



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Camilla Pöysti

Kobottiikan käyttö piirilevytestauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan

Insinöörityö

04.05.2020

Tekijä Otsikko	Camilla Pöysti Kobotiikan käyttö piirilevytestauksessa
Sivumäärä Aika	36 sivua 04.05.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	automaatiotekniikka
Ohjaajat	lehtori Antti Liljaniemi lehtori Timo Tuominen
<p>Opinnäytetyö tehtiin Enics-nimiselle, elektroniikkaan keskittyneelle yritykselle. Työn tarkoituksen oli selvittää, onko automatisointi mahdollista toteuttaa kobotiikan avulla piirilevytestauksessa. Työssä tutkittiin Universal Robotsin UR3-kobotin ja ABB YuMi-kobotin soveltuvuutta automatisoinnin toteutukseen.</p> <p>Työn ensimmäisessä vaiheessa kummastakin vaihtoehdosta luotiin simulaatio. UR3-kobotia simuloitiin Visual Components -yrityksen ohjelmalla, mutta simulaation lopputuloksen perusteella ei voitu olla varmoja, sopiiko UR3 tehtävään vai vaatisiko työ suuremman kobotin eli UR5:n. YuMi simuloitiin käyttäen ABB:n Robot Studiota, jolla ei myöskään voitu varmistua kobotin soveltuvuudesta automatisointiin.</p> <p>Työn toisessa vaiheessa kobotteja testattiin Metropolian tiloissa yritykseltä lainaan saadulla aidolla testilaitteella. Testauksen tuloksena voitiin todeta, että YuMi ei kyennyt suorittamaan annetuista tehtävistä toisin kuin UR3, joka suoritti tehtävät moitteettomasti.</p> <p>Tämän lisäksi työssä on laskettu viitteelliset takaisinmaksuajat koboteille, arvioitu investoinnin kannattavuutta sekä pohdittu, miten työtä voitaisiin jatkokehittää, jotta kyseinen automatisointi voitaisiin tulevaisuudessa asiakkaan niin halutessa toteuttaa.</p>	
Avainsanat	Kobotti, UR3, YuMi, automatisointi

Author Title	Camilla Pöysti Use of Cobotics in Circuit Board Testing
Number of Pages Date	36 pages 4 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Automation Engineering
Instructors	Antti Liljaniemi, Senior Lecturer Timo Tuominen, Senior Lecturer
<p>This thesis work was made for Enics which operates in electrical industry. The purpose of this thesis work was to study which cobot would be a better fit for the client's poletesting unit automation project. This unit has been designated for circuit board testing. A comparison was made between ABB's YuMi two handed cobot and Universal Robot's UR3 single handed cobot.</p> <p>In the first part of this thesis work computer simulations were created for each cobot. The UR3 was simulated with Visual Components 4.2 application and YuMi was simulated with ABB's Robot Studio application. Neither of the simulations gave clear answer whether the cobots would be able to manipulate the cover of the test device.</p> <p>In the second part of the work the simulations were implemented in the real world using real cobots and a test device borrowed from the client company. The tests were conducted in Metropolia's automation laboratory, as transferring the test equipment was not possible.</p> <p>As a result of testing, it was found that YuMi is incapable of performing the assigned tasks. On the other hand, UR3 performed brilliantly in the equipment testing. In addition, the financial prospect of a possible acquisition was evaluated. Return of investment period for the acquisition was calculated, and the profitability of using a cobot in the application during a 7-year life cycle was evaluated. Also further development of a possible implementation was studied.</p>	
Keywords	Cobot, UR3, YuMi, Automatisation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Lähtökohta	1
1.2	Suurimmat haasteet	2
2	Yritys	3
3	Manipulaattorityypit	4
3.1	Robotti	4
3.2	Teollisuusrobotti	4
3.3	Kobotti	6
3.3.1	Erilaisia kobotteja	6
4	Käytetyt kobotit ja niiden simulointiohjelmat	10
4.1	UR3	10
4.2	YuMi – IRB 14000	11
4.3	Visual Components	13
4.4	Robot Studio	14
5	Työn kulku	15
5.1	Simulointi	15
5.1.1	UR3	15
5.1.2	YuMi	18
5.2	Laitetestaus	19
5.2.1	UR3	19
5.2.2	YuMi	22
6	Investoinnin kannattavuus	25
6.1	Työntekijän kustannukset testauksessa ja kobotin kokonaishinta	25
6.2	Takaisinmaksuaika	26
6.3	Nykyarvomenetelmä	27

7	Kobottien kelpollisuus tehtävään ja jatkokehityssuunnitelmat	29
7.1	Soveltuvien kobottien automatisointiin	29
7.2	Jatkokehitys	30
8	Yhteenveto	33
	Lähteet	34

Lyhenteet

CAD	Computer Aided Design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
I/O	Input/Output. Siirräntä. Tietojenkäsittelyjärjestelmä, joka pohjautuu tulo- ja lähtötietoihin.
OPC UA	Open Platform Communications Unifield Architecture. OPC-säätiön kehittämä koneiden välinen viestintäprotokolla teollisuusautomaatioon.
QR-koodi	Ruutukoodi. Kaksiulotteinen neliön muotoinen koodikuvio, johon on ohjelmoitu informaatiota.
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm. Käsivarsirobottien yksi perusmalleista.

1 Johdanto

Insinööriyössä tutkitaan kahden valmistajan (ABB ja Universal Robots) kobottien (YuMi ja UR3/5) soveltuvuutta piirilevyjen tolppatestaukseen. Automatisointia päädyttiin tutki-
maan kobottiin keinoin, koska asiakkaan, Enic-nimisen yrityksen, tiloissa ei ole riittä-
västi tilaa robotille, joka tarvitsee turvallisuussyistä aidat ympärilleen. Kobotin kanssa
etuna on pieni tilan tarve ja turvallisuus, sillä tämän tyyppiset robotit on suunniteltu niin,
että ne pysähtyvät heti, jos ne havaitsevat, että liikeradalla on este.

1.1 Lähtökohta

Automatisointia kobottiin keinon lähdeksi tutkimaan tehtaan nykyisen testausyksikön
esineiden sijoittelun pohjalta, sillä testilaitteyksikköä kokonaisuudessaan ei haluttu siirtää
ja erottaa muista testauspaikoista tai uudelleenjärjestää. Tilaa on käytössä rajallisesti,
mikä on otettu huomioon tätä työtä tehdessä. Tavoitteena on luoda toimiva testausalue,
jota kobotti pystyisi käyttämään itsenäisesti ihmisen pienellä avustuksella.

Testausasema täytyy ihmisen vaihtaa automatisoinnin jälkeenkin, ja tätä varten on otet-
tava huomioon, että kobotti ei ole silloin tiellä. Kobotin pitää pystyä avaamaan testilait-
teen kansi, jotta automatisointi olisi mahdollista. Kannessa on hampaat, jotka pitävät
kannen alhaalla testauksen ajan, ja ne vapautetaan kahvasta kääntämällä rintamasuun-
nasta noin 30 astetta pois päin. Tämän jälkeen tulee vielä avata ympyräkaarta pitkin au-
keava kansi. Kobotti tulee mitoittaa niin, että se yltää avaamaan kannen kokonaan, sillä
testilaitetta ei voi muokata kobotille sopivaksi.

Työssä on tutkittu UR3- ja YuMi-kobotin kykyä suoriutua edellä mainituista tehtävistä
sekä testilaitteen kannen sulkemisesta, testattavien kappaleiden asettelemisesta testi-
laitteeseen sekä niiden pois ottamisesta. Kobotin on myös lajiteltava hyväksytyt ja hylätyt
kappaleet toisistaan asiakkaan haluamalla tavalla.

Jos kobotit soveltuvat edellisten kriteerien jälkeen kyseiseen automatisointikohteeseen,
tulee ratkaista vielä konenäön avulla testattavien tuotteiden tunnistaminen ja määrätie-

don selville saaminen. Lisäksi konenäön avulla tulisi paikallistaa missä testattavat komponentit tarjottimella sijaitsevat. Konenäkö voidaan joutua rajaamaan opinnäytetyöstä pois, jos kobottien tutkimiseen menee suurin osa tutkimusajasta.

Tämän lisäksi tarkoituksena on tehdä laskelmia kobottien takaisinmaksuajoista sekä investoinnin kannattavuudesta ja verrata näitä yrityksen henkilötyövuoden kustannuksiin. Näitä laskelmia hyväksi käyttäen olisi tarkoitus kartoittaa automatisoinnin kannattavuutta. Laskelmat ovat myös tarkoitettu yrityksen päätöksentekoa helpottamaan.

1.2 Suurimmat haasteet

Asiakkaan piirilevyt testataan laitteella, jossa on kansi, jonka kobotin tulisi saada auki. Kannen avaamiseksi on ensin käännettävä kahva pystyasennosta noin 30 astetta kobotista pois päin, jotta kannen kiinni pitävät hampaat avautuvat. Kun hampaat on saatu vapautettua, tulisi kobotin nostaa kansi auki. Kannen aukeamisen liikerata on suoraan verrattavissa ympyrän kaareen, kun ympyrän nollakohdasta kuljetaan 90 astetta vastapäivään. Tämä kannen avaus on suunniteltu täysin ihmiselle ja tulee tuottamaan suuria ongelmia kobotille, jos kansi ei pysy puoliksi avattuna niin, että kobotti voi vaihtaa avauspistettään.

Toinen huomioon otettava haaste on se, että testilaitte täytyy yhä ihmisen vaihtaa toiseen, kun testattava tuote vaihtuu. Testilaitte on niin painava, että ihminen ei jaksakaan nostaa sitä, jos hän ei pääse suoraan edestäpäin ottamaan laitetta pois paikaltaan. Tämä aiheuttaa sen, että kobotin täytyy olla joko sijoitettu niin, että ihmisellä on esteetön pääsy testerin eteen tai että kobotti on siirrettävissä syrjään testerin vaihdon ajaksi.

Haasteeksi voidaan myös luokitella kobotin kannattavuus, sillä jos solun käyttöaste on pieni ja kobottiratkaisu kallis, takaisinmaksuaika venyy pitkäksi, jolloin automatisointi ei ole kannattavaa. Tässä tapauksessa tulee kuitenkin huomioida myös ihmistyövuoden hinta ja ottaa se mukaan vertailuun, koska jos automatisointia ei suoriteta, tulee ihmisen tehdä tämä työ.

2 Yritys

Enics on yksi maailman suurimmista elektroniikan valmistuspalveluntarjoaja teollisessa elektroniikan maailmassa. Yritys on perustettu vuonna 2004, mutta sen juuret ulottuvat 1960-luvulle. Enicsillä on kahdeksan tehdasta Euroopassa ja Aasiassa, ja se työllistää 3700 henkilöä. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Zürichin kaupungissa Sveitsissä. Enics toimii monilla eri elektroniikan alueilla, mm. instrumentoinnissa ja mittauksessa, lääketieteessä, teollisuusautomaatiossa, rautateillä, hisseissä ja liukuportaissa, rakennushalinnassa, turvallisuudessa ja energiateollisuudessa. Yrityksen liikevaihto vuonna 2018 oli 534 miljoonaa euroa. (1.)

