste laski sen perusteella, kuinka lähellä robottia lähellä se alue, missä ohjelmaan kuulumaton objekti on sekä kuinka pitkään objekti pysyi kyseisellä alueella. Robotti ohjelmoitiin reagoimaan objektin poistumiseen, eli turvallisuusasteen nousuun, joko jatkamalla kyseistä toimintaa tai palaamaan suorittamattomaan vaiheeseen. Seuraavalla kierroksella robotin muistiin jäi paikka, missä turvallisuusaste oli alentunut ja se lähestyi kyseistä aluetta varovaisemmin kuin muita alueita. [Kuts, V., Sarkans, M., Otto, T. & Tahemaa, T. 2017: 999-999]

Milanossa tehty tutkimus (Zanchettin, A.M., Rocco, P., Chiappa, S. & Rossi, R. (2019)) käsittelee tekniikkaa, jolla pyritään välttämään törmäys käyttäjän ja yhteistoimintarobottin välillä pysäyttämättä kuitenkaan robottia. Tutkimus suoritettiin käyttämällä Universal Robotsin valmistamaa UR5-yhteistoimintarobottia, johon on kytketty syvyyskamera. Tutkimuksen tuloksena saatiin luotua väistämistä strategia, joka optimoi liikkeen keston sekä välttää törmäyksen käyttämällä hyväksi antureilta saatua dataa. Robottiin lisätään algoritmi, joka laskee väistöliikkeen tarpeen, minkä jälkeen se arvioi mikä on optimaalisin paikka väistää törmäys ja lopulta lähettää kyseisen paikan tiedot ohjausyksikköön. Tämä sykli kestää noin 30 ms ja sitä toistetaan myös 30 ms välein. [Zanchettin, A.M., Rocco, P., Chiappa, S. & Rossi, R. 2019: 47-55]

Näiden kahden edellä esitetyn tutkimuksen tuloksia hyödyntämällä robotista saadaan siis samalla sekä tehokkaampi että turvallisempi. Näiden tutkimusten perusteella rakennetussa sovelluksessa huomioidaan myös yllättävät liikkeet ja se tekee sovelluksesta myös turvallisemman käyttää kokemattomille käyttäjille ja esimerkiksi lapsille. Yhteistoimintarobottien ja erilaisten soveltamistekniikoiden nopea kehittyminen luo uusia tapoja tehdä yhteistoimintarobottisovelluksista yhä turvallisempia, tehokkaampia ja käyttäjäystävällisempiä.

3 UNIVERSAL ROBOTS

Universal Robots A/S on tanskalainen vuonna 2005 perustettu yritys, jonka tavoitteena oli mahdollistaa robottitekniikan käyttö myös pienissä ja keskisuurissa yrityksissä. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Odensessa Tanskassa. Idea yrityksen perustamisesta syntyi, kun yrityksen perustajat Esben Østergaard, Kasper Støy, ja Kristian Kassow tutkivat vuonna 2003 minkälaisia erityisvaatimuksia elintarviketeollisuuden roboteilla on. He keksivät alkaa tarjoamaan käyttäjäystävällisempää vaihtoehtoa raskaille ja kalliille roboteille. Idea oli siis kehittää kevyt ja helppokäyttöinen robotti vastaamaan kysyntää. [Universal Robots (2019) About Universal Robots]

Universal Robotsin ensimmäinen myyntiin tullut tuote oli 18 kg painoinen UR5-yhteistoimintarobotti, jonka hyötykuorma on 5 kg ja ulottuvuus 850 mm. Suurempaa nostokapasiteettia ja ulottuvuutta vaativia tehtäviä varten kehitettiin vuonna 2012 markkinoille tullut UR10, jonka hyötykuorma on 10 kg ja ulottuvuus 1300 mm. Vuonna 2015 julkaistiin messuilla Kiinassa, Yhdysvalloissa ja Saksassa Universal Robotsin sen hetken mukautuvim ja kevyin robotti UR3, jonka hyötykuorma on 3 kg ja ulottuvuus 500 mm. [Universal Robots (2019) About Universal Robots]

