Tampereen yliopisto



Saku Pöysäri

TEKNOLOGIADEMO: IHMISEN JA ROBOTIN YHTEISTYÖ TURVAMATTOKOKOONPANOSSA

2025

PIRKANMAA
COUNCIL OF TAMPERE REGION

ETELÄ-POHJANMAAN LIITTO
Regional Council of South Ostrobothnia

Euroopan unionin
osarahoittama

1. JOHDANTO

Valmistavan teollisuuden vallitsevana käytäntönä on ollut eristää teollisuusrobotit operaattoreista erilaisilla turvaratkaisuilla – pääsääntöisesti turva-aidoilla – suorittamaan omia tehtäviään eristyksissä. Viimeisen reilun vuosikymmenen aikana tässä on tapahtunut muutos osittain yhteistyörobottien yleistymisen myötä. Teollisuudessa havaittiin, että tiettyjen työtehtävien suorittaminen ihmisen ja robotin yhteistyönä on kannattavaa. Tavoitteena ei olekaan enää eriyttää robotteja ja ihmisiä toisistaan nykyaikaisessa dynaamisessa tuotannossa, vaan yhdistää automaation vahvuudet (keskeytymättömyys, toistettavuus, tasaisuus, tarkkuus) ihmistyöntekijöiden muutoksensietokykyyn, joustavuuteen sekä päätöksentekokykyyn tuotannon tehostamiseksi.

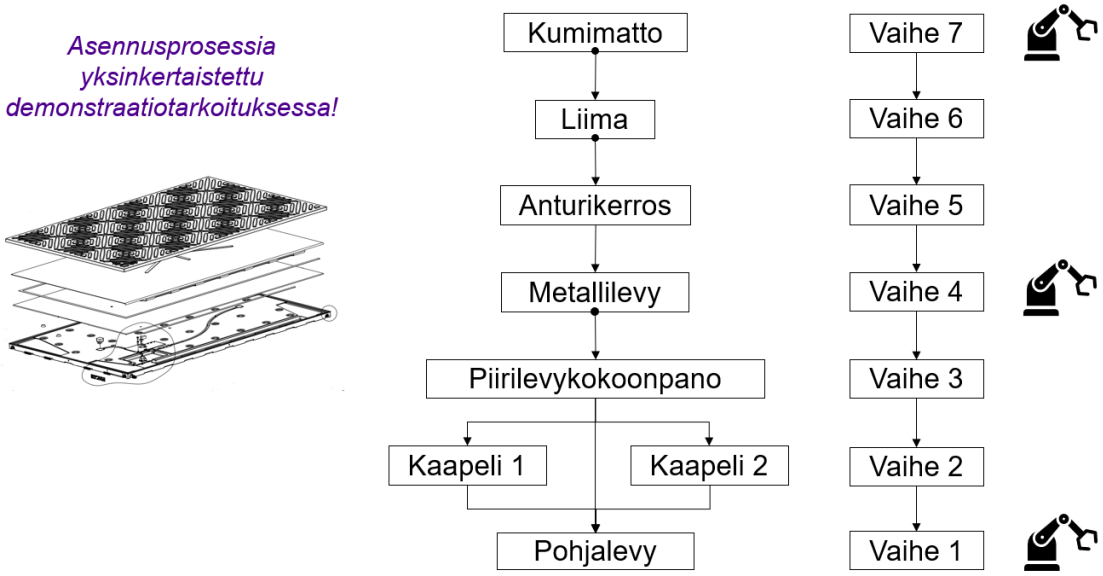
Ihmisen ja robotin yhteistyö tulee yleistymään jatkossa erityisesti pk-yrityksissä, joissa robottisovellusten joustavuus, muokattavuus ja helppokäyttöisyys ovat ehdottomia. Osittain tämän takia yhteistyörobotit ovat olleet pk-sektorilla kasvavan kiinnostuksen kohteena. Ihmisen ja robotin yhteistyötä voidaan toteuttaa myös perinteisimmillä teollisuusroboteilla, kunhan on valittuna soveltuva yhteistyön muoto ja huolehdittu robottisolun turvallisuudesta. Tyypillisesti yhteistyö keskittyy joko ihmisen ja robotin rinnakkaiseloon samassa työtilassa tai vuoroittaiseen yhteistyöhön esimerkiksi tuotteen kokoonpanemiseksi. Tulevaisuudessa yhteistoiminnalliset ja varsinaisesti todelliseen yhteistyöhön perustuvat järjestelmät ovat mahdollisia.

Robottien kanssa työskentelyn tulee olla aina turvallista operaattorille. Mitä korkeampi yhteistyön taso sitä korkeammat ovat vaatimukset robottisovelluksen sisäisille turvaominaisuuksille. Ihmisen ja robotin yhteistyön yleistymisen haasteeksi onkin osittain muodostunut robottisolujen turvallistaminen: kuinka voidaan suunnitella ja toteuttaa turvallisia robottisoluja. Tämän takia edelleen ajoittain vältellään ihmisen ja robotin yhteistyötä ja toteutetaan sovellus joko pelkällä operaattorilla tai robotilla, joka on eristetty ja aidattu turva-aidoilla, koska tämä on helpompaa.