Suomessa Enicsillä on kaksi toimipistettä, jotka sijaitsevat Lohjalla ja Raahessa. Suomen-yksikön toimitusjohtajana toimii Keijo Uusimaa. Enics Finland tarjoaa täyden elinkaari palvelun, joka pitää sisällään suunnittelun, valmistuksen ja huoltopalvelut. (2.)

3 Manipulaattorityypit

3.1 Robotti

Robotti on lainasana suomen kielessä ja se tulee tšekin kielen sanasta robota, joka tarkoittaa pakkotyötä tai raatamista. Sanaa käytti ensimmäisen kerran kirjailija Karel Čapek näytelmässään R.U.R Rossum's Universal Robots, jonka ensi-ilta oli 1920. (3.) Robotin määritelmä on vaihtunut vuosien saatossa tieteen ja tekniikka kehittyessä, mutta määritelmä vaihtelee myös sen mukaan, keneltä määritelmää pyydetään. Kielitoimiston sanakirjan mukaan robotti on

Mekaanista ihmistyötä korvaava automaattilaite (4).

Toisen määritelmän mukaan robotti on autonomisesti toimiva systeemi, joka toimii fyysisessä maailmassa havainnoiden ympäristöään ja reagoimalla sen muutoksiin saavuttaaksensa päämääriä (5, s. 2).

3.2 Teollisuusrobotti

Teollisuusrobotille on olemassa myös monta määritelmää mutta paras määritelmä löytyy ISO 8373 -standardista:

Automaattisesti ohjattu, uudelleenohjelmoitava, monikäyttöinen manipulaattori, jossa voidaan ohjelmoida kolmea tai useampaa vapausastetta ja joka voi olla kiinteästi paikallaan tai liikkua teollisessa automaatiosovelluksessa (6, s. 185).

Standardissa luokitellaan teollisuusrobotit kuuteen pääryhmään niiden rakenteiden mukaan:

- suorakulmainen robotti, jolla kolme ensimmäistä niveltä liikkuvat suoraviivaisesti ja yhdistyvät suorakulmaisen koordinaatiston suuntiin (6, s.184).
- sylinterirobotti, jonka kädet koostavat sylinterikoordinaatiston ja jonka vähintään yksi nivel on toteutettu kiertyvällä nivelellä (6, s.184).

- napakoordinaatistorobotti, jonka nivelistä yksi on lineaarinen ja kaksi kiertyviä ja jonka käsivarren nivelet luovat napakoordinaatiston (6, s.181).
- SCARA-robotti, kokoonpanokäsivarsirobotti, jonka rakenne joustaa tiettyyn suuntaan (6, s.183).
- kiertyvänivelinen robotti, jolla kaikki tukivarret on kytketty toisiinsa peräkkäin ja nivelet ovat kiertyviä (6, s.180 (kuva 1)).
- rinnakkaisrakenteinen robotti, jonka kaksi tai useampi toimilaitetta on kytketty rinnakkain ja ne vaikuttavat yhtä aikaan jaetun tukirakenteen asentoon ja paikkaan (6, s.183).



Kuva 1. ABB:n kiertymänivelinen teollisuusrobotti (7).

Kuvasta 1 voidaan havaita, että teollisuusrobotit vaativat suuret turva-aidat ympärilleen estämään ihmisten joutumista robotin työalueelle, jotta tapaturmilta ja omaisuusvahingoilta vältyttäisiin. Robotin työskentelyalueen aitaaminen kuitenkin vie paljon lattiapinta-alaa, ja tämä saattaa nousta suureksi ongelmaksi robotisointia harkittaessa.

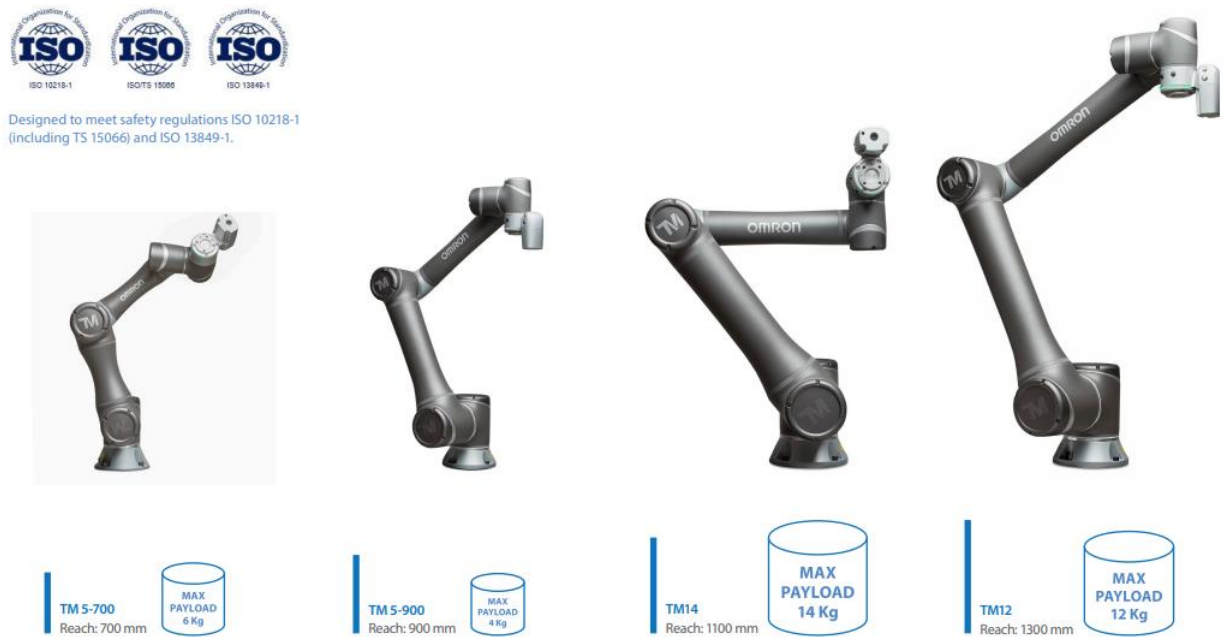
3.3 Kobotti

Kobotti eli yhteistyörobotti on laite, joka työskentelee ihmisen kanssa joko suorassa kontaktissa tai turvallisesti hyvin lähellä ihmistä. Kobotit on anturoitu niin, että jos sen liikeradalle sattuu este, kuten ihminen, se pysäyttää kobotin kaiken liikkeen, jotta ihmiselle tai ympäristölle ei aiheudu vaaraa. (8, s. 1) Kobotit ovat yleisesti ottaen käsivarsirobotteja. Kobotit voidaan jakaa neljään ryhmään sen mukaan, miten ne työskentelevät ihmisen kanssa (8, s. 2):

- Rinnakkaistyöskentelyssä kobotin ja ihmisen välissä ei ole aitaa mutta kummallakin on oma työtilansa eivätkä ne ole yhteydessä toisiinsa.
- Peräkkäisessä työskentelyssä kobotti ja ihminen jakavat saman työskentelytilan mutta suorittavat työvaiheet vuorotellen.
- Yhteistyöskentelyssä kobotti ja ihminen työskentelevät saman tuotteen parissa yhtäaikaaisesti.
- Reagoivassa yhteistyössä kobotti reagoi ihmisen liikkeisiin reaaliaikaisesti.

3.3.1 Erilaisia kobotteja

Omron on kehittänyt markkinoille käsivarsimallisia kobotteja, joilla kaikilla on kuusi niveltä ja mallin mukaan vaihtelevat kuormat, joita ne jaksavat nostaa, ja matka, jolle ne ylettyvät. Omronilla on tällä hetkellä neljä kobottimallia, jotka jaksavat nostaa mallin mukaan 4–14 kg:n taakkoja ja ylettävät 700–1300 mm:n päähän. Kuvassa 2 on havainnollistettu mallien kykyä nostaa taakkaa. Nämä kobotit on suunniteltu niin, että ne on helppo opettaa tekemään työnsä ilman konkreettista koodaamista. Näihin kobotteihin on sisäänrakennettu älykäs kamerasysteemi, jonka avulla kobotti pystyy tunnistamaan kappaleiden asennon, hahmottamaan niiden keskenään muodostaman kuvion ja paikantamaan ne kuvatiedon avulla sekä lukemaan viivakoodeja. Nämä kobotit ovat monipuolisia ja mukautuvat moniin tehtäviin, kuten koneen hoitoon, pakkaamiseen, purkamiseen, koostamiseen, liimaukseen, testaukseen ja juottamiseen. Nämä käsivarsikobotit on myös mahdollista liittää Omronin kehittelemään mobiilirobotti Lynxin kyytiin. (9.)



Kuva 2. Omronin neljä eri mallia käsivarsikoboteista (9).

Kuka on kehittänyt oman käsivarsikobotin LBR iiwa, joka esiintyy kuvassa 3. Iiwaa pidetään markkinoiden herkimmäksi robotiksi, koska sillä on jokaisessa nivelessä voimanturit, joiden avulla se tunnistaa pienenkin vastuksen sen liikkeiden esteenä, ja tämä pysäyttää järjestelmän. Iiwa pystyy nostamaan 7–14 kg kerrallaan ja ylettää 800–820 mm:n päähän itsestään. Kobotin voi ohjelmoida kolmella eri tavalla käyttöön, joista yksi tapa on opettaa kobotti asettamalla kobotti eri kohtiin fyysisesti käsin ohjaten. Iiwa voidaan mallin mukaan asentaa lattialle, seinälle tai kattoon käyttötärpeiden mukaisesti, ja osa malleista soveltuu puhdastilakäyttöön. Iiwa pystyy erilaisiin työtehtäviin, kuten koonpanotehtäviin, liimaukseen, maalaukseen, mittaamiseen, tarkastamiseen, pakkaamiseen, tuotteiden käsittelyyn, pakkaamiseen ja koneistukseen. Tämän lisäksi myös liwan voi asentaa mobiilirobotin päälle. (10.)



Kuva 3. Kukan iiva kobotti ilman tarttujaa (11).

Fanuc on myös kehittänyt kobottisarjan, mutta poiketen muista valmistajista se on lähtenyt kehittämään kobotteja teollisuusrobotin näköisiksi, minkä voi huomata kuvasta 4. Kaikissa Fanucin valmistamissa koboteissa on kuusi niveltä, ja ne pystyvät mallin mukaan nostamaan 4–35 kg:n massan ja ylettyvät 550–1813 mm:n päähän itsestään. Itse kobotit painavat 48–990 kg, mikä tekee Fanucin koboteista kaikkein painavimpia esitellyistä vaihtoehtoista, ja tämä voi osoittautua haasteeksi joissain kohteissa. Kobotit voidaan kiinnittää CR-35iA-mallia lukuun ottamatta joko lattialle, pöydälle, seinälle, kattoon, mobiilirobotin kyytiin tai kiskolle. (12.)