Universal Robots julkisti vuonna 2018 Münchenissä Automatica-messuilla e-sarjan, joka pohjautuu UR3, UR5 ja UR10 yhteistoimintarobotteihin. E-sarjan robottien nimet ovatkin UR3e, UR5e ja UR10e. Näissä e-sarjan roboteissa on 17 säädettävää turvallisuustoimintoa siinä missä vanhemmissa malleissa niitä on 15. [Universal Robots 2019. UNIVERSAL ROBOT UR3. Manual] Sekä vanhat että e-sarjan yhteistoimintarobottien turvallisuustoiminnot ovat TÜV NORD sertifioituja. Vanhemmat on sertifioitu suoritustasolle EN ISO 13849:2008 PL d [Universal Robots 2019. UNIVERSAL ROBOT UR3. Manual.] ja täysin EN ISO 10218-1 standardia noudattavat e-sarjalaiset on sertifioitu suoritustasolle EN ISO 13849-1, Cat.3, PL d. [Universal Robots (2019) Universal Robots E-series]

Vertaillen UR3:n ja UR3e:n teknisiä tietoja havaitaan, että uusiin standardeihin mukaistamisen ja turvallisuustoimintojen lisäämisen lisäksi UR3e:n toistotarkkuus on parantunut ja siitä aiheutunut ääni on pienentynyt. UR3e tuottaa vain 60 dB äänen, mikä

on 10 dB hiljaisempi kuin edeltäjänsä. UR3e:ssä on myös valmiiksi asennettuna F/T anturi, eli voima/vääntömomentti anturi. UR3e:n toistotarkkuus on erittäin hyvä, manuaali antaa toistotarkkuudeksi $\pm 0,03$ mm. [Universal Robots (2019) Universal Robots E-series; Universal Robots (2019) Universal Robot UR3. Manual. s. I-67]

3.1 UR3-yhteistoimintarobotti ja Universal Robotsin käyttökohteita

UR3:ssa on kuusi vapausastetta eli kuusi kääntyvää niveltä. Nivelet on nimetty alimmasta nivelestä tарттуjaa kohti lueteltuna: Base, Shoulder, Elbow, Wrist 1, Wrist 2 ja Wrist 3. Pohjasta toiseksi viimeiseen niveleeseen kaikki viisi niveltä voivat keskiasennostaan kääntyä 360° sekä myötäpäivään että vastapäivään. Viimeiselle nivelelle, Wrist 3, ei ole asetettu kääntymisrajoitusta. Ensimmäiset kolme niveltä Base, Shoulder ja Elbow voivat kääntyä maksimissaan $180^\circ/s$ ja viimeiset kolme maksimissaan $360^\circ/s$. UR3:n toistotarkkuus on $\pm 0,1$ mm. [Universal Robots (2019) Universal Robot UR3. Manual. s. I-67]

UR3:ssa on 15 kappaletta turvatoimintoja, jotka on nimetty juoksevilla numeroinnilla ja Safety Function (SF) etuliitteellä eli SF0-SF15. Turvatoiminnot jakaantuvat robottikäden, nivelten, työkalupisteen (Tool Center Point, TCP) ja ulkoisten laitteiden liittämissä välille. Turvatoiminnot SF0 ja SF1 ovat molemmat erillisiä robottikäden hätäpysäytyksiä. SF2 on robottikäden suojauspysäytys. SF3 rajoittaa nivelten asentoa, SF4 nivelten nopeutta ja SF5 nivelten vääntöä. SF6 rajoittaa TCP:n paikkaa ja asentoa. SF7 rajoittaa TCP:n nopeutta ja SF8 TCP:n voimaa. SF9 rajoittaa robottikäden liikemäärää ja SF10 robottikäden tehoa. SF11 liittyy UR Robot Estopin aiheuttamaan tilaan, SF12 ja SF13 liittyvät UR 3:n liikkumisen ja pysähtymisen aiheuttamiin tiloihin ja SF14 ja SF15 liittyvät UR Robot Reduced Mode:sta aiheutuvaan tilaan. Kaikki turvatoiminnot ovat TÜV NORD sertifioituja. [Universal Robots 2019. Table 1: Safety Function Descriptions]

