

Ihminen – robotti järjestelmän turvallisuuden arviointiprosessi

Timo Malm

*Tapio Heikkilä **

*Jari M Ahola **

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, P.O.Box 1300, FIN-33101 Tampere, Finland
Tel. +358 20 722 3224, timo.malm@vtt.fi, www.vtt.fi

* Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, P.O.Box 1100, FIN-90570 Oulu, Finland
Tel. + 358 20 722 2115, jari.m.ahola@vtt.fi, www.vtt.fi

AVAINSANAT ihminen – robotti yhteistyö, turvallisuuden arviointiprosessi

TIIVISTELMÄ

Ihminen – robotti yhteistyö hyödyntämällä robotin voimaohjausta on uutta teknologiaa, johon liittyy turvallisuusriskejä. Näitä on vaikea hoitaa samanaikaisesti tuottavasti ja turvallisesti. Tässä artikkelissa kuvataan ihminen-robotti –järjestelmän turvallisuuden arviointiprosessia. Prosessin jokaisessa vaiheessa arvioidaan järjestelmää tietyltä kannalta ja kokonaisuus antaa yleiskuvan turvallisuudesta. Riskin arvioinnilla päädytään merkittävien riskien kautta turvallisuusvaatimuksiin. Toisaalta vaatimuksia esitetään myös suoraan standardeissa. Roboteille on olemassa harmonisoitu standardi, jota tässä on sovellettu ja siksi koneasetuksen kaikkia vaatimuksia ei ole tarvinnut kirjata erikseen. Samoja vaatimuksia tulee esiin monista eri lähteistä ja nämä kohdat käsitellään tarkemmin riskin arvioinnin alussa ja niihin viitataan myöhemmissä vaiheissa. Turvallisuusarviointia konkretisoidaan kahdella kappaleiden käsittelyn robottiauvusteisella sovellusesimerkillä, jotka sisältävät yhden robotin mikä ovat siksi kohtuullisen rajallisia prosessin testaamista varten.

1 JOHDANTO

Robotteja käytetään yhä useammin kohteissa, joissa robotti tekee raskaan työn ja ihminen avustaa toiminnan ohjauksessa. Tällöin puhutaan vuorovaikutteisesta robotiikasta, koska ihmisen ja robotin vuorovaikutus on keskeisellä sijalla työn suorituksessa. Vuorovaikutteinen ohjaus voidaan toteuttaa korkean tason komentoina ja toimintoina /1/ tai intensiivisesti ihmisen ollessa kontaktissa robottiin tai siirrettävään taakka ohjatessaan jatkuvatoimisesti robotin liikeratoja /2/. Vuorovaikutteinen robotiikka liittyy usein kohteisiin, joissa täydellinen automaatio ei ole taloudellisesti kannattavaa, mutta taakkojen raskas paino ja toiminnan riskit edellyttävät älykästä taakkojen hallintaa.

Robottijärjestelmien turvallisuutta säädellään useissa koneturvallisuuden ja robotiikan säädöksissä ja standardeissa. Ihmisen työskennellessä samassa työtilassa robotin kanssa, kuten vuorovaikutteisessa robotiikassa tyypillisesti tapahtuu, säädösten soveltamiseen on käytettävissä vähän selkeitä esimerkkejä ja ohjeiston konkretisoinnit rajutuvat yksityiskohtiin. Systemaattinen kokonaisvaltaisen lähestymistapa helpottaa suunnittelua ja erityisesti järjestelmäintegraattorin työtä ja seuraavassa esitellään tähän tähtäävä VTT:llä kehitetty automaattisen koneen turvallisuuden arviointiprosessi. Prosessia sovelletaan tiiviiseen interaktioon perustuvan vuorovaikutteisen robottijärjestelmän turvallisuuden arvioinnissa.

Pilottikohteessa on robottijärjestelmä, johon on liitetty alipainarttuja ja erillinen ohjausjärjestelmä. Erillistä ohjausjärjestelmää tarvitaan robotin ohjainsavulla tehtävään käsiohjaukseen käytettävän robotin voimaohjaukseen ja langattomaan tiedonsiirtoon. Pilottikohteessa on tutkittu kahta sovellustapausta, joista toisessa käsitellään teräspalkkeja ja toisessa puuosia. Kummassakin tapauksessa kappaleita siirretään lavalle tai lavalta ja ihminen toimii lähellä taakkaa. Robotin perusohjaukseen nähden uusia riskejä ovat mm. painavan taakan ja robotin läheisyys sekä robotin käsiohjaus.