Kuva 4. Fanucin havainnekuva omien kobottiensa koosta ihmiseen verrattuna (13).

Fanucin kobotit voidaan opettaa kädestä pitäen työhönsä, joten tavallista ohjelmointia ei välttämättä tarvita. Myös nopea iHMI-ohjelmointi on mahdollista käsiohjaimen avulla. Kobotteihin on saatavilla lisäosa, joka mahdollistaa ihmisen nostaa kobotilla painavia esineitä. Koboteilla on +/- 0,01–0,03 mm:n toistotarkkuus, ja niille on kehitetty oma simulaatio-ohjelma Roboguide, jossa kobottien soveltuvuutta kaavailtuun tehtävään voidaan tutkia ennen kobotin ostoa. Fanucin kobotit soveltuvat moniin eri tehtäviin, kuten kokoonpanoon, tiivistykseen ja levitykseen, pakkaamiseen ja palletointiin, koneen käyttöön, osa tarkastukseen, testaukseen ja tuotteiden käsittelyyn. Fanucin kobotteihin voidaan liittää mikä vain älykäs työkalu, joka on suunniteltu Fanucin roboteille. Fanuc tarjoaa myös ympärivuorokauden tukea ongelmatilanteiden varalta ja tarjoaa asiakkailleen koulutuksia, jotta niiden työntekijät olisivat mahdollisimman päteviä toimimaan robottien ja kobottien kanssa. (12.)

4 Käytetyt kobotit ja niiden simulointiohjelmat

4.1 UR3

UR3 on Universal Robots -yrityksen pienin käsivarsikobotti. Tämä kobotti painaa 11,2 kg, sillä on kuusi niveltä, ja se ylettää omasta keskipisteestään aina 500 mm:n päähän. Kobotti jaksaa nostaa valmistajan mukaan 3 kg:n taakan ja pyörii 360 astetta itsensä ympäri. Kobotti on pöytämallinen, eli se voidaan kiinnittää tasaiselle alustalle melkein pä mihin vain. (14.) Vaihtoehtoisesti se voidaan asentaa myös mobiilirobotin päälle. Kuvassa 5 on UR3-mallinen robotti, ja siinä havainnollistetaan liikkuvien nivelten määrää.



Kuva 5. UR3-mallinen Universal Robots -yrityksen käsivarsikobotti (15).

UR3-malli julkaistiin Yhdysvalloissa, Chicagossa, maaliskuun 23. päivä 2015. Kobotin ovat suunnitelleet tanskalaiset kobottien edelläkävijät, ja se oli julkaisuhetkellä markkinoiden pienin ja kevyin kobotti. UR3-kobotissa on turvallisuus huomioitu kobotin liikkeiden voiman säädöllä. Kobotin käyttämä voima voidaan rajoittaa normaalista 150 N:sta aina 50 N:iin. UR3 suoriutuu juottamisesta, liimaamisesta, ruuvauksesta, maalauksesta, käsityökalujen käytöstä, laboratoriotyöstä, vetokaapissa työskentelystä ja poimi ja aseta -tyyppisistä töistä. (16.)

Kuvassa 6 on esitelty UR3-kobottiin liitettävää laitekokoisuutta, joka mahdollistaa kobotin työskentelyn kokoonpano- tai testaustehtävissä. Ensimmäisenä kobotista päin katsottuna on voima-anturi, joka havainnoi voiman muutoksia ja ehkäisee kobottia runnomasta kappaleita pakolla paikkoihin, johon ne eivät mahdu. Keskimmäisenä osana on kamera, jonka avulla kobotin ohjelmisto tunnistaa poimittavan laitteen ja mahdollisesti tunnistaa poimittavan kohteen identiteettitiedot. Alimmaisena on kobotin tartuntatyökalu, jolla kobotti poimii kameralla paikannetun kohteen ja tarttuu siitä kiinni hellävaraisesta murskaamatta sitä. Tämän mahdollistaa kobotin sisäänrakennetut voima-anturit, jotka tunnustelevat tarttujaa vastustavia voimia. (18; 19.) Kuvassa 6 esitelty kokonaisuus on vain yksi mahdollisista työkalukombinaatioista, joita Universal Robotsin kobotteihin voidaan liittää.



Kuva 6. UR3-robotille mahdollinen työkaluyhdistelmä (17).

4.2 YuMi – IRB 14000

YuMi on ABB:n ensimmäinen yhteistyörobotti, jonka yritys on tuonut markkinoille. YuMi on kaksikäätinen yhteistyörobotti kuten kuvasta 7 voi havaita. Kumpikin käsi jaksaa nostaa 0,5 kg:n painoisia kappaleita, ja tästä syystä se on kohdennettu pienien kappaleiden

kokoonpanoteollisuudelle. YuMi painaa 38 kg ja on pöydälle asennettava. Tämä yhteistyörobotti ylittää 559 mm:n päähän itsestään poimimaan kappaleita, ja sen toistotarkkuus on +/- 0,02 mm. (20, s. 9.)

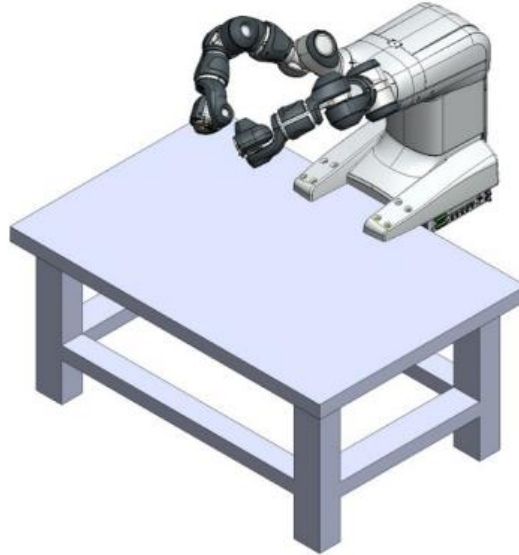


Kuva 7. ABB:n kaksikäsinen yhteistyörobotti YuMi (20).

YuMi on ESD-suojattu, joten se sopii loistavasti komponenttikokoonpanolinjoille. Lisäksi kobotti on puhdistuskelvoinen, sillä se täyttää ISO 5 -tason vaatimukset ja se on myös saanut IP 30 -luokituksen. (20, s. 13.) YuMille on mahdollista saada erilaisiin tehtäviin erilaisia integroitavia tarttuvia, joissa on erilaisia ominaisuuksia kuten kamera, paineilma, servomoottorit, kommunikaatio ja ilma sekä monivaihtoehtotarttuvia, jossa on viisi vaihtoehtoa. (20, s. 21.) Näiden ominaisuuksien takia YuMi on suunniteltu erityisesti työskentelemään elektroniikka-, autoteollisuuden elektroniikka-, kuluttajatuote-, kosmetiikka- ja lelutehtaissa sekä muilla teollisuuden osa-alueilla, joissa on pienien osien kokonpanoa. (20, s. 5.)

YuMin kädet on pehmustettu täysin turvallisuuden lisäämiseksi ja tästä syystä sitä voidaan valmistajan mukaan ajaa nopeammin kuin normaalia kobottia (21, s.16). Pehmusteet näkyvät kuvassa 7 harmaina osina. YuMi eroaa huomattavasti muista koboteista seitsemällä käden nivelellään ja kiinnitystavallaan. Usein kobotti kiinnitetään pöytään tai alustaansa koko ”jalanjälkensä” kokoiselta alueelta mutta YuMilla on jalan näköiset ulokkeet, joista se kiinnitetään pöydän reunaan ja suurin osa YuMin ”jalanjäljestä” ei vie tilaa

pöydältä vaan reunan ulkopuolelta, kuten kuvassa 8 havainnollistetaan. YuMin oma jalanjälki on kooltaan 339 mm * 497 mm, mutta siinä ei eritellä pöydällä olevaa osuutta eikä pöydän ulkopuolella olevaa aluetta. (20, s. 9.)



Kuva 8. YuMi asennettuna kiinni pöytään (20, s. 12).

4.3 Visual Components

Visual Components on yritys, joka on perustettu vuonna 1999 simulaatioasiantuntiyhtiön toimesta. Yritys on tällä hetkellä johtava 3D-valmistuksen simulointiohjelmistojen ja -ratkaisujen kehittäjä. Visual Componentsin pääkonttori sijaitsee Espoossa, ja yrityksellä on sivukonttoreita Lake Orionissa, Michiganissa ja Saksan Münchenissä. Tämän lisäksi yrityksellä on maailmanlaajuinen kumppanien ja myyjien verkosto. Visual Components työllistää tällä hetkellä 70 henkilöä 20 eri maassa. (21.)

Tässä opinnäytetyössä käytettiin Visual Components Premium 4.2 -sovellusta, jolla suoritettiin UR3-kobotin simulaation teko. Tämän versio mahdollistaa suunnittelumallien konfiguraatiot, CAD-mallien yhteensopivuuden, valmiit projektitoimitukset, yksinkertaisen ja kehittyneen robotiikkamallinnuksen, prosessimallinnuksen sekä komponentti mallinnuksen. (22.)

Yritys on panostanut erityisesti ohjelman käyttämisen opettamiseen ja tukemiseen. Se on luonut suuren kirjaston opetusvideoita, joita tulee lisää jatkuvasti. Videoiden sisältö on selkeästi esitelty videon vieressä aiheina. Videoilla käydään asiat läpi perinpohjaisesti ja selkeästi selitettynä. Opetusvideokirjaston lisäksi yritys on luonut foorumin, jossa ongelmastaan voi keskustella maailmanlaajuisesti kaikkien käyttäjien kesken. Lisäksi sillä on nopea asiakastuki, joka auttaa mielellään ongelmien kanssa. Yritys järjestää myös koulutuksia ja seminaareja, joissa käyttämistä tuetaan ja opetetaan.

4.4 Robot Studio

ABB on teknologiateollisuuden yksi johtavista yrityksistä, joka työllistää yli 100 maassa noin 147 000 henkilöä. Suomessa ABB työllistää noin 5 400 henkilöä. Yritys on perustettu vuonna 1988. ABB:n neljä pääaluetta bisneksessä, joihin se keskittyy, ovat Electrification, Industrial Automation, Motion ja Robotics & Discrete Automation, ja näitä kaikkia yhdistää se, että niitä tukee yhteinen ABB Ability -alusta. (23.)