Tässä teknologiademossa esitellään, kuinka ihmisen ja robotin yhteistyötä hyödynnetään turvamattokokoonpanossa. Erityisenä näkökulmana on Optimaalista lisäarvoa teknologiasta -hankkeen (OPLITE) mukaisesti, kuinka simulointia ja robottien etäohjelmointia voidaan hyödyntää robottisovelluksen suunnittelussa ja ohjelmoimisessa. Näin ollen turvamattokokoonpanosovelluksen turvallistaminen jätetään vähäisemmälle huomiolle tässä selvityksessä painopisteen ollessa simuloinnin ja etäohjelmoinnin tuomissa mahdollisuuksissa ihmisen ja robotin yhteistyön mahdollistamiseksi.

2. TURVAMATTOKOKOONPANO JA TESTAUS-YMPÄRISTÖ

Turvamattokokoonpano koostuu erilaisista komponenteista, jotka voidaan karkeasti jaotella isoihin levymäisiin kappaleisiin (pohjalevy, metallilevy, kumimatto) ja elektroniikkakomponentteihin (kaapelit, piirilevykokoonpano, anturikerros). Isot kappaleet ovat eri materiaaleista ja niiden massat vaihtelevat (muovinen keskiraskas pohjalevy; metallinen raskas välilevy; kuminen, joustava ja kevyt päälylevy). Lopputuotteen dimensiot ovat noin 30mm (paksuus) x 600mm (syvyys) x 1000mm (leveys). Isot levymäiset kappaleet noudattavat samoja dimensioita, mutta eri paksuuksilla. Elektroniikkakomponentit ovat herkkiä komponentteja, joiden asentamisessa tarvitaan erityistä varovaisuutta (piirilevy), pujottamista (kaapelit), kääntelyä (anturikerros) ja kytkentöjen tekemistä (piirilevyn yhdistäminen kaapeleihin ja anturikerrokseen). Piirilevykokoonpano sisältää erilaisia ruuveja ja muita kiinnityskomponentteja piirilevyn asentamiseksi paikoilleen pohjalevyyn, mutta niitä ei ole tässä tapauksessa tarkemmin eritelty yksinkertaistamisen vuoksi. Liimaa tarvitaan kumimaton liimaamiseksi paikalleen pohjalevyyn. Turvamattokokoonpanon yksinkertaistettu asennusprosessi on havainnollistettu kuvassa 1. Kuvassa on myös esitelty, mitkä osat robotti asentaa merkitsemällä nämä vaiheet robotin ikonilla. Loput osat operaattori asentaa ja kytkee.



Kuva 1. *Turvamattokokoonpanon komponentit ja asennusprosessi yksinkertaistettuna*

Testausympäristönä käytetään Tampereen yliopiston *Raskaan yhteistyörobotiikan pilottilinjan* (engl. Human-Robot Collaboration Pilot Line, HRC Pilot Line) ABB:n robottisolua, joka on havainnollistettu kuvassa 2. Solussa on käytössä ABB:n IRB 4600 -sarjan robotti (IRB 4600-40/2.55), jonka ulottuvuus on 2.55m ja kuormankantokyky 40kg. Solun robotti on asennettuna lineaariradalle ja se on varustettuna kustomoidulla alipainetarttujalla, joka koostuu kolmesta Unigripper-merkkisestä alipainevaahtotarttujasta. Kyseinen tarttuja on optimaalinen käsittelemään huokoisia materiaaleja, jollaisia turvamattokokoonpanon kumimatot ovat.



Kuva 2. *Turvamattokokoonpanon testausympäristö*

Robotin lisäksi robottisolussa on robotin takana materiaalihylly, johon on ladattuna isot levymäiset kappaleet (pohjalevyt, metallilevyt ja kumimatot) omille hyllypaikoille, sekä asennuspöytä, jonka vieressä on komponenttipöytä muille asennettaville komponenteille. Ihmisen ja robotin väliselle vuorovaikutukselle asennuspöytään on asennettuna painonapeilla varustettu käyttöliittymä (ohjauskotelo), josta operaattori voi kuitata robotille luvan lähestyä asennuspöytää sekä pysäyttää robotin tarvittaessa. Robottisolu on muutoin aidattu tai rajoitettu seinillä paitsi yhdeltä sivulta. Tälle sivulle on asennettuna valoverho, jolla robotti pysäytetään, mikäli joku ulkopuolinen tulisi työskentelyalueelle. Turva-aidassa on myös liukuovi, joka on varustettu ovikytkimellä, joka vastaavasti pysäyttää robotin, mikäli joku kulkee tätä kautta työskentelyalueelle. Robotin liikealuetta on rajattu ABB:n SafeMove-työkalulla, jolla rajataan ohjelmallisesti robotin liikealuetta tarpeettomien törmäysten ja vaaratilanteiden estämiseksi.

3. ROBOTTISOLUN OHJELMOINTI JA SIMULOINTI

Robottisolun ohjelmointi toteutetaan Visual Components Premium OLP -ohjelmistolla, jossa mallipohjaisella etäohjelmoinnilla ohjelmoidaan robotin työohjelmat kolmiulotteisessa simulointiympäristössä valmistettavan tuotteen muotopiirteitä hyödyntäen. Tällä ohjelmointitavalla robottien ohjelmat voidaan ohjelmoida ennen tuotantoa, jolloin tuotantoa ei tarvitse keskeyttää ohjelmoinnin ajaksi. Luodut ohjelmat testataan etukäteen simuloinnilla, jolloin ohjelmien käyttöönottaminen tuotannossa nopeutuu entisestään.