Viasta tai turvallisuustoimintojen vastaisesta toiminnosta johtuvaan pysähtymiseen menevä aika on määritelty käyttöohjeissa. Pysähtymisaika on määritelty suurimmalla eli 3 kg suuruisella kuormalla tietyllä TCP:n nopeudella robotin ollessa täysin ojentunut vaakatasossa. Pysähtymisaika nopeudella 1,0 m/s on 400 ms ja 1,5 m/s nopeudella 450 ms. [Universal Robots 2019. Universal Robot UR3. Manual. s. I-22]

UR3 on IP64-luokiteltu eli on täysin pölytiivis ja se on myös suojattu vesiroiskeilta. UR3:n käyttö puhdastiloissakin on mahdollista, sillä se on luokiteltu käytettäväksi myös ISO 14644-1 standardin mukaisesti puhdastilaluokkaan ISO 5 luokitelluissa tiloissa (Universal Robots (2019) News Centre). UR3-yhteistoimintarobotti on suunniteltu käytettäväksi 0-50°C lämpötilassa. Mikäli UR3:a käytetään siten, että laitteen nivelet pyörivät jatkuvasti suurella nopeudella, ympäröivän tilan sallittu maksimi lämpötila alenee. [Universal Robots (2019) Universal Robot UR3. Manual. s. I-67]

Universal Robots sertifioi robottinsa vapaaehtoisesti kolmannen osapuolen instituutioissa saksalaisessa TÜV NORD:ssa sekä tanskalaisessa DELTA:ssa. TÜV NORD on testannut UR3:n turvallisuuden ja myöntänyt UR3:lle sertifikaatin turvallisuudesta. DELTA:ssa testattiin UR3:n turvallisuus ja suorituskyky. DELTA myönsi UR3:lle ympäristösertifikaatin sekä sertifikaatin elektromagneettisesta yhteensopivuudesta (EMC). [Universal Robots (2019) Universal Robot UR3. Manual. s.I-49]

UR3 on suunniteltu ottaen huomioon eri standardisoiomisjärjestöjen useita eri standardeja. Suunnittelussa käytetyt koneturvallisuutta koskevat standardit käsittelevät turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien osien yleisien suunnittelu periaatteiden ja niiden kelpuuttamisen lisäksi hätäpysäytyksen yleisiä suunnitteluperiaatteita. Riskien arviointi ja pienentäminen on myös toteutettu koneturvallisuuteen liittyvien yleisten suunnitteluperiaatteiden standardin mukaisesti. Robotteihin ja robotiikkalaitteisiin liittyvät teollisuusrobottien turvallisuusvaatimukset on myös otettu huomioon suunnittelussa. UR3 on kuitenkin yhteistoimintaan suunniteltu robotti, jossa on standardin sisäänrakennettu ISO 10218-1 mukaisia tehoa ja voimaa rajoittavia toimintoja ja näin ollen se ei tarvitse ympärilleen suoja-aitaa. UR3:n jokaisessa nivelessä on ylimääräinen kulma-anturijärjestelmä, jotta alkuperäisen vikaantumisesta ei aiheudu vaaratilanteita. UR3:ssa ei ole välttämätöntä tarvetta kolmivaiheiselle sallintakytkimelle sillä se on suunniteltu siten, että sen voi pysäyttää kädellä. Sallintakytkin on kuitenkin asennettavissa UR3:een mikäli se katsotaan tarpeelliseksi. Edellä esitettyjen lisäksi on huomioitu muun muassa ohjaimiin, sähköturvallisuuteen, työkalunkiinnitykseen ja pintojen lämpötilaan kantaa ottavia standardeja. [Universal Robots (2019) Universal Robot UR3. Manual. s. I-55 – I-65]

UR3:n käyttökohteet ovat moninaiset ja se sopeutuukin erinomaisesti monien eri alojen automatisointiin. UR3:a käytetään laitteiden kokoamisen ja komponenttien asettamisen lisäksi muun muassa myös pakkaamiseen, kiillotukseen, maalaamiseen, hitsaukseen ja ruiskupuristukseen. Työkalun rajoittamaton kiertokulma mahdollistaa myös ruuvaamisen UR3:lla. Lisäämällä UR3:een konenäköä sitä voidaan käyttää myös esimerkiksi laadunvalvonnassa tekemällä tarkasteltaville kappaleille 3D-mittauksia. Tarkkuutta vaativissa laboratorioanalyysissä ja testauksessa on myös mahdollista käyttää UR3:a sen toistotarkkuuden ansiosta. CNC-koneiden käytössä UR3:a voidaan käyttää asettamaan koneistettava kappale koneeseen ja koneistamisen jälkeen ottamaan valmis kappale koneesta. [Universal Robots (2019) Collaborative Robots Applications]