2 TURVALLISUUDEN SÄÄDÖKSET IHMINEN-ROBOTTI JÄRJESTELMÄLLE

Robotiikan kannalta Euroopan Unioni direktiiveistä merkittävin on konedirektiivi 2006/42/EC /3/. Suomen lainsäädäntöön tämä on otettu koneasetuksena 400/2008. Robottijärjestelmään liittyvät sitovat määräykset tulevat koneasetuksesta ja tarkemmat ohjeet ovat harmonisoiduissa standardeissa (ISO 10218-1 & -2) /4/, /5/.

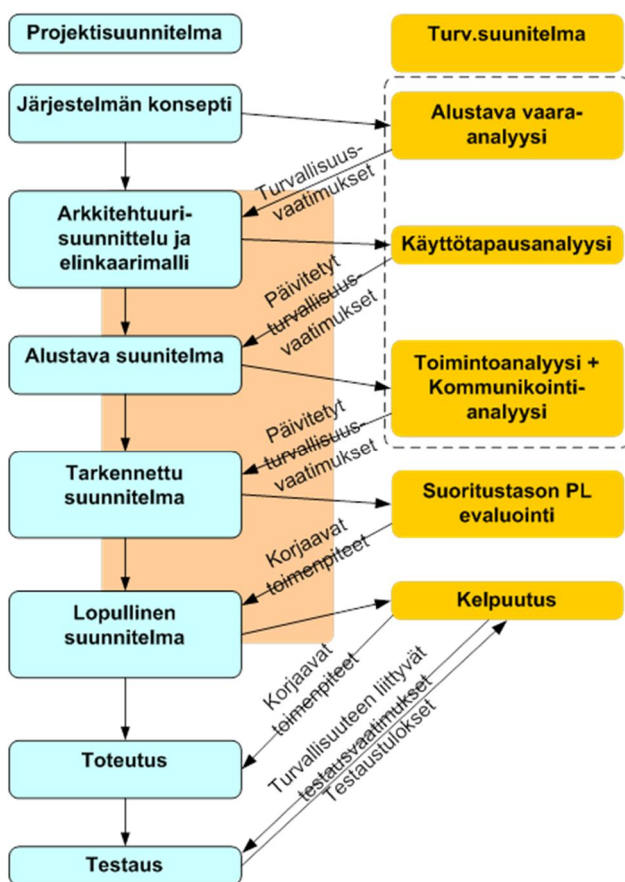
Tarkastelun kohteena oleva robotti tekee yhteistyötä ihmisen kanssa ja siksi ohjeita tarvitaan myös ISO/TS 15066 teknisestä spesifikaatiosta (julkaisematon luonnos) /6/.

Harmonisoitujen standardien vaatimusten läpikäynti on esittämässämme mallissa oma työvaiheensa, koska yleiset turvallisuusvaatimukset löytyvät omista edellä mainituista dokumenteista ja yhdistäminen muihin vaatimuksiin ei ole tarpeellista. Myös riskin arvioinnista saadaan vaatimuksia, koska kaikki vaaralliset riskit tulee minimoida.