Ennen ohjelmointia määritetään, miten asennusprosessin eri vaiheet jaetaan robotin ja operaattorin kesken. Tässä tapauksessa työtehtävien allokointi on suoraviivaista: isot ja raskaat kappaleet robotille, kun taas pujottamista ja kytkentöjä vaativat tehtävät operaattorille. Tällä työnjaolla robotti suorittaa fyysisesti raskaat tehtävät, joihin robotti soveltuu erinomaisesti, koska robotit pystyvät suorittamaan tällaisia tehtäviä tasaisella tahtiajalla ilman ihmiselle ominaista väsymistä, mikä voisi nostaa tahtiaikoja työpäivän loppua kohden. Vastaavasti operaattorille jää suoritettavaksi pujotusta ja sorminäppäryyttä vaativat tehtävät, jotka ovat robotille haastavia. Ainoaksi kysymykseksi jää kumpi resursseista suorittaa liimauksen. Kyseessä on hyvin yksinkertainen ja monotoninen tehtävä, jolloin tämä jätetään alustavasti robotin tehtäväksi. Tarkoituksena ei ole, että robotti levittäisi liiman kumimaton reunoihin, koska tämä vaatisi erillisen työkalun ja työkalunvaihdon. Sen sijaan ideana on, että robotti käyttää kumilevyn erillisellä liimausasemalla, jossa robotti kääntelee kumimattoa siten, että liima saadaan levitettyä kumimaton reunoihin.

Kuten kuvasta 1 nähdään, työvaiheet robotin ja operaattorin välillä pääsääntöisesti vuorottelevat, jolloin ihmisen ja robotin yhteistyön muotona on vuoroittainen yhteistyö. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ihmisen asentaessa piirilevykokoonpanoa pohjalevyyn, robotti käy samanaikaisesti noutamassa metallilevyn. Kun robotti on puolestaan asentanut metallisen välilevyn ja on noutamassa kumimattoa, ihminen pystyy asentamaan anturikerroksen ja tekemään tälle tarvittavat kytkennät ennen kuin robotti asentaa kumimaton paikoilleen.

Varsinainen ohjelmointi aloitetaan tuomalla turvamattokokoonpanon osat testausympäristön simulointimalliin, joka on mallinnettu jo aikaisemmin. Osat asetellaan omille paikoilleen ja aloitetaan robotin ohjelmointi asennusprosessin mukaisessa järjestyksessä:

- Pohjalevyn noutaminen materiaalihyllyn alimmalta tasolta ja asettaminen asennuspöydälle
- Metallilevyn noutaminen materiaalihyllyn keskimmäiseltä tasolta ja asettaminen pohjalevyn päälle
- Kumimaton noutaminen materiaalihyllyn ylimmältä tasolta, käyttäminen liimausasemalla ja asentaminen metallilevyn päälle

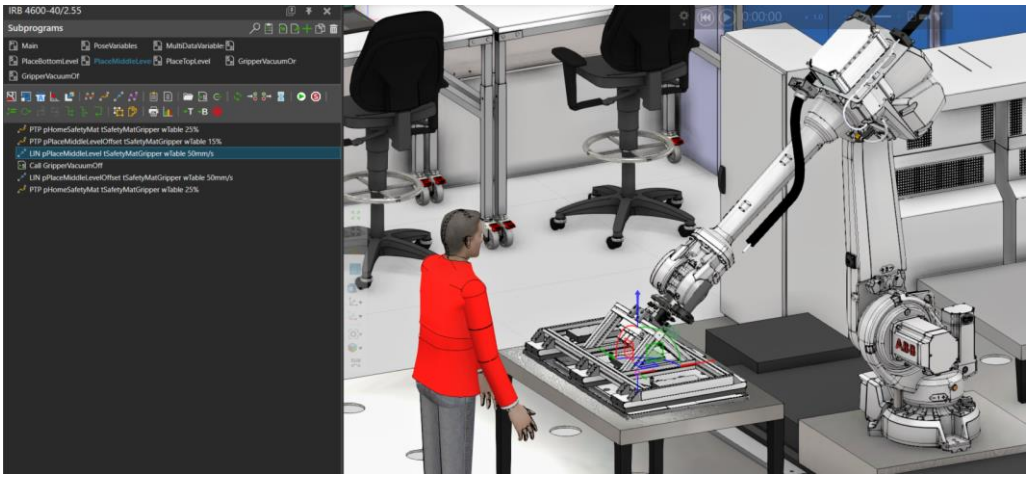
On syytä huomioida, että ohjelmoinnissa keskitytään tässä vaiheessa robotilla asennettaviin komponentteihin eikä huomioida miten operaattori asentaa muut komponentit. Robotin liikeratoja ohjelmoidessa robotin kotiasema määritetään asennuspöydän ja materiaalihyllyn väliin. Kappaleiden noudolle ja asentamiselle määritetään lähestymis- ja poistumispisteet sekä poiminta- ja jättöpisteet soveltuvilla liiketyypeillä, -nopeuksille ja tarkkuuksilla, joita optimoidaan ohjelmoinnilla huomioiden kuitenkin operaattorin asentamien osien kokoonpanoajat, koska kokoonpanoa tehdään vuorotellen.