Elintarvikealan lisäksi UR3:a ja muita Universal Robotsin tuotteita käytetään myös monilla muilla aloilla. Robottien uloin kuori on suunniteltu estämään pölyn ja roskien pääsy laitteen sisälle, mikä mahdollistaa robottien käytön useilla eri aloilla. Robotteja käytetään elektroniikkateollisuudessa muun muassa piirilevyjen valmistuksessa. Esimerkkinä Universal Robotsin tuotteita käyttävistä elektroniikkateollisuusalan yrityksistä toimii puolalainen Betacom, kanadalainen äänentoistolaitteita valmistava Paradigm Electronics ja kustomoitavia 3D-tuotteita valmistava yhdysvaltalainen Voodoo Manufacturing. Metallin ja konepajateollisuudessa UR:n robotteja käyttävät esimerkiksi ruotsalainen Leax Group ja yhdysvaltalainen Aircraft Tooling INC. Intialainen auto- ja moottoripyörävalmistaja Bajaj Auto, yhdysvaltalainen Comprehensive Logistics, saksalainen Lear sekä japanilainen Nissan Motor Company käyttävät myös osissa automaattioratkaisuistaan Universal Robotsin valmistamia yhteistoimintarobotteja. Näiden alojen lisäksi robotteja käytetään muun muassa lääketeollisuudessa esimerkiksi Gentoften sairaalassa Tanskassa sekä muoviteollisuudessa yhdysvaltalaisen Dynamic Groupin ja tanskalaisen Trelleborg Sealing Solutionsin toimesta. [Universal Robots (2019) Collaborative Robots Industries]

Universal Robotsin robottien käyttöä tukevat monet seikat. Yhteistoimintarobotit ovat helppokäyttöisiä eikä niiden käyttöönottoon kulu yhtä paljon aikaa, kuin esimerkiksi tavallisten teollisuusrobottien käyttöönotossa. Muita yhteistoimintarobotteihin investoimalla saatuja hyötyjä, jotka ovat osaltaan johtaneet yritysten kilpailukykyyn parantumiseen, ovat niiden nopea takaisinmaksuaika, henkilöstön tarpeen väheneminen

ja vapautuminen muihin tehtäviin sekä lähes keskeytyksettä jatkuva työskentely. Yhteistoimintarobotit kykenevät työskentelemään suojattuina olosuhteissa, joissa ihmiselle työskentely on tuskallista. Robotit voivat hoitaa yksitoikkoiset, epämukavat ja paljon toistoa vaativat tehtävät ihmistä tarkemmin ja nopeammin. Robottien käyttö räjähdysvaarallisissa tiloissa on myös mahdollista. Kylmissä ja kuumissa tiloissa yhteistoimintarobotit tarvitsevat riittävän suojauksen mutta niiden käyttö on silti mahdollista. Yhteistoimintarobottien käyttö on lyhentänyt tuotteiden valmistusaikaa ja ne ovat varmoja ja nopeita koneita käytettäväksi eri valmistuslinjoilla. Yhteistoimintarobotit ovat helpoksi tehdyn ohjelmoinnin ansiosta nopeasti mukautettavissa uusiin tehtäviin. Käytettäessä robotteja puhtastiloissa myös tuotteen kontaminoitumisen riski pienenee varmatoimisten ja hyvän toistotarkkuuden omaavien robottien ansiosta. Yhteistoimintarobottien käyttö on myös vähentänyt syntyvien jätteiden ja hävikin määrää eri aloilla. Robotit ovat kevyitä eivätkä ne vie paljon tilaa, mikä myös mahdollistaa niiden käytön ahtaissakin tiloissa. [Universal Robots (2019) Collaborative Robots Industries]