3 TURVALLISUUDEN ARVIOINTIPROSESSI

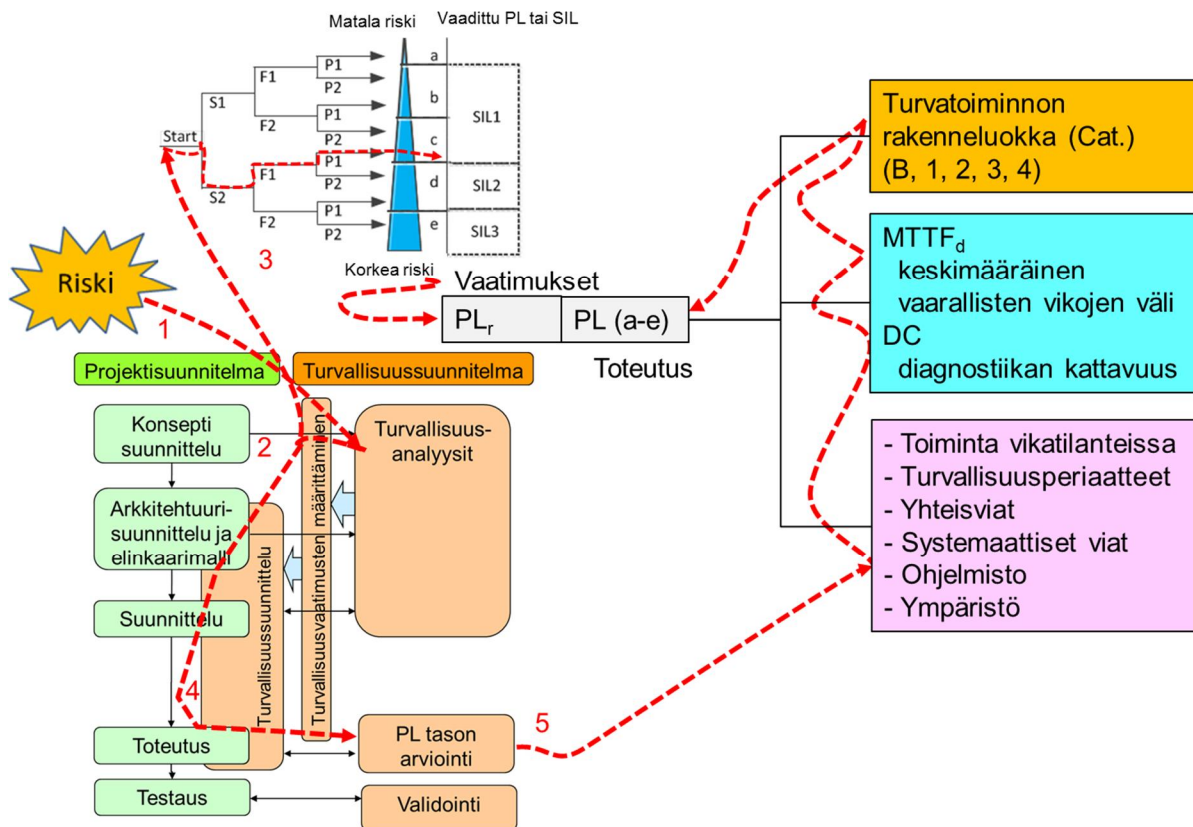
Turvallisuuden arviointiprosessissa aluksi vaarat ja riskit tunnistetaan alustavalla vaara-analyysillä (PHA = Preliminary Hazard Analysis), jolla voidaan tarvittaessa kattaa kaikki normaalin toiminnan riskit (vrt. /7/). Lähtötietoina käytetään aluksi konseptisuunnittelun dokumentteja, mutta suunnittelun edetessä myös muita informaatiota, kuten esim. suunnittelumalleja. Käyttötapa-analyysi (UCSA = Use Case Hazard Analysis) käsittelee riskejä, jotka liittyvät työvaiheisiin ja se voidaan tehdä vasta sitten, kun järjestelmä on niin pitkälle suunniteltu, että työvaiheet voidaan erottaa. Analyysi on erikoistapaus yleisemmästä toiminta vaara-analyysistä (OHA= Operating Hazard Analysis). Kolmas vaihe analyyseistä liittyy ohjausjärjestelmän poikkeavan toiminnan ja tiedonsiirron analyyseihin. Tässä vaiheessa pitää jo tietää ohjausjärjestelmän rakenne. Jokaisella näistä kolmesta on oma tarkoituksensa ja ne paljastavat erilaisia riskejä. PHA on kaikissa tapauksissa välttämätön, mutta UCSA tai ohjausjärjestelmän analyysit (esim. poikkeamatarkastelu) voivat joissain tapauksissa jäädä vähemmälle. Suunnittelun ja turvallisuussuunnittelun vaiheet on esitetty kuvassa 1. /8/, /9/

Robottien osalta alustavan vaara-analyysin ja kelpuutuksen (validointi) rinnalla on käytetty ISO 10218-2 standardin tarkastuslistaa (liite G), joka on tarkoitettu vaatimusten verifiointiin (todentamiseen) /5/. Lista täytetään lopullisesti vasta kelpuutuksessa, mutta sitä kannattaa tarkastella jo alussa, jottei joku vaatimus jäisi liian vaikeaksi toteuttaa vasta suunnittelun loppuvaiheessa. Vastaava vaatimusten verifiointitaulukko on myös standardin ensimmäisessä osassa (ISO 10218-1), mutta se on tarkoitettu enemmän robotin valmistajille kuin järjestelmäintegraattoreille.