Pohjalevyn asennuksessa erityispiirteenä on pohjalevyn käyttäminen asennuspöydän sivussa ennen pöydälle laskemista, jotta operaattori pystyisi pujottamaan kaapelit pohjalevyn lävitse robotin pitäessä levyä paikallaan (kts. kuva 3). Tällä tavalla saadaan kevennettyä operaattorin työkuormaa, koska pohjalevyyn asennettavat kaapelit kulkevat pohjalevyn molemmin puolin. Kun robotti pitää pohjalevyä ilmassa paikoillaan, operaattori pystyy vetämään kaapelit kevyemmin ja nopeammin pohjalevyn lävitse kuin jos operaattori joutuisi kääntelemään pohjalevyä asennuspöydällä kaapeleiden ujuttamiseksi oikeille paikoilleen.



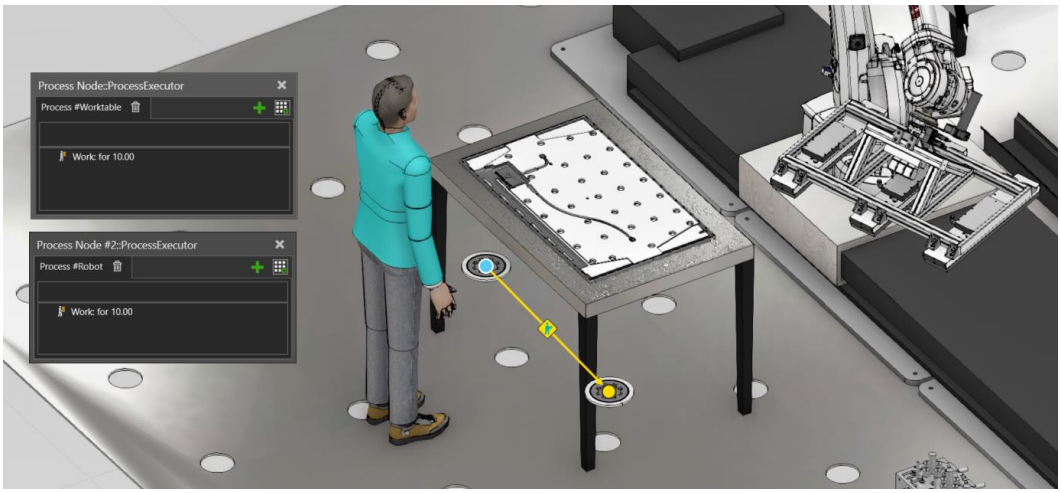
Kuva 3. *Kaapeleiden asennus robotin pidellessä pohjalevyä*

Metallilevyn asentaminen paikoilleen on suoraviivainen Pick&Place -prosessi. Kumimaton osalta osa poimitaan ensin hyllystä, jonka jälkeen se käännetään ylösalaisin, jotta siihen saataisiin levitettyä liimat reunoihin erillisellä liimausasemalla. Liiman levittämisen jälkeen kumimatto käännetään takaisin oikeinpäin ja asennetaan paikoilleen.



Kuva 4. *Robotin ohjelmointia Visual Componentsissa*

Visual Componentsissa voidaan robottien ohjelmoimisen lisäksi simuloida ihmisen toimintoja. Operaattorin simuloimiseen käytetään ohjelmiston prosessin mallintamisen työkaluja, jotka ovat erillisiä robotin etäohjelmoimisen työkaluista. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että operaattori määritetään resurssiksi, joka voi suorittaa valittua työtehtävää määrätyn ajan valitulla työpisteellä. Simuloinnissa operaattori ei todellisuudessa asenna mitään komponentteja paikoilleen, vaan ainoastaan visualisoi asennusprosessia ja siihen kuluvaa työaikaa. Operaattorille voidaan myös määrittää kuljetustehtäviä, jolloin operaattori siirtää komponentteja eri tuotannon resurssien välillä, mutta tässä kohdin tämä ei ole tarpeen, koska kaikki kokoonpantavat komponentit ovat yhdellä työpisteellä.