Opinnäytetyössä on käytetty Metropolian innovaatioprojektin luomaa simulaatiota YuMi-kobotin käytöstä automatisoinnissa; tämä simulointi on toteutettu ABB:n Robot Studio-sovelluksella. Robot Studio mahdollistaa simuloinnin ja offline-ohjelmoinnin ABB-robottien investointien hyötyjen maksimoimiseksi. Ohjelma on rakennettu ABB VirtualControllerin päälle, joka on täysi kopio oikeain robotin ohjelmistosta. Tämä mahdollistaa realistisen simulaation. Ohjelman käytöllä voidaan saavuttaa riskien vähentyminen, nopea käynnistys, lyhyempi vaihtoaika ja lisääntynyt tuotanto. (24.)

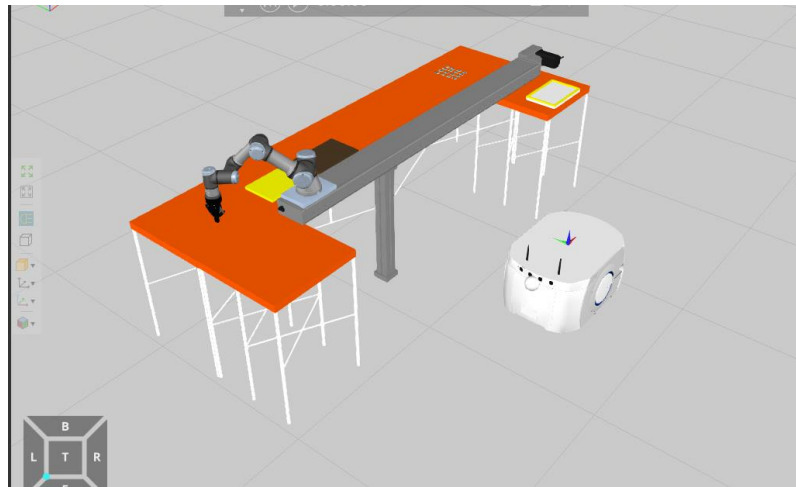
Käytön opetteluun tueksi ABB on luonut opetusvideoita, käyttäjä foorumin ja kehityskeskuksen. Videot ovat lyhyitä, erittäin tiivistettyjä ja vain Getting Started -videoissa on selostettu tekemistä pelkän näyttämisen sijaan. Tämän lisäksi videoita ei ole kuin noin 30 kappaletta. Kehityskeskuksen sivuilta on mahdollista ladata ohjelmaan lisäosia, joiden avulla ohjelman tarjoamat ratkaisut ovat enemmän vielä yksilöitävämpiä. Näille lisäosille löytyy manuaalit myös samasta paikasta. Foorumilla saa apua niin maailmanlaajuiselta käyttäjäverkostolta kuin myös ABB:n omilta osaajilta.

5 Työn kulku

5.1 Simulointi

5.1.1 UR3

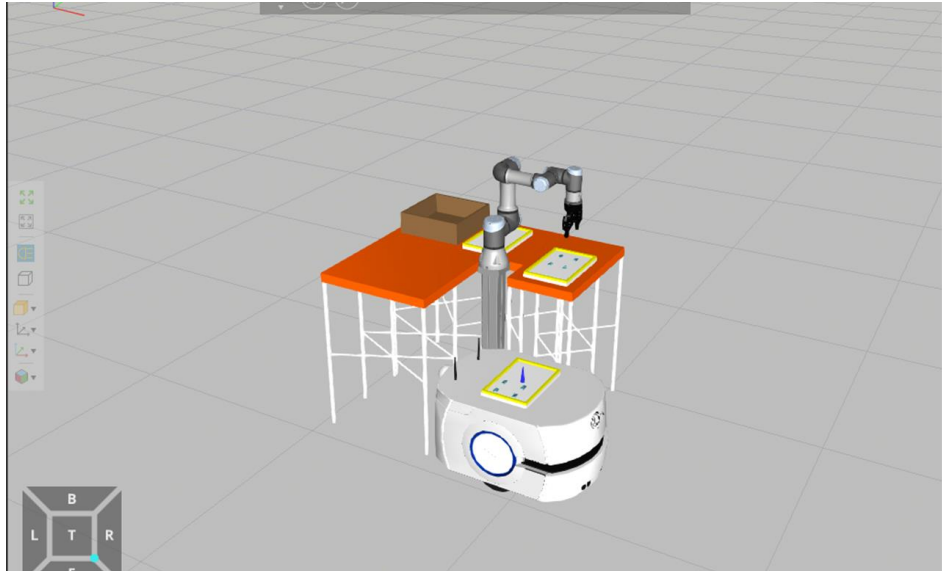
Opinnäytetyö aloitettiin luomalla simulaatio UR3-kobotin liikkeistä Visual Components -ohjelmalla. Simuloinnin tarkoituksena oli tutkia virtuaalisesti, onko automatisointi lainkaan mahdollista ajatellulla kobotilla. Ennen lopullista simulaatiota kokeiltiin erilaisia mahdollisuuksia robotin ja testerin sijoittelusta ja tutkittiin kobotin asettamista kiskolle, jolloin työskentelyalue olisi kasvanut huomattavasti. Kuvassa 9 nähdään esimerkki kiskoille sijoitetusta kobottiratkaisusta, johon ei kuitenkaan päädytty, sillä kobotti ei tarvinnut valtavaa työskentelyalaa ja kiskoratkaisu olisi nostanut automatisoinnin kustannuksia huomattavasti. Tämän lisäksi se olisi hankaloittanut huomattavasti testiajoja, sillä kiskojärjestelmän hankkiminen pelkkään testikäyttöön olisi ollut mahdotonta työn aikataulun puitteissa.



Kuva 9. Kobottiratkaisu, jossa kobotti on sijoitettu kiskolle työskentelyalueen lisäämiseksi.

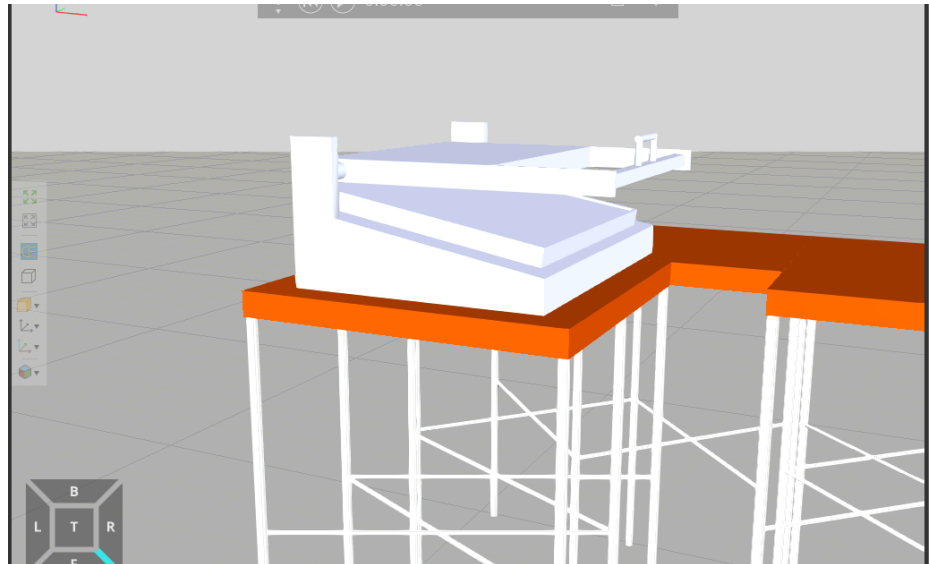
Lopullisessa simulointimallissa kobotti päädyttiin sijoittamaan tolpan päälle kiinteästi hie-
man testeristä sivuun, jotta ihminen mahtuu vaihtamaan testerin kobotista huolimatta.
Simulaatiossa päädyttiin asettelemaan pöydät aluksi J-kirjaimen muotoon, ja kobotti tuli
kirjaimen sisäkulmaan kuten kuvassa 10 voidaan huomata. Tässä asetelmassa kobotti

ylsi käyttämään testerinä ja pöydälle jäi vielä hyvin tilaa lajitella tuotteet testin jälkeen hyväksytyihin ja hylättyihin. Tämän lisäksi tilaa jäi vielä tuotetarjottimien vastaanottoon, mikä mahdollistaa sen, että työntekijä voi tuoda tarjottimia parhaassa tapauksessa myös silloin, kun kobotti testaa vielä edellistä tarjotinta.



Kuva 10. Kuvassa on havainnollistettu kobotin sijoittelu simulaatiossa pöytiin nähden.

Ohjelmaan pystyy lisäämään omia laitteita, jotka on suunniteltu 3D-mallinnusohjelmalla, ja niistä pystyy tekemään toimivia koneita ohjelmiston erilaisilla toiminnoilla. Yritykseltä saatu malli testeristä osoittautui kuitenkin aivan liian yksityiskohtaiseksi, eikä ohjelma jaksanut kunnolla pyörittää näin monimutkaista konetta edes liikkumattomana esineenä. Tästä syystä oli testeristä tehtävä erittäin yksinkertaistettu versio, joka on nähtävissä kuvassa 11. Kun mallinnus oli valmis, se täytyi ohjelman eri toiminnoilla saada liikkumaan oikein. Tämä tuotti jonkin verran ongelmia, sillä nämä toiminnot olivat ohjelmistossa uusia ja niiden opettelu vei oman aikansa. Ongelmia tuotti erityisesti se, että kahva ja kansi täytyi saada liikkumaan oman akselinsa ympäri ja kumpikin liikkui eri tavalla. Kappaleet sai kyllä pysymään koossa melko nopeasti, mutta liikkeiden oikeellisuuden määrittämiseen meni huomattavan paljon aikaa. Kappaleen toimintojen oikeellisuutta oli vaikea arvioida tässä vaiheessa, kun mallinnettava laite ei ollut käytettävissä, mutta muistiinpanojen pohjalta pyrittiin mahdollisimman oikeisiin liikeratoihin.