4 CASE: UR3 APUNA 3D-TULOSTUKSESSA

4.1 Ohjelma ja laitteisto

3D-tulostimen asettaminen toimintakuntoon koostuu muutamasta vaiheesta, jotka toistuvat ennen jokaista 3D-tulostusta. Nämä vaiheet voidaan automatisoida käyttämällä riittävällä toistotarkkuudella varustettua yhteistoimintarobottia. Käyttäjän täytyy itse kuitenkin valmistella tulostukseen tarvittavat materiaalit ja lopulta käynnistää tulostus, joten tilasta poistuminen ei ole järkevä vaihtoehto ja näin ollen yhteistoimintarobotti on perusteltu valinta tehtävään. Molempien kappaleessa 2 esitettyjen tutkimusten tekniikoista voidaan hyödyntää yhteistoimintaroboteissa ja ovat näin ollen myös kehittämisen arvoisia ideoita käytettäessä UR3:a apuna 3D-tulostuksessa. UR3 sekä 3D-tulostin ovat molemmat Fab Labissä, jossa voi olla paljonkin ihmisiä samaan aikaan, joten robotin reagoinnin tarpeellisuus ympäristön muuttuessa olisi perusteltua myös muiden tilankäyttäjien turvallisuuden kannalta.

Oulun yliopistolta löytyvä yhteistoimintarobotti UR3 soveltuu hyvin tähän esimerkkinä toimivaan tehtävään pienen koon ja mukautuvuuden ansiosta. Tulostimena käytetään myös Oulun yliopistolta löytyvää Formlabsin Form 2 -merkkistä 3D-tulosinta. Jatkossa siihen viitataan vain 3D-tulostimena. UR3 asetetaan 3D-tulostimen eteen etäisyydelle, josta se yltää suorittamaan sille seuraavaksi esitetyt tehtävät. UR3:n etäisyyden ja paikan on oltava jokaisella kerralla sama tässä ohjelmassa tarvittavien laitteiden ja työkalujen suhteen. Laitteiden tai työkalujen paikkaa ei saa muuttaa myöskään toistensa suhteen, jotta ohjelma toimisi oikein. Mikäli paikka ei ole sama, UR3 ei löydä tarvittavia objekteja eikä siis silloin saa suoritettua sitä tehtävää, johon se ohjelmoidaan.

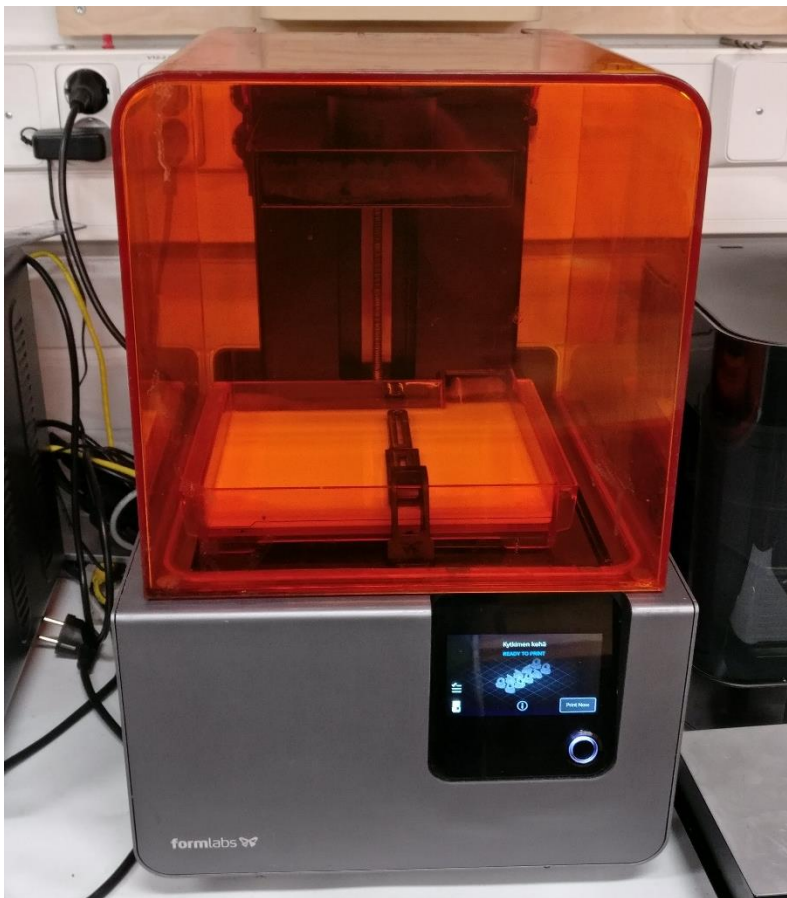


Kuva 1. UR3-yhteistoimintarobotti Oulun yliopistolla.