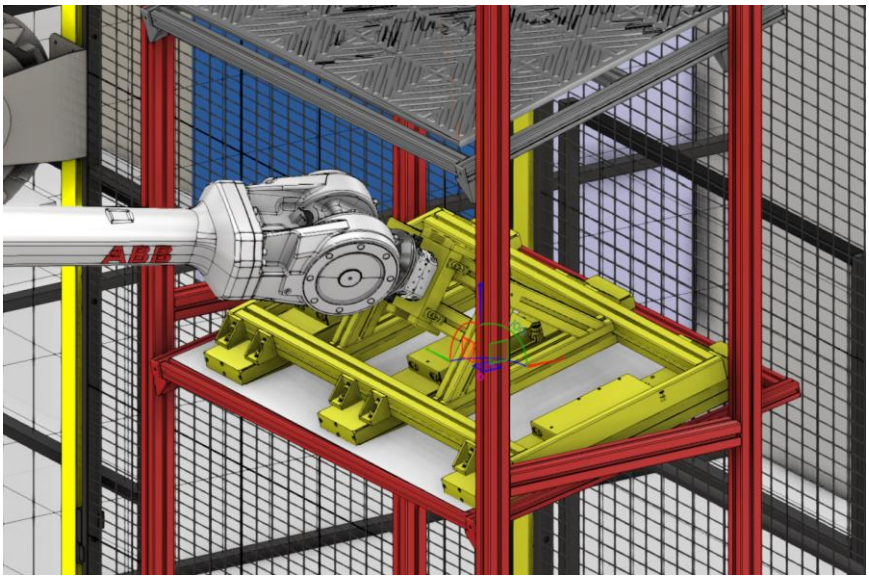


Kuva 5. *Operaattorin simulointia Visual Componentissa*

Simuloinnissa tarvitaan kaksi erillistä työpistettä, joiden välillä operaattori operoi: toinen asennuspöydälle ja toinen asennuspöydän viereen kaapeleiden asentamiseksi paikoilleen pohjalevyyn edellä kuvatun laisesti. Kokoonpanoajat eri työvaiheille on kellotettu manuaalisesta kokoonpanosta ja näitä aikoja käytetään myös simuloinnissa simuloimaan operaattorin työskentelyyn kuluvaa aikaa eri työvaiheissa. Työajat huomioidaan myös robotin pääohjelmassa, jossa robotti tarvittaessa odottaa, että operaattori on valmis edeltävässä työvaiheessa. Sama toiminnallisuus on käytössä myös operaattorilla, jolloin operaattori tarvittaessa odottaa, jos robotilla on vielä edellinen työvaihe kesken.

4. OHJELMAN TESTAUS JA OPTIMOINTI

Kun robotin työohjelmat on luotu, ohjelman toiminta testataan simuloinnilla törmäystarkastelutyökalua hyödyntäen mahdollisten törmäysten havaitsemiseksi ja näiden poistamiseksi (kts. kuva 6). Visual Componentissa törmäystarkasteluun ja virheiden korjaamiseen on olemassa myös oma ohjelman validointityökalunsa, jolla voidaan automatisoida virheiden tunnistamista ja virheiden korjaamista. Simuloinnilla myös tarkastetaan, että robotti pitää kaapeleiden asennuksen yhteydessä pohjalevyä soveltuvalla korkeudella operaattorin nähden työergonomian huomioiden. Simuloimalla huomataan, että operaattorin ja robotin työtehtävät eivät ole ajallisesti tasapainossa. Operaattorilla on luppoaikaa ensinnäkin silloin, kun robotti noutaa pohjalevyä, joka asennetaan ensimmäisenä. Toinen odotusaika on silloin, kun robotti noutaa kumimattoa ja käyttää sen liimausasemalla.



Kuva 6. *Törmäystarkastelu*

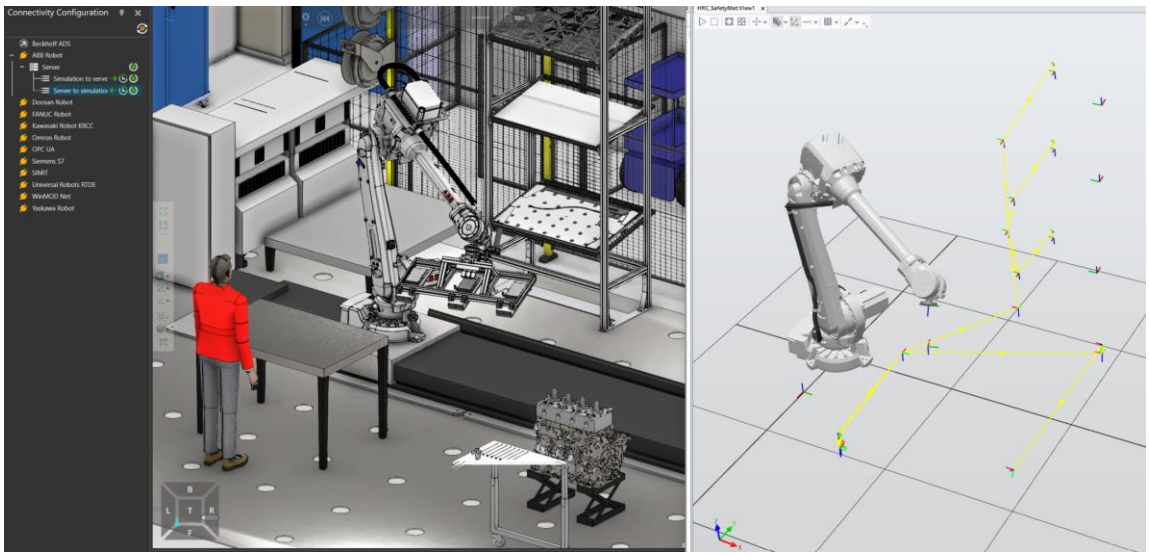
Ensimmäiselle kohdalle ei tässä kohdin voi tehdä oikeastaan mitään, koska kyseessä on ensimmäinen kokoonpanon työvaihe. Operaattorilla ei ole mitään valmistelevia työtehtäviä, joten hän joutuu vain odottamaan, että robotti tuo pohjalevyn asennuspöydän sivuun kaapeleiden asentamiseksi. Toiseen odotukseen pystytään reagoimaan siirtämällä liimausvaihe robotilta ihmiselle. Operaattori ehtii anturikerroksen asentamisen jälkeen levittämään liiman pohjalevyn reunoihin ennen kuin robotti tuo kumimaton asennettavaksi. Tällä tavalla saadaan tasattua robotin ja operaattorin työaikoja ja synkronoitua nämä paremmin toisiinsa nähden. Tämä ei ole tosin ideaalisin tilanne, koska liimaus on pidemmän päälle raskas ja monotoninen työvaihe operaattorille, mutta tuotannollisesti tämä on perusteltu ratkaisu tuotantomäärien kasvattamiseksi. Näin ollen liimaus siirretään operaattorin suoritettavaksi ja robotin ohjelmia muutetaan vastaamaan päivitettyä tilannetta.