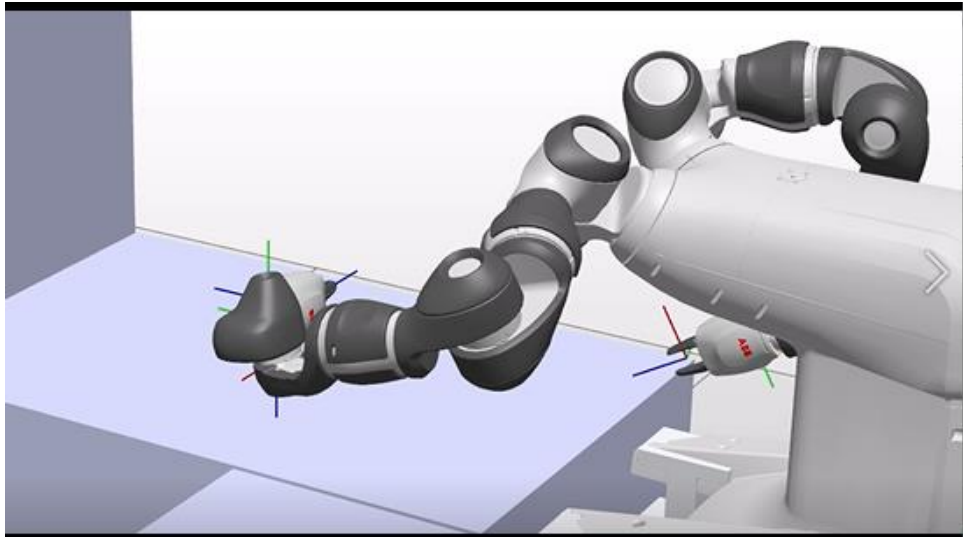
Kuva 11. Testilaitteen itsemallinnettu yksinkertaistettu mallinnus.

Kun kone saatiin toimimaan halutulla tavalla, tuli simuloinnissa pohtia, miten materiaalin syöttö tulisi toteuttaa. Ensimmäisessä versiossa ihminen toimittaa testattavat tuotetarjotimet kobotille ja testatut tuotteet pois. Tämä järjestely toimi simuloinnissa loistavasti. Toisessa versiossa ihminen työstää testattavia tuotteita omalla työpisteellään, josta mobiilirobotti noutaa ne ja toimittaa testattavat tuotteet testisolulla työskentelevälle kobotille ja sieltä pois. Mobiilirobotin kyytiin täytyy lisätä kobottikäsivarsi, jotta tuotteiden siirtely onnistuu kyytiin ja kyydistä pois.

Simulaatio toimi kaikilta muilta osin, mutta kobotti ei millään suostunut avaamaan testilaitteen kantta, vaan simulaatiossa kansi avautuu automaattisesti servomoottorien avulla. Jotta kobotti olisi onnistunut avaamaan testerin kannen, olisi kobotti pitänyt ohjelmoida tekemään liikkeit samaan aikaan, kun servomoottorit avaisivat kannen. Tämä tarkoittaa, että ohjelmalla ei oikeasti saisi kobottia avaamaan kantta vaan ainoastaan näyttämään kannen avauksen. Tämän ongelman ja aikataulun vuoksi simulaatiossa kobotti ei avaa kantta ollenkaan vaan tämä osuuden tutkiminen rajautui simulaation ulkopuolelle niin, että ohjelman sisällä kannen asentoja muuttaessa kokeiltiin, ylettäkö kobotti tarttumaan kantta oikeista pinnoista. Tämä kokeilu ei kuitenkaan antanut toivottua varmuutta siitä, yltääkö UR3 avaamaan kannen aivan yläasentoon asti ja vastaavasti sulkemaan kannen, kun se on aivan auki.

5.1.2 YuMi

YuMi-simulaation tutkimukset pohjautuvat asiakkaan opinnäytetyön kanssa samaan aikaan teettämään innovaatioryhmän simulaatiotutkimukseen. Ryhmän oli tarkoitus tehdä kattava simulaatio YuMi-kobotin käytöstä asiakkaan tolppatestauspisteellä 8 viikon aikana. Kuvassa 12 on YuMi-kobotti innovaatioryhmän käyttämässä Robot Studio -simulaatio-ohjelmassa.



Kuva 12. YuMi-kobotti Robot Studio -simulaatio-ohjelmassa (25).

Simulaation ensimmäisessä osassa Robot Studio -ohjelmaan tuotiin yrityksen luovuttamat SAT-tiedostot testilaitteesta ja testiympäristön muita komponentteja kuten testitolppa ja tietokone. Simulaatiota varten testilaitteelle luotiin ohjelmallisesti kannen aukeamista varten I/O-tiedot. (26, s. 6.) Simulaation ohjelmointiin käytettiin lohkoja, joiden sisällä käytettiin Rapid-ohjelmointia. Rapid-ohjelmointi toteutetaan englanniksi, ja se perustuu kolmeen erityyppiseen rutiiniin, joita ovat proseduurit, funktiot ja trapit. Proseduurit ovat muodoltaan aliohjelmaa, funktioiden tehtävänä on palauttaa ohjelmalle tietyn tyyppisiä arvoja, ja trapit huolehtivat ohjelmien keskeytyksistä. (26, s. 9.)

Simulaatiossa kannen avauksen hoitaa kokonaan servomoottorit eikä kobotti huolehdi kannen liikkeiden mistään osasta. YuMi odottaa testilaitteen kannen aukeamista, ja kun kansi on auki, se asettaa imukupilla testattavan kappaleen testilaitteen sisään ja odottaa kannen sulkeutuvan. Tämän ratkaisun taustalla on päätös rajata kobotin kannen avaus

työn ulkopuolelle ajan riittämättömyyden vuoksi. Tämän syyn takia simulaatio ei ole validi kertomaan, onko YuMilla mahdollista toteuttaa automatisointi. (27.)

5.2 Laitetestaus

5.2.1 UR3

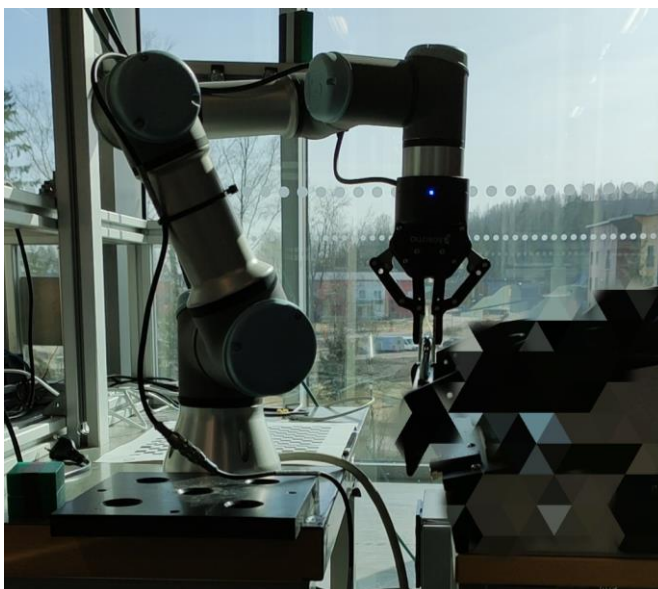
Laitetestauksen ensimmäinen vaihe oli luoda mahdollisimman suotuisat testiolosuhteet Metropolian UR3-kobotin ympärille. Ammattikorkeakoulun kobotti sijaitsee laboratoriossa, jossa se on pultattu kiinni raskaaseen metallipöytään, jonka siirtäminen ei ole mahdollista ilman apuvälineitä. Pöytään on pultattu myös muuta laitteistoa, joten kobotin siirtäminen ei tästäkään syystä ollut vaihtoehto. Näistä syistä testiympäristö täytyi luoda UR3:n ympärille. Kobotin edessä on pieni pöytä, jolle testilaitte mahtui juuri ja juuri. Pöydän ollessa näin pieni täytyi tämä ottaa erityisesti huomioon, kun kobottia alettiin ohjelmoida, jotta testilaitte ei pääsisi putoamaan kobotin liikkeitä takia. Pöydän etäisyyttä täytyi hieman muokata, jotta kobotti ei joudu testivaiheessa virhetilaan oman vartalon tullessa tielle ja jotta kobotista saadaan paras hyöty kannen avaamisessa ja sulkemisessa.

Testiympäristön luomisen lisäksi täytyi testilaitteen ominaisuuksia hieman muokata. Koska testilaitte toimitettiin tyhjänä, ei testauksessa käytetty piirilevyä, koska se ei olisi millään pysynyt kaltevilla ja liukkaalla pinnalla sen aikaa, että kobotti saisi luukun suljettua. Normaalityössä testilaitteessa olisi piirilevylle oma paikka, jossa se pysyy tarkasti koko testin ajan, mutta nämä testilaitteen osat ovat erittäin herkkiä eikä kobotin haluttu vaurioittavan niitä. Tämän takia testikappaleena käytettiin tulostettua suorakaitteen muotoista palikkaa, jotka on tulostettu UR- harjoitteita varten opiskelijoiden käyttöön. Testikappale ei tahtonut myöskään pysyä joka kerta paikoillaan, vaan valui herkästi muutamia senttejä alaspäin tai testilaitteesta lattialle, jolloin kappaleeseen tarttuminen ei kannen avauksen jälkeen onnistunut. Ongelma poistui, kun testilaitteen sisäpinnalle asetettiin sähköteippiä kolmeksi raidaksi kappaleen sijoituskohtaan lisäämään kitkaa testikappaleen ja testilaitteen kaltevan pinnan välille. Näin ollen kappale ei enää valunut sijoituskohdasta ja sen noukkiminen onnistui loistavasti.

Testilaitteen metalliosia täytyi myös suojata kobotin aiheuttamilta kolhuilta. UR3:lla on Metropoliassa asennettu kuvan 6 mukainen tarttuja, johon on pultattu ohuet metallilevyt, jotka pidentävät tarttujan sormia parilla sentillä. Näiden metallilevyjen pintaan oli myös asennettu muovimattoa, jonka on ollut tarkoitus estää kobotin sormia kolhimasta työstettäviä kappaleita mutta myös lisätä kitkaa sormien ja työstettävän kappaleen välille. Muovimaton ansioista kobotti ei aiheuttanut kolhuja testilaitteen käyttökahvaan, joka oli kiiltävää metallia. Tätä kahvaa ei kuitenkaan voitu käyttää kuin testilaitteen kannen avaamiseen, joten mattamustaksi maalattu metalliosa, johon kahva on kiinnitetty, täytyi suojata sähköteipillä maalipinnan suojaamiseksi.

Tämä laitetestaus suoritettiin käsin ohjelmoimalla kobottia, sillä se on helppo ja nopea tapa opettaa kobotille vaaditut koordinaatit työn suorittamiseksi. Käsin ohjelmointiin päädyttiin myös siitä syystä, että nyt ei haluttu ohjelmoida kobottia työskentelemään pitkäaikaisesti vaan haluttiin vain selvittää, onko kobotin mahdollista suoriutua sille määrättyistä tehtävistä. Jos kobotti olisi ohjelmoitu pitkäaikaista työskentelyä varten, olisi ohjelmoinnissa käytetty koneellista ja käsin ohjelmointia todennäköisesti rinnakkain optimaalisen tuloksen takaamiseksi.

Ensimmäisenä kobotin täytyi suoriutua kannen avaamisesta. Tätä varten sen täytyi ensin vetää kahvaa itseensä päin testilaitteen kannen lukituksen vapauttamiseksi. Tämän jälkeen kobotin täytyi suoriutua kannen avaamisesta ympyräkaaren mukaisesti. Kuvassa 13 näkyy, miten kobotti avaa kantta. Kobotti suoriutui kummastakin tehtävästä mallikkaasti. Kannen avausta helpottaa se, että testilaitteen kannessa on pumppusysteemi, joka avaa kannen automaattisesti, kunhan kobotti avaa kantta puolen välin yli ja päästää tämän jälkeen irti.