Kuvassa 1 näkyy esimerkissä käytettävä UR3. Se on monipuolisen hyödyntämisen mahdollistamiseksi ja vaivattomamman siirtelyn vuoksi kiinnitetty rullilla olevaan pöytään mutta se aiheuttaa ongelman muualla kuin pöydällä tapahtuvien tehtävien suorittamisessa. Pöydälle on merkittävä paikka, johon se asetetaan ja mahdollisesti liitettävä siihen kohtaan kiinnitysmekanismi, jolla estetään pöydän tahaton liikkuminen.

Tässä tapauksessa UR3:a käytetään apuna tulostuksen valmisteluun. Ohjelma alkaa siitä, että UR3 avaa 3D-tulostimen kannen ja ottaa tulostimen vierestä tulostukseen tarvittavan kannettoman hartsisäiliön. UR3 asettaa hartsisäiliön tulostimeen siten, että hartsiasian jalat menevät niille tarkoitettuihin reikiin ja sen jälkeen se työntää astian kunnolla paikoilleen. Tämän jälkeen UR3 ottaa tulostuksessa käytetyn pyyhkijän ja asettaa sen keskelle tulostinta sijoitettuun kiinnikkeeseen.

Kun hartsisäiliö ja pyyhkijä on nyt asetettu tulostimeen, seuraavaksi UR3 asettaa rakennusaluksen tulostimessa olevalle kannattimelle ja lukitsee sen kannattimen päällä olevalla kahvalla. Sitten UR3 sulkee tulostimen kannen ja ottaa valmiiksi valmistellun hartsikasetin ennalta määrätystä paikasta. UR3 asettaa kasetin paikalleen tulostimen takana olevaan reikään ja avaa venttiilihatun. Tämän jälkeen UR3 siirtyy takaisin aloitusasentoon. Nyt UR3 on asettanut 3D-tulostimen toimintavalmiiksi ja käyttäjä voi suorittaa tarkastuksen ja käynnistää tulostuksen.



Kuva 2. Formlabs Form 2 3D-tulostin Oulun yliopistolla.

Kuvassa 2 näkyy esimerkissä käytettävä Form 2 3D-tulostin sekä tulostimen takaosassa musta hartsikasetti ja sisällä hartsisäiliö sekä sen eteen sijoitettu pyyhkijä.

4.2 Turvallistaminen

Turvallisen robottisovelluksen luomiseen osallistuu useita eri tahoja laitteen valmistajasta alkaen aina sovelluksen käyttäjään saakka. Laitteen valmistaja vastaa laitteen turvallisesta suunnittelusta ja yleisestä käyttöturvallisuudesta. Käyttöönnotosta vastaava taho huolehtii puolestaan laitteen tarkastuksista ja huolloista, käyttäjien opastuksesta turvallisiin toimintatapoihin, laitteeseen tehtyjen mahdollisten muutosten turvallisuudesta sekä muista laitteen turvallisuuteen vaikuttavista asioista. Laitteen soveltuvuus tehtävän suorittamiseen on varmistettava ennen laitteen käyttöä. Käyttäjien tehtävä osana turvallistamista on seurata opastettuja turvallisia toimintatapoja ja ilmoittaa käyttöönottajalle, mikäli laite vioittuu tai käytön aikana havaitaan uusia riskitekijöitä. Turvallistettaessa laitetta ja sovellusta sille määritellään raja-arvot ja käyttötapa.

Riskien pienentämisen ”kolmen askeleen menetelmän” ensimmäinen askel on tämän esimerkin osalta alkanut jo valittaessa turvalliseksi varmistettuja laitteita. Ensimmäisessä askeleessa on myös varmistuttava laitteiden sopivuudesta kyseiseen sovellukseen. Otetaan huomioon siis vaaranpaikat, joissa ihmisen on osallistuttava tehtävään. Laitteiden sopivuus tilaan, jossa tehtävä suoritetaan, on myös varmistettu ihmisen käyttäessä sekä yhteistoimintarobottia että 3D-tulostinta erikseen jo aikaisemmin. Varmistetaan kuitenkin, että laitteet mahtuvat liikkumaan esteettä ja ettei ihminen voi jäädä missään ohjeidenmukaisesti suoritettussa tehtävän suoritusvaiheessa jumiin tilaan tai laitteisiin. Ennen laitteiden käyttöä on joka kerta varmistuttava niiden kunnosta ja tarvittaessa huollettava ne ennen niiden käyttöä.