Kuva 1. Järjestelmän suunnitteluprosessi, jossa vasemmalla on yleinen suunnittelu ja oikealla turvallisuussuunnittelu. Katkoviivalla on rajattu turvallisuuden arviointiprosessin ydin. /8/

Osa riskeistä liittyy ohjauksjärjestelmän toiminnalliseen turvallisuuteen, jolloin esim. turvatoiminnan oikea toimintaa edellyttää myös ohjauksjärjestelmän oikeaa toimintaa. Toiminnallisen turvallisuuden standardeja ovat mm. IEC 61508 ja SFS EN 62061 (SIL-vaatimustasot) sekä SFS-EN ISO 13849-1 /10/ (PL-vaatimustasot). Pilot-kohteessamme on käytetty PL-tasojä. Ohjauksjärjestelmän turvatoimintojen vaatimusten arvioinnin vaiheet on esitetty kuvassa 2.



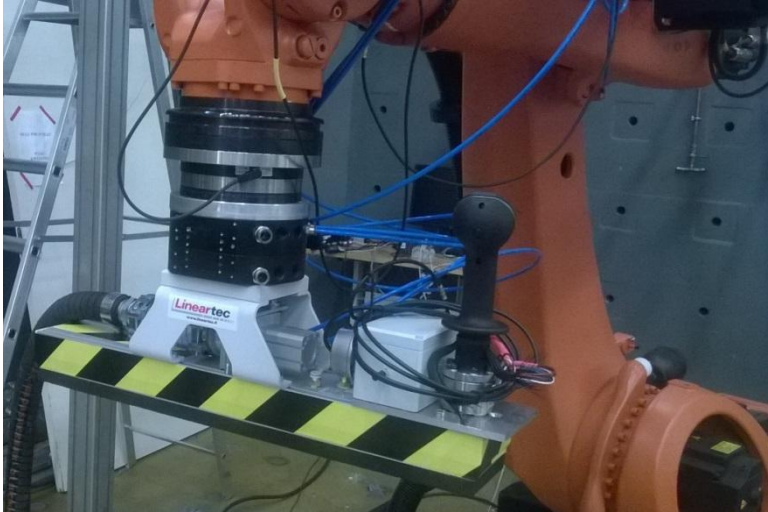
Kuva 2. Suunnittelun vaiheet liittyen turvallisuuden suoritusastoihin (PL).

Järjestelmässä käytetään langatonta viestintää käsiohjaimen ja robotin ohjauksen välillä. Langattomaan viestintään liittyvät myös SIL ja PL tasot, mutta niitä tarkastellaan erikseen. Tiedonsiirron virheet ovat luonteeltaan ajoittaisia ja niiden osuudeksi arvioidaan usein 1% ohjauksjärjestelmän vioista (IEC 61784-3 Digital data communications for measurement and control – Part 3: Profiles for functional safety communications in industrial networks ja /11/). Käytännössä tämä tarkoittaa vaarallisen vian taajuudella mitattuna 100 kertaa tiukempaa vaatimusta.

4 PILOTTIJÄRJESTELMÄN KUVAUS

Pilottijärjestelmässämme teollisuusrobotia (KUKA KR120 R2500) ohjataan talutuskahvan avulla, joka on mekaanisesti kiinnitetty alipainetarttujan (Lineartec Oy, Kokkola, Suomi) runkoon (Kuva 3). Alipainetarttujan nimellinen nostokapasiteetti on 150 kg varmuuskertoimella 3, kun alipaine vaikuttaa tarttujan koko tartuntapinnalla. Alipaine tuotetaan erillisellä pumpulla, jonka alipainelinja on yhdistetty tarttujan imulaatikkoon halkaisijaltaan 50 mm alipaineletkulla.