5. VIRTUAALINEN KÄYTTÖÖNOTTO

Visual Componentsissa ohjelmointi toteutetaan geneerisillä ohjelmakäskyillä ja ohjelmat testataan geneerisellä robotin ohjaimella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ohjelmat on käännettävä eli postprosessoitava robotin omalle ohjelmointikielelle, jotta ohjelmaa voisi suorittaa todellisella robotilla. Käännöstä varten Visual Componentissa on lukuisia kääntäjiä, joilla luodut ohjelmat pystytään kääntämään roboin omalle natiiville ohjelmointikielelle, tässä tapauksessa ABB:n RAPID-ohjelmointikielelle.

Geneerisiä ohjelmakäskyjä sekä geneerisiä ja virtuaalisia robottiohjaimia käytettäessä on syytä varautua mahdollisiin ongelmiin, joita voi aiheitua, kun ohjelmat luodaan eri ohjelmointikielellä ja eri ohjaimella kuin mitä todellinen robotti käyttää. Käytännössä tämä voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että geneerisellä ohjelmointikielellä toteutettu käsky ei toimikaan halutunlaisesti kääntämisen eli postprosessoinnin jälkeen. Voi myös olla, että geneerisellä ohjaimella toistettu ohjelma ei käyttäydy täysin samalla tavalla robotin omalla merkkikohtaisella ohjaimella esimerkiksi robotin liikealueiden äärirajoilla. Lisäksi on huomioitava, että virtuaalisen ja todellisen ohjaimen välillä on aina eroavaisuuksia esimerkiksi dynaamisten ominaisuuksien osalta, jotka vaikuttavat etäohjelmoidun ohjelman toimintaan fyysisellä robotilla.

Edellä kuvattujen ongelmatilanteiden selvittämiseksi, välttämiseksi ja vaikutusten minimoimiseksi ennen ohjelman käyttöönottamista tuotannossa Visual Componentsin simulointiympäristö yhdistetään ABB RobotStudion eli ABB:n omaan etäohjelmointiohjelmiston kanssa virtuaalista käyttöönottamista varten (kts. kuva 7). Käytännössä virtuaalinen käyttöönottaminen tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että Visual Componentsilla ohjelmoitu robotin työohjelma käännetään ABB:n omalle ohjelmointikielelle, jonka jälkeen käännetty ohjelma ladataan RobotStudiossa olevan robotin virtuaaliselle ohjaimelle, joka on tarkka jäljennös robotin todellisesta ohjaimesta. Lopuksi muodostetaan yhteys RobotStudiossa olevan robotin ohjaimen ja Visual Componentsissa olevan robotin ohjaimen välille, jolloin RobotStudiossa testattavaa ohjelmaa pystytään toistamaan Visual Componentsin simulointiympäristössä. Tarkoituksena on havaita edellä mainittuja mahdollisia ongelmatilanteita robotin toiminnassa, mitkä voivat johtua geneerisen ohjelmointikielen ja ohjaimen käytöstä, ja korjata nämä ennen lopullista käyttöönottoa fyysisellä robotilla, jolloin käyttöönottaminen tuotannossa voidaan suorittaa tehokkaammin.



Kuva 7. *Virtuaalinen käyttöönottaminen*

Virtuaalisesta käyttöönottamisesta oli hyötyä, koska lähtötilanteessa robotin ohjelma toimi virheettömästi Visual Componentsissa, mutta siirryttäessä ABB:n RobotStudioon huomattiin, että ohjelman suoritus keskeytyi robotin poimiessa kappaleita materiaalihyllyn ylimmältä tasolta. Visual Componentissa robotti ylettyi poimimaan kappaleen hyllyn ylimmältä hyllyltä, mutta ei RobotStudiossa mikä johtuu siitä, että Visual Componentissa ei ole käytössä ABB:n robottien ohjainten tarkkoja malleja eikä täten täyttä varmuutta siitä, miten robotti toimii liikealueensa äärirajoilla. Ongelman korjaamiseksi hyllyn ylätasoa laskettiin simuloinnissa alemmas ja ohjelmat kappaleiden poimimiseksi tältä tasolta ohjelmoitiin uudelleen Visual Componentsissa, minkä jälkeen ohjelma testattiin uudelleen samalla tavalla kuin edelläkin. Tällä tavalla saatiin virhetilanne korjattua.

Visual Componentsin ja RobotStudion yhdistäminen keskenään virtuaalista käyttöönottamista varten on vapaaehtoinen työvaihe, joka tässä tapauksessa toteutettiin demonstraation vuoksi. Yhtä hyvin voidaan postprosessoinnin jälkeen siirtyä lopulliseen käyttöönottoon, jolloin on kuitenkin varauduttava mahdollisiin ongelmiin.

6. SIMULOINTIMALLIN KALIBROINTI

Ennen ohjelman käyttöönottoa tuotannossa robottisolun simulointimalli tulee kalibroida vastaamaan reaalimaailmaa, koska reaalimaailmasta mallinnettu malli ei koskaan täysin vastaa todellista ympäristöä. Tyypillisesti kalibroidaan robotin työkalupisteen sijainti ja orientaatio sekä kriittisten komponenttien sijainnit suhteessa robottiin.