Toisella askeleella tarkastellaan tehtävän turvalliseen suoritukseen tarvittavien laitteiden tarve ja täytetään puutteelliset tai mahdollisesti suorituskykyä heikentävät kohdat. 3D-tulostimen kansi riittää turvalliseen suoritukseen tulostusvaiheessa. UR3:n osalta voidaan joutua lisäämään laitteita, jotka parantavat turvallisuutta ja helpottavat sen käyttöä tässä kyseisessä sovelluksessa. Esimerkiksi hartsikasettia käsitellessä UR3 ei saa tehdä ihmiselle tai laitteille vaaraa aiheuttavia liikkeitä. On varmistuttava myös toisessa askeleessa lisättävien suojausteknisten laitteiden toimivuudesta osana sovellusta ennen kuin sovellusta voidaan käyttää käyttäjien toimesta.

Seuraavaksi suoritetaan kolmannen askeleen mukaiset toimenpiteet. Käyttäjille opastetaan laitteiden käyttö, työvaiheet ja niiden oikea suoritusjärjestys. Laaditaan myös kirjalliset ohjeet koskien sovelluksen suorittamista ja sovelluksessa käytettyjen laitteiden käyttöä. Ohjeet asetetaan sovelluksen käyttäjien saataville mahdollisuuksien mukaan laitteiden läheisyyteen. Merkitään alue, jossa UR3 on suunniteltu liikkuvaksi. Tarpeen vaatiessa asetetaan kuulumaan erilaiset merkkiäänät ohjelman käynnistyessä, keskeytyessä ja loppuessa. Merkitään kolmannen askeleen mukaisesti myös ne paikat, johon 3D-tulostin, UR3 sekä UR3:n tehtävän suorittamiseen vaatimat tarvikkeet laitetaan.

Tässä sovelluksessa on tarkkuutta vaativien asettamis- ja noukkimistoimintojen vuoksi tärkeää suorittaa liikkeet riittävän alhaisella nopeudella. Robottia ohjelmoitaessa ja ohjelmaa testattaessa on noudatettava varovaisuutta esimerkiksi mahdollisten äkkinäisten liikkeiden vuoksi. Yhteistoimintarobottina UR3 on itsessään turvallinen laite mutta on huomioitava ohjelman ja muiden laitteiden turvallisuus yhteistoimintasovellukselle. Ohjelmaa suunnitellessa on käytettävä riskien hallinnan ja pienentämisen keinoja. On tunnistettava mahdolliset vaaranaiheuttajat ja työvaiheet. Turvallisuuden takaamiseksi jokaiselle sovellusta käyttävälle henkilölle on opastettava oikeat työtavat ja työvaiheiden kulku. Työvaiheiden lisäksi käyttäjän on tunnettava käytettävä laitteisto sekä tiedostettava käytettävän materiaalin vaatima suojaus, mikä tässä tapauksessa tarkoittaa suojakäsineitä käsiteltäessä nestemäistä hartsia. Tässä sovelluksessa robotilta vaadittava teho ja voima on hyvin pientä. Tämä tekee yhteistoimintarobotin käytöstä luonnollisen valinnan. UR3:n säädettävien turvatoimintojen lisäksi sovelluksesta voidaan tehdä vielä turvallisempi edellä mainittuja ohjeita noudattaen sekä soveltamalla kappaleessa 2 esitettyjen tutkimusten tekniikoita.

5 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä oli tavoitteena tutustua yhteistoimintarobottien turvallisuuteen. Turvallisuutta käsitellään esittämällä riskienarvioinnin sekä -hallinnan keinoja, joita voidaan soveltaa myös yhteistoimintaan tarkoitetuissa robottisovelluksissa. Työssä esitettiin standardeja, jotka asettavat vähimmäisvaatimuksia yhteistoimintarobottien toiminnalle sekä normaali- että vikatilanteissa. Mikäli laite on standardien mukaisesti suunniteltu ja laitteen käyttäjät toimivat ohjeiden ja standardien mukaisesti, niin yhteistoimintarobotteja voidaan pitää turvallisina.