Ihmisen ja robotin väliset kontaktivoimat mitataan talutuskahvaan integroidulla voima-momenttianturilla ME K6D40 (ME- Meßsysteme GmbH, Henningsdorf, Saksa). Venymäliuskasignaalit vahvistetaan ja muunnetaan langattomassa anturisolmussa 16-bittisiksi kokonaisluvuiksi jotka siirretään langattomasti ensin radiovastaanottimena toimivalle yhdyskäytäväsolmulle ja edelleen sarjamuotoisena RS232-viestinä erilliselle ohjauksjärjestelmälle Beckhoff CX5020 (Beckhoff Automation GmbH, Verl, Saksa). Kokonaislukumuotoiset venymäliuskasignaalit muunnetaan karteesisiksi voimiksi ja momenteiksi CX5020:ssa PLC-sovelluksessa.



Kuva 3. Alipainetarttuja ja ohjainkahva robottiin asennettuna.

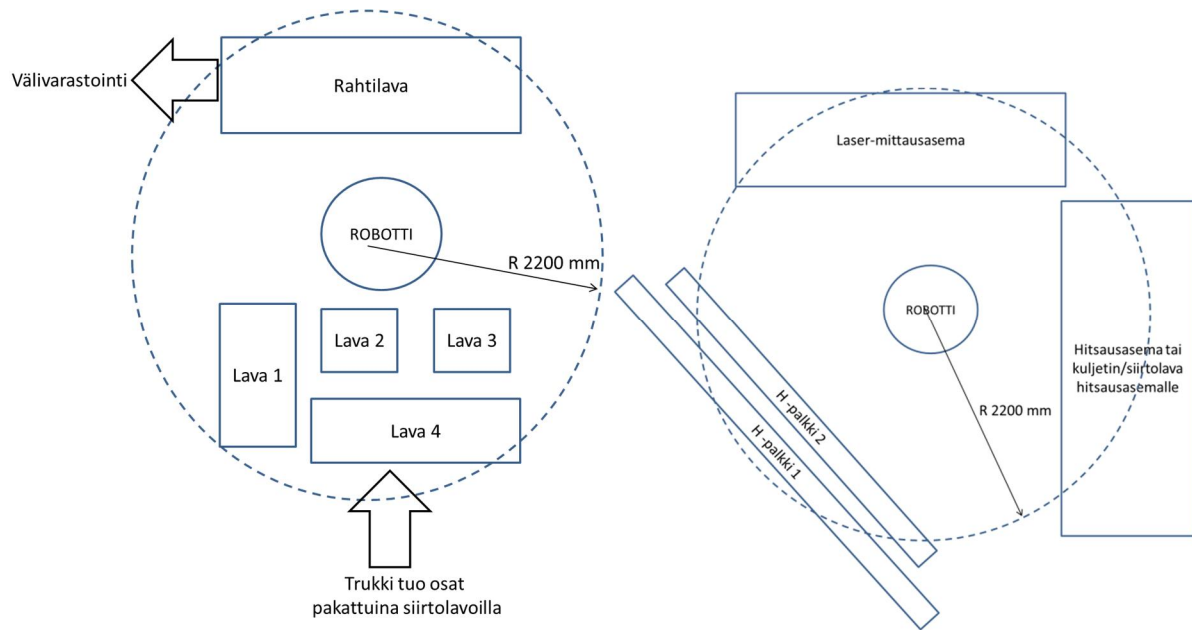
Robotin ja ympäristön väliset voimat mitataan robotin kiinnitinlaippaan asennetulla voima- ja momenttianturilla ATI Omega160 (ATI Industrial Automation Inc., Apex, NC, USA). Venymäliuskasignaalit muunnetaan ATI voima- ja momenttiohjaimella karteesisiksi voimiksi ja momenteiksi, jotka luetaan erilliseen ohjausjärjestelmään skaalattuina ± 10 V analogiajännitesignaaleina. CX5020-laitteessa suoritettavassa PLC-sovelluksessa lasketaan mitattujen voimien ja momenttien perusteella 4 millisekunnin säätövälikillä ratakorjaus, joka lähetetään EtherCAT-kenttäväylän kautta KUKA KR C4 robotin ohjaimelle RSI-3 rajapinnan kautta (KUKA Roboter GmbH, Augsburg, Saksa). Ohjausjärjestelmään toteutettiin kaksi rinnakkaista impedanssisäädintä, joista toinen on suunniteltu robotin ja ympäristön väliselle kovalle kontaktille, ja toinen robotin ja ihmisen väliselle pehmeälle kontaktille. /12/, /13/

5 TESTITAPAUKSIEN KUVAUS

Riskin arviointiprosessilla analysoidut vuorovaikutteisen robotiikan testitapaukset olivat leikkipuistotelineen rakenneosien pakkaaminen ja teräspalkin käsittely laaduntarkastuspisteessä. Molemmissa testitapauksissa robotti toimii kuorman kannattimena ja ihminen jakoi työtilan robotin kanssa.