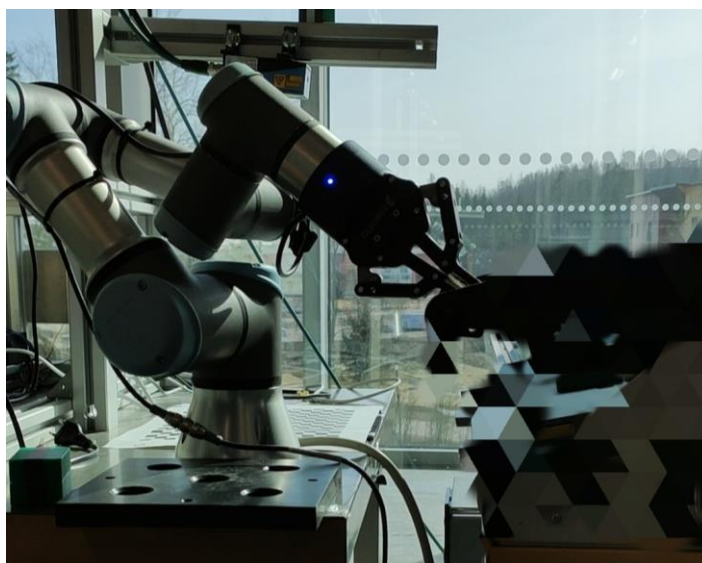


Kuva 13. UR3, joka avaa testilaitteen luukkua kahvasta kiinni pitäen.

Kannen avauksen jälkeen täytyi kobotin laittaa kappale testilaitteen sisään. Tältä osin tämä laitetestaus ei ole täysin validi, sillä normaalioloissa testattavan kappaleen sijoittaminen laitteeseen on paljon tarkempaa, jottei testilaitte eikä testattava kappale vaurioidu. Tämä ongelma kuitenkin tulisi hoitumaan kuvan 6 työkalukombinaatiolla, joka huolehtisi kappaleen tarkasta sijoittamisesta voima-anturin avulla, mikä mahdollistaa kappaleen oikean paikan hakemisen tarkasti. Näin ollen laitetestauksessa ei kiinnitetty kappaleen oikeelliseen sijoittamiseen huomiota vaan tiedot siitä, että kappale on mahdollista asettaa laitteen sisään ja poistaa sieltä, olivat riittäviä.

Onnistuneen kappaleen sijoituksen jälkeen kobotin tuli sulkea testilaitteen kansi. Tähän tehtävään tarvitaan huomattavasti enemmän voimaa verrattuna testilaitteen kannen avaamiseen. Tämä johtuu siitä, että kannen avausta auttanut pumppusysteemi toimi vastustavana voimana kannta sulkiessa. UR3:n voimat kuitenkin riittivät kannen sulkemiseen. Sulkemista yritettiin ensimmäisenä toteuttaa kahvasta alas painaen mutta tämä ei onnistunut tarttujan sormien joustamisen takia. Kahvasta painaessa tarttujan alemman ja ylemmän sormien väliin syntyi epäharmonia, joka aiheutti alemman sormen muljahtamisen epäsuotuisaan asentoon, joka esti kannen sulkemisen koska ylemmällä sormella ei enää näin ollen ollut tarpeeksi kitkaa kannen sulkemiseksi. Kannen sulkeminen onnistui, kun tarttuja oli kiinni niin että, kumpikin sormi oli vastakkain ja alemman sormen ala-

pinnalla pystyi näin ollen painamaan mattamustaa metallitankoa, johon kahva on kiinnitetty. Kuvassa 14 on havainnollistettu, miten kobotti painaa luukkua kiinni, kun tarttuja on kiinni ja vaaka-asennossa. Tällä tekniikalla kobotti sai painettua kannen kiinni niin, että lukituksen hampaat olivat jo lukkopinnan kohdalla, mutta kansi ei ollut lukossa. Tässä asennossa kansi pysyi paikoillaan ja kobotti pystyi vaihtamaan tarttujan asentoa. Tarttuja täytyi nyt sijoittaa pystysuoraan kohden metallitangon yläpintaa vasten, niin että sormien päät painavat kannen lukkoon. Tällä kaksiosaisella tekniikalla kobotti suoriutui kannen sulkemisesta helposti.



Kuva 14. UR3 sulkemassa testilaitteen luukkua painamalla suljetulla tarttujalla poikkimetallia.

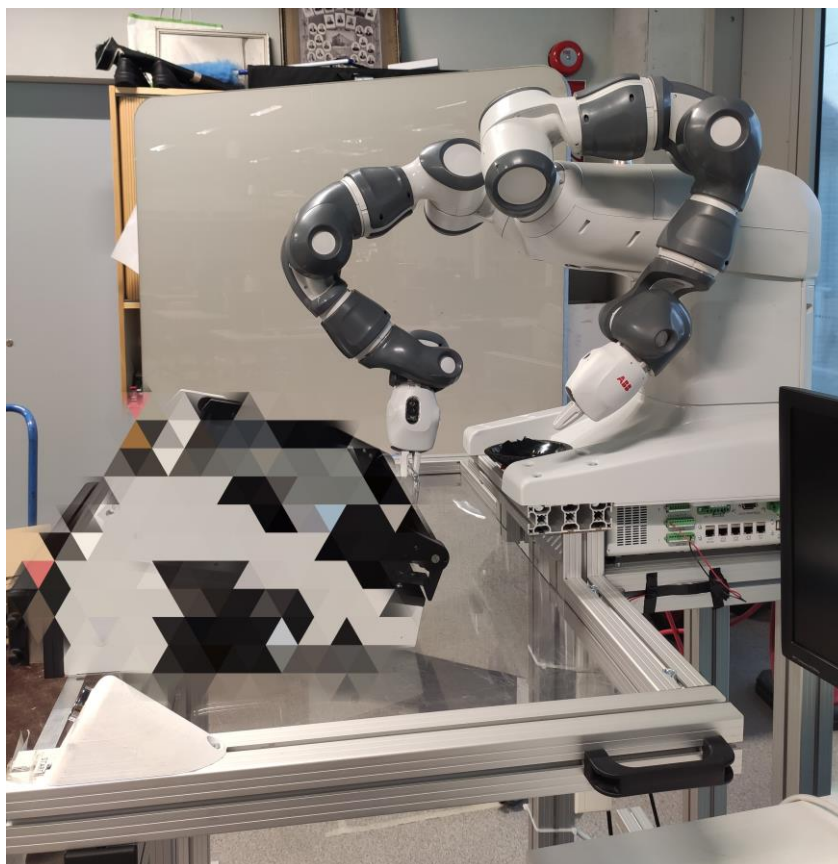
Kannen sulkemisen jälkeen kansi täytyi avata uudelleen, johon kopioitiin ensimmäisen kannen avaamisen koordinaatit. Kannen avaamisen jälkeen kobotin täytyi vielä poimia kappale ja asettaa se pöydälle kobotin viereen.

5.2.2 YuMi

Laitetestaukseen käytettiin Metropolian kaksikäätistä YuMi-kobottia, joka sijaitsee oppilaitoksen laboratoriotilassa. Kobotti on kiinnitetty renkaiden päällä olevaan kehikkoon, johon on YuMin eteen lisätty läpinäkyvä muovi levy kobotin työtasoksi. Koska työskentelytaso oli valmiina kobotin edessä ei testilaitteelle tarvinnut erikseen tehdä järjestelyjä. Jos kuitenkin testauksen aikana olisi huomattu, että testilaitte on liian lähellä kobottia,

olisi testiympäristöön pitänyt tehdä muutoksia. Kuten UR3 myös YuMi ohjelmoitiin samoista syistä käsin. Myös UR3-testejä varten tehdyt suojaukset ja kitkan lisäämiseksi asennetut teipit saivat olla paikoillaan YuMi-testien ajan, jotta ehkäistyt ongelmat eivät palaisi kobotin vaihdon yhteydessä.

YuMin laitetestaus osoittautui vaikeammaksi kuin verrokkinsa, sillä sen turvaominaisuudet estivät tehokkaasti kobottia toimimasta halutulla tavalla. Kobottia ohjelmoidessa avaamaan kannen lukitusta työntämällä kahvasta itsestään pois päin tämä meni heti virhetilaan ja pysäytti ohjelman. Kuvassa 15 nähdään, miten kobotti yrittää avata kantta. Tämä ongelma on todennäköisesti seurausta erittäin tarkasta virtojen rajoituksesta nivellissä, jolla kobotti on saatu yhdeksi maailman turvallisimmista. Kobotin käsivarsi kohtasi kannen lukituksen poiston aikana siis liian suuren vastustavan voiman, ja näin ollen lopetti ohjelman ajon, ettei kukaan loukkaantuisi eikä omaisuus vahingoittuisi.



Kuva 15. YuMi- kobotti yrittämässä avata testilaitteen kannen lukitusta työntämällä kahvaa itsestään pois päin.

Kannen avaamisyritysten jälkeen siirryttiin tutkimaan, onko YuMista kannen sulkemiseen, sillä se vaatii paljon enemmän voimaa verrattuna kannen avaamiseen. Tällä menetelmällä pyrittiin välttämään turhaa ohjelmointia. Kannen sulkemista alettiin testamaan jousivaa'an avulla, jonka maksimipaino oli 500 g. Vaa'an jousi painui pohjaan, ja testilaitteen kansi ei liikkunut vielä ollenkaan, jolloin voidaan todeta YuMin olevan kykenemätön sulkemaan testilaitteen kantta. YuMin kädet pystyvät kumpikin nostamaan 500 g, ja koska kyseisellä kobotilla on käytössä 250 g painavat tarttujat, ei yhdelle kädelle jää käytettäväksi työtehtäviin kuin 250 g. Kaksi kättä pystyvät yhdessä käsittelemään 500 g:n edestä painoa, mutta koska vaaka selkeästi osoitti, että 500 g ei tule riittämään kannen sulkemiseen, voitiin YuMin testaukset lopettaa hyödyttöminä. YuMi on suunniteltu kappaleiden siirtelyyn ja pieneen työstöön, joten jos testilaitteen kansi saataisiin servomootoreilla automatisoitua tai avaus- ja sulkemismekanismit muuttuisivat huomattavasti vähemmän voimaa vaativiksi, voitaisiin YuMin käyttöä harkita uudelleen.