Työkalupisteen kalibroinnissa reaalimaailman robotin työkalupisteen sijainti ja orientaatio mitataan itse robotilla useammasta eri kulmasta paikoillaan olevaan kalibrointipiikkiin nähden. Vaihtoehtoisesti tämän sijainti mitataan suhteessa robotin työkalulaippaan. Mitattu sijainti ja orientaatio päivitetään simulointimallin työkalupisteeseen. Tässä tapauksessa kumpaakaan ei tehty, koska alipainetarttujan työkalupiste on keskellä alipainetarttujan pehmeää vaahtomuovista tartuntapintaa, joka puolestaan on 45 asteen kulmassa robotin työkalulaippaan nähden. Kalibrointi olisi tässä tapauksessa ollut työlästä ja virhealtista edellä mainituilla menetelmillä. Näin ollen työkalupistettä ei kalibroitu, vaan luotettiin siihen, että simulointimallissa oleva alipainetarttujan malli vastaa riittävällä tarkkuudella todellista tarttujaa.

Robottisolussa olevien muiden kriittisten laitteiden sijainnit suhteessa robottiin mitataan reaalimaailman robottiin kiinnitetyn kalibrointikärjen avulla. Visual Componentsin tapauksessa jokaisen laitteen sijainnit mitataan kolmella pisteellä, joista yksi on niin sanottu origopiste ja kaksi muuta pistettä ovat origon X- ja Y-akseleilta. Turvamattokokoonpanossa on oleellista kalibroida paitsi asennuspöydän sijainti, niin myös jokaisen hyllypaikan sijainti materiaalihyllystä, koska ne on sijoiteltu eri korkeuksille ja voivat olla eri kulmissa. Hyllyjen kalibroimisen helpottamiseksi hyllyjen alumiiniprofiileihin koneistettiin erilliset kalibrointipiikit, joilla kalibrointi pystytään toteuttamaan tarkemmin kuin vain hyllyjen pyöristetyistä kulmista ja reunoista (kts. kuva 8). Vastaavat kalibrointipiikit löytyvät myös simulointimallista.



Kuva 8. *Materiaalihyllyn kalibrointipiikit ja näiden sijainnit*

Kun jokaisen hyllypaikan ja asennuspöydän sijainnit on määritetty kolmella pisteellä, näiden pisteiden sijainnit XYZ-koordinaatistossa suhteessa robottiin ladataan Visual Componentsiin. Ohjelmiston kalibrointityökalut automatisoidusti kompensoivat simulointimallissa olevat hyllypaikkojen ja asennuspöydän sijaintivirheet vastaamaan todellisuutta eli siirtämällä nämä oikeisiin paikkoihin reaalimaailmaan nähden simulointimallissa. Simulointimallin kalibroimisen jälkeen on aina varmistettava ohjelman toimivuus. Tässä tapauksessa hyllypaikkojen orientaatiot muuttuivat sen verran, että turvamattokokoonpanon levymäisten komponenttien poimintapisteiden sijainteja muokattiin toimivimmaksi törmäysten välttämiseksi.

Kalibrointi voidaan toteuttaa ennen ohjelmointia, mikäli todellinen robottisolu on käytettävissä ennen ohjelmoinnin aloittamista. Tällöin saadaan kerralla valmista ohjelmaa eikä tarvitse tehdä muutoksia ohjelmaan kalibroinnin jälkeen. Tässä tapauksessa tämä ei ollut kuitenkaan mahdollista, koska simuloinnilla pyrittiin optimoimaan hyllypaikkojen sijainnit optimaalisiksi robottiin nähden, jolloin vasta simuloinnin jälkeen hyllyt pyrittiin asentamaan testausympäristössä mahdollisimman lähelle niiden vastaavia paikkoja simuloinnissa. Hyllyjä ei kuitenkaan onnistuttu saamaan täysin oikeille paikoille, jolloin simulointimallin kalibrointi oli välttämätöntä.

7. LOPULLINEN KÄYTTÖÖNOTTO

Kaikkien edellä olleiden vaiheiden jälkeen robotin etäohjelmoitu työohjelma käännettiin viimeisen kerran ABB:n omalle RAPID-ohjelmointikielelle ja ladattiin fyysiselle robotille. Kuten aina käyttöönotto aloitettiin manuaaliajolla, pienillä nopeuksilla, testaten ohjelman toiminta ohjelmarivi kerrallaan. Muutamia yksittäisiä robotin paikoituspisteitä ohjelmassa