Leikkipuistotelineen rakenneosien lastaamisen vaatimusmäärittely tehtiin yhteistyössä Lappset Group Oy:n kanssa. Testitapauksen tavoitteena oli vähentää pakkaajien työkuormaa sekä parantaa ergonomiaa. Osat tuodaan lastauspaikalle robotin ulottuville erillisillä lavoilla valmiiksi pakattuina. Lastattavien osien paino oli 5 kg – 100 kg ja pituus 100 mm - 3000 mm. Lastausaseman periaatteellinen pohjapiirustus on esitetty kuvassa 4 vasemmalla.

Teräspalkin laaduntarkastuksen testitapaus määriteltiin yhteistyössä YTT Konepaja Oy:n kanssa. Laaduntarkastuksessa mitattiin H-palkin todelliset mitat joita voidaan hyödyntää palkin jatkokäsittelyssä. Laaduntarkastusaseman periaatteellinen pohjapiirustus on esitetty kuvassa 4 oikealla.



Kuva 4. Lastausaseman periaatteellinen pohjapiirustus. Kuvassa oikealla laaduntarkastusaseman periaatteellinen pohjapiirustus.

6 TESTITAPAUKSIEN TULOKSET

Robotin avulla tapahtuvassa lastaamisessa ja laaduntarkastuksessa raskaat osat siirrettiin robotin avulla. Operaattori ohjasi robottia talutuskahvan avulla ja käsiteltäviin kappaleisiin tartuttiin robotissa olevalla alipainetarttujalla. Robotti toimi kuorman kannattimena ja ihminen ohjasi robotin liikettä suhteellisen pienellä n. 5 N – 50 N kontaktivoimalla. Testeissä käsiteltävän teräspalkin paino rajoitettiin turvallisuussyistä 80 kg:aan ja lisäksi robotin liikenopeus oli rajoitettu nopeuteen 250 mm/s.

Turvallisuusanalyysi toteutettiin edellä esitetyn prosessin mukaisesti. Kohteen merkittävimmät riskit liittyvät taakan putoamiseen ja robotin liikkeisiin. Nämä riskit tulevat ilmi selvästi sekä PHA:ssa että UCSA:ssa. Kohde on pienehkö ja toisaalta on tavallista, että pahimmat riskit havaitaan monella eri menetelmällä. Muita arviointimenetelmiä olivat ISO 10218-2 standardin liite G sekä suppeasti sovellettuna koneasetuksen liite I.

Ohjauksjärjestelmään liittyvät järjestelmän uudet turvafunktiot on rajattu liikkeen sallintaan ja hätäpysäytykseen (pakollinen). Voiman tunnistus toteutetaan monimutkaisella järjestelmällä, jota olisi vaikea saada itsenäisesti turvalliseksi. Tämän vuoksi aina voimaohjauksen lisäksi tarvitaan erillinen liikkeen sallinta (painike, joka on tulevaisuudessa kolmiasentoinen) ja tämä toimii turvafunktiona.

7 PÄÄTELMÄ

Esittämämme turvallisuusanalyysi ja riskien arviointiprosessi systematisoi robottijärjestelmän suunnittelua ja hyödyt tulevat esille myös vuorovaikutteisen robottijärjestelmän suunnittelussa. Riskien arviointiprosessissa on osioita, jotka menevät päällekkäin, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että jotkut osiot voidaan tarkastella nopeasti. Eri analyysien näkökulmat kuitenkin mahdollistavat uusien vaaratilanteiden löytymisen. Alustava vaara-analyysi (PHA) on tärkein vaihe ja se on mahdollista toteuttaa myös hyvin yksityiskohtaisena, jolloin muiden analyysien tarve vähenee. Tässä tapauksessa tähän vaiheeseen on osittain liitetty koneasetuksen liitteen I vaatimusten ja robottistandardin (ISO 10218-2) vaatimusten tarkastelu. Vaatimusten tarkastelu on viimeistelty lopussa kelpuutusvaiheessa.