6 Investoinnin kannattavuus

6.1 Työntekijän kustannukset testauksessa ja kobotin kokonaishinta

Investoinnin kannattavuuslaskelmassa ja takaisinmaksuajassa käytetyt hinnat pohjautuvat arvioihin, sillä yritykset eivät luovuta hintatietoja kuin mahdollisille asiakkaille. Tämän syyn takia takaisinmaksuajat ovat vain suuntaa antavia. Laskennassa on käytetty kuntatyönantajan yleistyöaikaisen työntekijän tuntipalkkaa, joka on 14,52 €/h. Kuukaudessa työntekijä tekee laskennallisesti työtä 163 tuntia. Laskelmassa on huomioitu, että työntekijä lomailee keskimäärin yhden kuukauden verran vuodessa. Tällöin keskimääräinen työntekijän vuosityöansio on 26 034,36 €. (28.)

$$14,52 \text{ €} * 163 * 11 = 26\ 034,36 \text{ €}$$

Tämän lisäksi työntekijälle koituu lisäkuluja 1,2–1,3-kertaisesti palkkaan nähden, jolloin työntekijälle yksi työntekijä maksaa vuodessa 26 034,36 € sijasta 33 488,668 €.

$$26\ 034,36 \text{ €} * 1,3 = 33\ 844,668 \text{ €}$$

Ei kuitenkaan voida olettaa, että tämä automatisointi korvaa työntekijän, sillä tämä on vain osa työntekijöiden tehtäviä, joten laskuissa on käytetty vuosityöansioista neljäsosaa, joka on 8 461,167 €.

$$\frac{33\ 844,668 \text{ €}}{4} = 8\ 461,167 \text{ €}$$

Laskelmissa on myös oletettu, että koboteilla ei olisi käytön jälkeen arvoa, mikä ei pidä paikkaansa. Laskelmissa ei myöskään huomioida asennus- tai toimituskustannuksia.

UR3 maksaa ruotsalaisen verkkokaupan mukaan 19 750 € (29), tarttuja 4 200 € (30), kamera 4 700 € (31) ja voima-anturi 4 100 € (32). Yhteensä kobottipaketille tulee hintaa 32 750 €.

$$19\,750\text{ €} + 4\,200\text{ €} + 4\,700\text{ €} + 4\,100\text{ €} = 32\,750\text{ €}$$

Toisin kuin Universal Robotsin tuotteita, ei YuMia pysty tilaamaan ulkopuolisilta toimittajilta vaan tilaukset tulee hoitaa ABB:n kautta. Tämän takia YuMista ei ole saatavilla hintatietoja, sillä ABB tekee aina tarjouksen kiinnostuneille. Kaksikätesen YuMin hinta kokonaisuudessaan uutena on jotain 40 000 \$:n ja 80 000 \$:n väliltä, ja käytettynäkin hinta on 20 000 \$ – 40 000 \$. (33) Tämänhetkisen valuuttakurssin mukaan YuMi maksaa uutena 38 655,74 € – 77 311,47 € ja käytettynä 19 327,87–38 655,74€ (34).

Koska tarkkaa hintaa ei ole saatavilla, päädyttiin käyttämään hintahaarukan puoltaväliä, jolloin hintaan voidaan katsoa sisältyvän myös tarttumat. Tällöin hinta olisi 60 000 \$ eli 57 983,6 € (34).

6.2 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuaikaa voidaan laskea monella tavalla, ja yksi näistä tavoista on selvittää, kuinka pitkään ajallisesti menee ennen kuin kobottihankinta on maksanut itsensä takaisin. Takaisinmaksuaika lasketaan jakamalla hankinta-aika vuosisäästöillä. (35.)

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Hankintahinta}}{\text{Vuosisäästö}}$$

Takaisinmaksuaika UR3-kobottikokonaisuudelle on noin 4 vuotta edellä mainittujen hintatietojen perusteella.

$$\frac{32\,750\text{ €}}{8\,461,167\text{ €}} = 3,870624465868597\text{ vuotta}$$

Tällä investointihinnalla takaisinmaksuajaksi muodostuu uudelle kaksikäteiselle YuMille noin 7 vuotta.

$$\frac{57\,983,6\text{ €}}{8\,461,167\text{ €}} = 6,952908115393539\text{ vuotta}$$

Samaa kaavaa noudatellen käytetyn YuMin hinta olisi 30 000 \$ eli 28 991,8 €, ja tällöin takaisinmaksuaika olisi noin 3,5 vuotta.

$$\frac{28\,991,8\ \text{€}}{8\,461,167\ \text{€}} = 3,426454057696769\ \text{vuotta}$$

Tällä menetelmällä arvioiden käytetty YuMi maksaisi itsensä takaisin nopeimmin mutta täytyy ottaa huomioon, että uuden laitteen myötä tulee myös takuut, joita vanhalla laitteella ei välttämättä enää ole. Tämän lisäksi vanhan kobotin hankinta voi olla riski, sillä sen kunnosta ja kestosta ei pahimmassa tapauksessa ole varmaa tietoa. Uusista laitteista tällä menetelmällä UR3 olisi parempi valinta, sillä se maksaa itsensä nopeammin takaisin.

6.3 Nykyarvomenetelmä

Nykyarvomenetelmässä huomioidaan enemmän investoinnin tuottavuutta ajan sijaan ja arvioidaan, onko sijoitus kannattava. Tässä menetelmässä hankinnalle asetetaan pitoaika, jonka pohjalta laskentaa suoritetaan. Pitoajan lisäksi hankinnalle asetetaan laskentakorkokanta. Tässä työssä pitoaikana käytetään seitsemää vuotta ja laskentakorkokantana 10 %:a. Käyttöajaksi valikoitui seitsemän vuotta, jotta voidaan vertailla edellisen laskutavan ja tämän tuloksia. Laskentakorkokannaksi valittiin 10 %, koska se on kohtuullinen odotusarvo tuotolle. Nykyaikamenetelmässä lasketaan, onko investointi tuottanut halutun koron kanssa pitoajassa itsensä takaisin. Jos pitoajan jälkeen tuotot ylittävät hankintahinnan, on investointi kannattava. Alla on esitetty kaava, jolla laskenta on suoritettu. Kaavassa i on yrityksen asettama korkokanta ja R on vuosittainen tuotto. Vuosittainen tuotto voi olla sama joka vuosi tai vaihdella, ja siksi se on merkitty kaavaan numerotunnistein. (36.)

$$K_{NA} = \frac{R_1}{1+i} + \frac{R_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{R_n}{(1+i)^n}$$

Tämän kaavan mukaisesti voidaan laskea automatisoinnin arvioidut säästöt työvoimakuluissa ja verrata tulosta kumpaankin kobottikandidaattiin, jolloin saadaan selville, onko

kumpikaan kobotti taloudellisesti kannattava hankinta. Seitsemän vuoden aikana on saavutettu 41 192,50 €:n säästöt, kuten alla olevasta laskutoimituksesta voidaan huomata.

$$\frac{8\,461,167\ \text{€}}{1,1} + \frac{8\,461,167\ \text{€}}{1,1^2} + \frac{8\,461,167\ \text{€}}{1,1^3} + \frac{8\,461,167\ \text{€}}{1,1^4} + \frac{8\,461,167\ \text{€}}{1,1^5} + \frac{8\,461,167\ \text{€}}{1,1^6} + \frac{8\,461,167\ \text{€}}{1,1^7} = 41\,192,50464\ \text{€}$$

Uuden UR3-kobotin hinnan ollessa 32 750 € voidaan todeta, että seitsemän vuoden henkilöstökulusäästöt ylittävät sen reippaasti, jolloin voidaan todeta, että sijoitus on silloin kannattava. YuMin kohdalla saadut säästöt eivät ylitä hankinnan hintaa, joka oli 57 983,6 €. Tosin käytetty YuMi olisi oivallinen sijoitus rahallisesti tarkasteltuna, mutta on otettava huomioon, että vanha laite tarvitsee yleisesti ottaen enemmän huoltoja ja korjauksia, jolloin saavutetut voitot voivat kulua näihin.

Edellä suoritetun takaisinmaksuajan ja nykyarvolaskennan perusteella voidaan todeta, että jos halutaan maksimoida automatisoinnin rahalliset voitot, valitaan automatisointiin UR3-kobotti. Tämä kobotti maksaa itsensä takaisin alle neljässä vuodessa ja tuo yritykselle seitsemän vuoden pitoajalla tuottoakin ja on näin parempi valinta kahdesta vaihtoehdosta. Automatisointia harkitessa on otettava huomioon myös kobottien eduksi se, että ne eivät sairastu ja aiheuta kuluja tätä kautta. Kobotit voivat työskennellä myös kolmessa vuorossa, jos näin halutaan ja parhaimmassa tapauksessa kobotti saattaa voida työskennellä, vaikka tehtaassa ei henkilökuntaa olisi paikalla.

7 Kobottien kelvollisuus tehtävään ja jatkokehityssuunnitelmat

7.1 Soveltuvien krobotti automatisointiin

Simulaatioiden jälkeen kummankaan krobotin kelpoisuudesta automatisointiin ei ollut täydellistä selvyyttä. Simulointi kuitenkin osoitti kummankin krobotin kohdalla, mihin testausvaiheessa ongelmat tulevat keskittymään. UR3:lle kannen avaaminen aiheutti ongelmia jo simuloinnissa ja testivaiheessa kaaren aikaan saamiseksi tuli tehdä useita lähekkäisiä pisteitä, jotta kansi saatiin avattua ympyräkaaren mukaisesti. YuMin kohdalla simulaatiossa ilmeni ongelmia erityisesti kannen avaamisen kanssa, eikä siihen ei edes lähdetty. Testauksen yhteydessä YuMi ei pystynyt edes avaamaan testilaitteen kannen lukitusta liiallisten turvamekanismiensä vuoksi.

Testien jälkeen oli päivänselvää, että YuMi ei pysty suoriutumaan automatisoinnista ilman testilaitteen suuria muutoksia. Kannen sulkemisen osoittaututtua mahdottomaksi voidaan todeta, että YuMille sopivat paremmin avustavat työtehtävät, joita tehdään ihmisen kanssa yhdessä. UR3 suoriutui loistavasti laitetestauksesta ja onnistui loistavasti sekä kannen avaamisessa, että sulkemisesta eikä kannen lukitus aiheuttanut ongelmia lainkaan. Testauksen jälkeen voidaan todeta, että UR3 soveltuu asiakkaan automatisointiprojektiin loistavasti. Lisäksi koska Universal Robotsin kroboteille kehitetään jatkuvasti erilaisia tarttujia ja lisäosia, voidaan katsoa, että tulevaisuudessa jos testauspaikan automatisointi päätetään purkaa tai testauspaikkaa ei enää tarvita, voidaan edullisilla muutoksilla UR3 ottaa helposti käyttöön muihin tehtäviin.