Universal Robotsin robottien sovelluksia ja aloja tarkastellessa havaittiin, kuinka laaja yhteistoimintarobottien käyttöalue on. Yhteistoimintarobotit ovat luoneet valtavasti uusia sovellusmahdollisuuksia poistamalla rajoitetun tilan robotin ympäriltä. Tämä kuitenkin asettaa uusia vaatimuksia yhteistoimintaan tarkoitettujen robotin turvallisuudelle.

Tällä hetkellä kehitetään yhä turvallisempia ja suorituskykyisempiä robotteja. Tässä työssä käytettiin esimerkkinä Universal Robotsia kuvattaessa alan nopeaa kehitystä. Universal Robotsin valmistaman UR3-yhteistoimintarobotin teknisiä tietoja vertailtiin uudemman UR3e-yhteistoimintarobotin kanssa. UR3 valikoitui esimerkiksi, sillä siihen oli käytännössä mahdollista päästä tutustumaan Fab Lab Oulussa. UR3:n avulla esitettiin mahdollinen sovellutus yhteistoimintarobotin käytölle apuna 3D-tulostuksessa sekä kuinka kyseinen sovellutus voitaisiin tehdä turvallisemmaksi.

Turvallisempi sovellus ei automaattisesti tarkoita robotin suorituskyvyn alentamista, vaan eri tekniikoita käyttämällä voidaan saada aikaan hyvinkin suorituskykyisiä, turvallisia ja mukautuvia robottisovelluksia. Uusia tapoja tehdä yhteistoimintarobottisovelluksista yhä turvallisempia, tehokkaampia ja käyttäjäystävällisempiä kehitetään nopeasti.

6 LÄHDELUETTELO

Kuts, V., Sarkans, M., Otto, T. & Tahemaa, T. (2017). Collaborative Work Between Human and Industrial Robot in Manufacturing by Advanced Safety Monitoring System. Teoksessa B. Katalinic (toim.) *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation"*. Vienna: DAAAM International, 996-1001.

SFS-EN 60204-1:2018 (2018). Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset, 269

SFS-EN ISO 10218-1:2011 (2013). Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Julkaisija: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 90

SFS-EN ISO 10218-2:2011 (2017). Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Robottijärjestelmät ja niiden yhdistelmät. Julkaisija: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 155

SFS-EN ISO 12100 (2011). Koneturvallisuus. Yleiset suunnitteluperiaatteet, Riskin arviointi ja riskin pienentäminen. Julkaisija: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 186

SFS-EN ISO 13849-1 (2016). Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet. Julkaisija: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 194

Universal Robots (2019) About Universal Robots. Saatavissa:
<https://www.universal-robots.com/about-universal-robots>. [viitattu 27.6.2019]

Universal Robots (2019) Collaborative Robots Applications. Saatavissa:
<https://www.universal-robots.com/applications/> [viitattu 26.8.2019]

Universal Robots (2019) Collaborative Robots Industries saatavissa:

<https://www.universal-robots.com/industries/> [viitattu 26.8.2019]

Universal Robots (2019) News Centre. Saatavissa:

<https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/universal-robots-now-certified-for-applications-in-cleanroom-environments/>. [viitattu 28.8.2019]

Universal Robots (2019) Table 1: Safety Function Descriptions. Saatavissa:

<https://www.universal-robots.com/media/1800058/ur-g3-safety-functions-20170509.pdf>. [viitattu 10.8.2019]

Universal Robots (2019) Universal Robot UR3. Manual. Saatavissa:

https://www.vajdamuvek.hu/files/UR3_User_Manual_en_Global.pdf. [viitattu 28.6.2019]

Universal Robots (2019) Universal Robots E-series. Saatavissa:

<https://www.universal-robots.com/media/1802432/e-series-brochure.pdf>. [viitattu 28.6.2019]

Zanchettin, A.M., Rocco, P., Chiappa, S. & Rossi, R. (2019). Towards an optimal avoidance strategy for collaborative robots. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 59: 47-55