Käyttötapa-analyysi käsiteltiin PHA:n yhteydessä, koska kohde oli varsin rajallinen ja dokumentointia pyrittiin minimoimaan. Käyttötapa-analyysit oli kuvattu hyvin videolla ja siitä oli nähtävissä hyvin käyttötapa-analyysit ja käyttöön liittyvät riskit, mutta dokumentointi toteutettiin siis PHA lomakkeeseen.

Robottisolussa käytettiin erillistä langatonta ohjausta, jonka turvallisuutta tarkasteltiin ISO 13849-1 standardin mukaisesti (vrt. kuva 2). Osa erilliseltä käsiohjaimelta tulevasta tiedosta liittyy turvallisuuteen (hätäpysäytin ja liikkeen sallinta) ja siksi erillinen analysointi on ollut tarpeen. Tietoliikenteen häiriöiden vaikutusta tarkasteltiin erikseen.

8 TEKIJÄN KIITOKSET

Tämä työ on tehty pääosin VTT:n rahoittamana. Raportointi ja päätelmät on toteutettu osin TEKESin rahoittamassa TuoHIRO-projektissa (Tuottavuutta Helppokäyttöisellä Ihminen-Robotti -yhteistyöllä). Lisäksi kiitämme Lappset Group Oy:tä ja YTT Konepaja Oy:tä yhteistyöstä.

9 LÄHDELUETTELO

1. Halme A., Heikkilä T., Torvikoski T., An Interactive Robot Control System. *International Journal of Robotics and Automation*, vol 2, No. 3, 1987, pp. 155 - 162.
2. Koskinen J., Heikkilä T., Pulkkinen T., A monitoring concept for co-operative assembly tasks. *Frontiers of Assembly and Manufacturing. Selected papers from ISAM'09*, Lee, Sukhan; Suárez, Raúl; Choi, Byung Wook (Eds.). *Lecture Notes in Automation, Collaboration and Eservices*, Springer Verlag, 2010, pp 171 – 184.
3. Machinery Directive 2006/42/EC. Directive 2006/42/EC of the European Parliament and of the council of 17 May 2006 on machinery, and amending Directive 95/16/EC (recast). 63 p.
4. ISO 10218-1. Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 2: Robots. 2011. 72 p.
5. ISO 10218-2. Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 1: Robot systems and integration. 2011. 43 p.
6. ISO/CDTS 15066. Robots and robotic devices — Safety requirements for Industrial robots — Collaborative operation. 2013. 30 p.
7. ISO 12100. Safety of machinery. General principles for design. Risk assessment and risk reduction. 2010. 172 p.
8. Hietikko M, Alanen J & Malm T. A safety process reference model and tool for the development of machine control systems. *SIAS 2010*. Tampere, Finland 6 p.
9. Risto Tiusanen. 2014. An approach for the assessment of safety risks in automated mobile work-machine systems. Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology at Tampere University of Technology. 200 p + app. 6 p. ISBN 978-951-38-8172-6
10. SFS-EN ISO 13849-1. 2008. Safety of machinery — Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design. Finnish Standards Association SFS 180 p.
11. Timo Malm, Maarit Kivipuro, Jacques Hérard & Jørgen Bøegh. 2007. Validation of Safety-related Wireless Machine Control Systems. Nordic Innovation Centre. Oslo. NT TECHN REPORT 605. 57 p. + 7 appendices.
http://www.nordicinnovation.org/Global/_Publications/Reports/2007/Validation%20of%20safety-related%20wireless%20machine%20control%20systems.pdf
12. Jari M. Ahola, Jukka Koskinen, Tuomas Seppälä and Tapio Heikkilä, Development of impedance control for human/robot interactive handling of heavy parts and loads. 2015 ASME/IEEE International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), Boston, 2015.
13. Miomir Vukobratovic, Dragoljub Surdilovic, Yury Ekalo & Dusko Katic. Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction. *New Frontiers in Robotics –Vol. 2*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2009. 638 pgs.