jouduttiin hienosäätämään, mikä johtui alipainetarttujan painuvasta vaahtomuovisesta tartuntapinnasta, jonka painumista ei ollut otettu huomioon riittävällä tarkkuudella simuloinnissa. Muutoin ohjelma toimi kuten pitikin ja ohjelman suoritus siirrettiin automaattiajolle. Automaattiajon aikana yksittäisten liikkeiden nopeuksia jouduttiin laskemaan silloin, kun robotti käsitteli pohjalevyä ja oli kallistamassa tätä vaakatasosta pystytasoon, jotta operaattori saisi pujotettua siihen tarvittavat kaapelit robotin pitäessä pohjalevyä paikoillaan. Tämä sen takia, koska alipainetarttujan alumiininen runko alkoi värähtelemään työkalua käännettäessä vaakatasosta pystytasoon pohjalevyn kanssa, mikä ei ollut havaittavissa simuloinnissa eikä manuaaliajolla matalilla nopeuksilla.




```
!Subprogram - Place middle level
PROC PlaceMiddleLevel()
    MoveJ pHomeSafetyMat,v100,z0,tSafetyMatGripper\WObj:=wTable;
    MoveJ pPlaceMiddleLevelOffset,v100,fine,tSafetyMatGripper\WObj:=wTable;
    MoveL pPlaceMiddleLevel,v20,fine,tSafetyMatGripper\WObj:=wTable;
    GripperVacuumOff;
    MoveL pPlaceMiddleLevelOffset,v50,z0,tSafetyMatGripper\WObj:=wTable;
    MoveJ pHomeSafetyMat,v100,z0,tSafetyMatGripper\WObj:=wTable;
ENDPROC
```

Kuva 9. *Yläpuolella esimerkki Visual Componentsin geneerisistä ohjelmakomennoista ja alapuolella samat ohjelmakomennot RAPID-ohjelmointikielellä*

Robotin liikeratojen optimoimisen jälkeen robottisolun turvatoiminnallisuudet määritettiin ja varmistettiin tarvittavilta osin. Testausympäristössä olevat turvalaitteet (valoverho ja ovikytkin) yhdistettiin robotiin ja ihmisen ja robotin kommunikointiin tarkoitettu ohjauskotelon toiminnallisuudet määritettiin osaksi robotin ohjelmaa. Ohjauskotelon Hyväksyntäpainikkeella sallitaan robotin siirtyminen ihmisen ja robotin yhteistyöalueelle sen jälkeen, kun robotti on hakenut jonkin osan hyllystä. Ohjauskotelon Pysäytys-painikkeella pysäytetään robotti, jolloin ohjelman suoritus siirretään TRAP-silmukkaan, jossa suoritettavien resetointitoimintojen jälkeen robotin ohjelmaa voidaan jatkaa normaaliin tapaan. Lisäksi robotille määriteltiin ohjelmallisesti rajattu työalue tarpeettomien törmäysten ja vaaratilanteiden välttämiseksi ABB:n SafeMove-työkalulla.

8. YHTEENVETO

Tässä teknologiademossa esiteltiin, kuinka ihmisen ja robotin yhteistyötä voidaan hyödyntää tuotteen kokoonpanossa. Demossa huomattiin, kuinka turvamattokokoonpanon raskaimpien osien käsittely saatiin siirrettyä robotin tehtäväksi ja sorminäppäryyttä vaativien kappaleiden asentaminen ja kytkennät operaattorille. Ihmisen ja robotin yhteistyön muotona oli pääsääntöisesti vuoroittainen yhteistyö, jossa molemmat kokoavat vuorotellen samaa tuotetta asennuspöydällä. Ihminen ja robotti tekivät myös hyvin rajatusti aitoa yhteistyötä tuotteen kokoonpanemiseksi, kun operaattori pujotti kaapelit paikoilleen robotin pidellessä pohjalevyä. Lopputuloksena ihmisen työkuormaa saatiin pienennettyä raskaiden osien käsittelyn poistuessa.

Erityisenä näkökulmana teknologiademossa oli OPLITE-hankkeen mukaisesti, kuinka simulointia ja robottien etäohjelmointia voidaan hyödyntää sovelluksen suunnittelussa ja ohjelmoimisessa. Teknologiademossa huomattiin, kuinka etäohjelmoinnilla pystyttiin huomattavasti tehokkaammin ohjelmoimaan robotin ohjelmat kuin perinteisellä käsiohjaimella ohjelmoitaessa. Etäohjelmoinnilla pystyttiin myös lyhentämään lopulliseen käyttöönottoon käytettävää aikaa. Toki tässä kohdin etäohjelmointia edes auttoi jo valmiiksi mallinnettu simulointimalli robottisolusta, johon tarvitsi vain sijoittaa turvamattokokoonpanon komponentit. Mikäli etäohjelmointi olisi aloitettu alusta alkaen olisi tähän kulunut huomattavasti enemmän aikaa, mutta simulointimallin rakentaminen robottisolusta on tyypillisesti kertaluonteinen työpanos, mikäli tähän ei tehdä muutoksia tulevaisuudessa.

Ihmisen simuloinnilla pystyttiin puolestaan parantamaan työntekijän työergonomiaa, kun simuloinnin perusteella pystyttiin esimerkiksi määrittämään, mikä on optimaalinen korkeus pohjalevylle, kun operaattori on asentamassa siihen kaapeleita. Simuloinnilla pystyttiin myös huomaan selkeä pullonkaula solun toiminnassa, kun alkuperäisessä suunnitelmassa robotti olisi käyttänyt kumimaton erillisellä liimausasemalla. Kun liimaus annettiin operaattorin suoritettavaksi, saatiin pullonkaula poistettua ja lyhennettyä solun läpimenoaikaa merkittävästi.

Teknologiademossa huomioitiin robottisolun turvallisuus erilaisilla turvalaitteilla, robotin ohjelmallisilla liikerajoituksilla sekä käyttäjän perehdyttämisellä. Jatkotutkimuksen kohteena on toteuttaa kattava riskinarviointi sovellukselle ja määrittää ovatko nykyiset turvatoimenpiteet riittävät turvalliselle ihmisen ja robotin yhteistyölle.