Koska ihminen joutuu vieläkin vaihtamaan testilaitteen, YuMin suuri rakenne tulee ongelmaksi, koska YuMi pitäisi sijoittaa pöydänreunaan jaloistaan kiinteästi kiinni, jolloin testilaitteen vaihto ei onnistu enää ihmiseltä. Jos YuMi taas kiinnitetään siirrettävään keihikkoon kuten laboratorioissa sijaitseva yksilö, ongelmaksi muodostuu siirtelystä tuleva paikan liikkuminen, joka vaikuttaa ohjelmointiin. UR3 on pienen kokonsa vuoksi mahdollista sijoittaa laitteesta hieman sivuun niin, että ihminen mahtuu vaihtamaan testilaitteen ilman, että krobottia tarvitsee siirtää minnekään; krobotti vain ajettaisiin asentoon, jossa se ei ole ihmisen tiellä.

Investoinnin takaisinmaksuajan ja kannattavuuslaskennan pohjalta voidaan todeta, että YuMi ei ole kannattava hankinta seitsemän vuoden pitoajalla, sillä se ei tuo sinä aikana toivottua 10 %:n tuottoa ja maksa itseään takaisin. Jos YuMilla ei tavoiteltaisi voittoa, maksaisi YuMi itsensä takaisin seitsemässä vuodessa. UR3 maksaa itsensä takaisin alle neljässä vuodessa ja seitsemän vuoden pitoaikanaankin tuo omistajalleen yli 10 %:n tuoton. Näin ollen taloudellisestikin UR3 on parempi valinta automatisointiin sen lisäksi, että se on testauksien mukaan näistä kahdesta vertailusta kobotista ainut, joka suoriutui annetuista tehtävistä.

7.2 Jatkokehitys

Tulevaisuudessa jos automatisointia lähdetään toteuttamaan, on muutamia kohteita vielä tutkittava ja kehitettävä. Ensimmäisenä on tuotteiden kuljettamiseen tarkoitetut muovikehikot uusittava täysin, sillä nykyisellään ne pitävät tuotteita viistosti, jolloin kobotilla ei ole mahdollista poimia niitä. Tuotteiden tulisi olla vaakatasossa, jotta kobotti pystyy ne poimimaan, päädytäänpä sitten minkälaiseen tarttujaan tahansa. Tarjottimessa tulisi olla paikka testattavien latteiden tietojen paperille, josta kobotin tulisi lukea ne konenäön avulla viivakoodista tai QR-koodista.

Kobotin konenäkötarpeita tulisi myös tarkastella. Kobotin tulisi pystyä lukemaan viivakoodeja ja QR-koodeja paperilta ja mahdollisesti jopa laitteiden tarroista. Tämän lisäksi kobotin tulisi konenäön avulla tunnistaa testattavien kappaleiden sijainti, jotta se osaa poimia ne oikeasta paikasta. Mahdollisesti kobotin pitäisi konenäön avulla tunnistaa myös testilaitteen sisältä testattavan laitteen sijoituspaikka, jotta se osaa sijoittaa testattavat laitteet turvallisesti testilaitteeseen ja poimia ne pois sieltä. Toinen mahdollisuus olisi, että testattavan laitteen viiva- tai QR-koodista saatujen tietojen perusteella kobotti saisi haettua sisäisestä kirjastostaan ohjelman, jossa olisi määritelty, mihin testattava kappale tulisi sijoittaa testilaitteessa. Tässä sijoittamisessa toki auttaa voima-anturi, jonka avulla voidaan paikkaa hioa vielä siinä vaiheessa, kun kobotti yrittää asettaa kappaleita testilaitteeseen.

Opinnäytetyön edetessä pois rajattuun materiaalinsoyttöön pitäisi kehittää ratkaisu. Asiakkaan toiveissa oli, että ihminen ei osallistuisi tuotteiden kuljettamiseen. Tällä hetkellä ihminen työstää kappaleita ennen niiden testaamista ja työstön jälkeen hän kuljettaa

kappaleen testipisteelle ja suorittaa sille tarvittavat testaukset testilaitteella. Ihmisen työstettyä kappaleita olisi mahdollista, että ihminen asettelisi kappaleet tarjottimelle ja kutsuisi paikalle mobiilirobotin toimittamaan tarjottimen testipisteelle. Jos testilaitteen ympärillä oleva tila saadaan järjesteltyä niin, että testipisteellä työskentelevä kobotti pysyisi poimimaan tuotetarjottimen itselleen työstettäväksi ja ihminen asettaisi tarjottimen itse mobiilirobotin kyytiin, ei mobiilirobotin päälle tarvitsisi asentaa toista kobottia, joka huolehtisi tarjottimen kyytiin nostosta ja pois nostamisesta. Tämä säästäisi kustannuksissa.

Mobiilirobottia varten olisi kuitenkin asiakkaan tehtaassa tehtävä suuria muutoksia, sillä tällä hetkellä käytävät ovat liian ahtaita mobiilirobotin ja ihmisen ohittaa turvallisesti ilman, että kumpikaan häiriintyy toisen läsnäolosta. Jos muutoksiin aletaan, olisi mietittävä, tehdäänkö mobiilirobotille oma väylä, jota ihmiset ei käytä ja ihmisille näin ollen oma kulkureitti vai tehdäänkö kulkureiteistä riittävän leveitä ohitustilanteita varten. Jos päädytään kulkureittien yhteiskäyttöön, pitäisi tehtaaseen myös tehdä turvallisuusyistä teippaukset lattiaan ja sijoittaa varoituskylttejä, jotta työntekijät tietävät, millä alueella mobiilirobotti liikkuu ja robottiin pitäisi saada myös vilkkuvalo varoittamaan ihmisiä sen liikkumisesta. Merkkiäni liikkumisesta olisi myös mahdollinen, mutta tehtaassa ollessa yhtä suurta tilaa tämä tuskin olisi hyvä ratkaisu, sillä pahimmassa tapauksessa se häiritsisi työntekijöitä kaikkialla tehtaassa. Jos mobiilirobottiin päädytään, voidaan se ohjelmoida myös toimittamaan testatut kappaleet eteenpäin testipisteeltä. Jos vastaanotopisteellä ei työskentele ihmistä, on mobiilirobotin päälle asetettava kobotti nostamaan tuotteet pois kyydistä.

Mobiilirobotti-kobotti-integraatiolla voisi toimia kolmen pisteen välillä aivan omatoimisesti ilman ihmisen läsnäoloa, jos voidaan taata, että hakupaikoilla olisi aina tarjotin odottamassa mobiilirobottia ja tyhjennyspaikoilla olisi aina tilaa uudelle tarjottimelle. Vaihtoehtoisesti tarjottimien nouto- ja tuontipaikat voitaisiin anturoida tunnistamaan tarjottimet, mikä poistaisi sen ongelman, että robotti toimittaa olematonta tarjotinta. Jos ihminen kuitenkin on osa ketjua, pitäisi pohtia, tarvitsisiko ihminen mobiilirobotin kutsunapin vai selvittäisiinkö pelkällä anturoinnilla.

Testilaitteen ja kobotin välinen kommunikointi tarvitsisi tutkimusta, sillä tällä hetkellä ei ole varmuutta, saako testilaitteen tietokoneyksiköltä tuotua testatun laitteen testitulosta kobotille, jolloin kobotti ei pysty lajittelemaan kappaleita hyväksytyihin ja hylättyihin,

mikä veisi automatisoinnilta pohjan kokonaan. Tietojenvaihtoon voisi mahdollisesti käyttää rajapintoihin perustuvaa tiedonvaihtoa kuten OPC UA, jonka avulla tietojen siirtäminen saattaisi onnistua, jos kobottia ja testilaitetta ei muilla tavoin saada jakamaan tietoja keskenään. Jos tietojenvaihto ei onnistu kahden rajapinnan välillä, on mahdollisuus, että kobotti lukisi tuloksen ruudulta konenäön avulla niin kuin ihmistyöntekijä tällä hetkellä tekee, mutta tämä tuo ongelmaksi näytön kirkkauden riittävyyden, heijastumat, konenäkökameran tarkkuuden ja kobotin yltämisen lukemaan näyttöä.

8 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, voiko asiakkaan piirilevyjen testauksen automatisoida kobottia käyttäen, jolloin kalliiden teollisuusrobottien käytöltä välttyttäisiin ja tilanpuutteen vuoksi teollisuusrobotin vaatimat turva aidat eivät olisi olleet mahdollisia. Tutkimus aloitettiin luomalla tietokonesimulaatiot valittujen kobottien osalta. UR3-kobotti simuloitiin Visual Components -ohjelmalla ja YuMi ABB:n Robot Studio -ohjelmalla. Simulaatioiden lopputuloksena ei pystytty vielä päättämään, onko kumpikaan kobotti kelvollinen suunniteltuun automatisointiin.

Laitetestauksessa pyrittiin selvittämään simulaatioista saatujen tietojen avulla, pystyykö kumpikaan valituista koboiteista selviytymään annetusta tehtävästä. YuMin testaus jäi lyhyeksi, kun kahvan lukituksen avaaminen epäonnistui toistuvasti turvaominaisuuksien takia. Tässä vaiheessa heräsi kysymys YuMin kyvystä sulkea kansi rajoittuneen voimankäyttönsä takia. Voima, jota tarvittiin kannen sulkemiseen, oli liian suuri YuMilla saavutettavaksi tarttujien kanssa ja testaukset voitiin lopettaa hyödyttämällä. UR3-kobotti suoriutui kannen avaamisesta ja sulkemisesta erinomaisesti. Kobotti mahtui myös operoimaan testilaitteen sisällä kannen ollessa auki, ja näin ollen se pystyy asettamaan testattavan kappaleen ongelmitta laitteen sisälle ja poistamaan ne.

Opinnäytetyössä tutkittiin myös kobottien takaisinmaksuaikaa ja investoinnin kannattavuutta. Tältä pohjalta, käytetty YuMi on nopeinten itsensä takaisin maksava ja voittoa tuova kobottivalinta, mutta käytetty laite on aina suurempi riski sijoitettaessa kuin uusi. UR3 osoittautui taloudellisesti kannattavammaksi uusista koboiteista, sillä se maksoi itsensä takaisin noin neljässä vuodessa ja seitsemän vuoden pitoajalla toi yritykselle voittoja toisin kuin YuMi, joka ei tuonut voittoja vaan oli juuri ja juuri maksanut itsensä takaisin seitsemän vuoden aikana.

Opinnäytetyön lopputuloksena voidaan todeta, että asiakkaan tolppatestaupisteen automatisointiin vertailluista koboiteista UR3 on paras valinta, sillä se suoriutui annetuista tehtävistä ja on taloudellisestikin paras kobotti tähän tehtävään. UR3 erottuu edukseen myös sillä, että se on nopeasti muutettavissa muihin tehtäviin tarpeen vaatiessa vaihtamalla työkalua, joita löytyy suuri valikoima.

Lähteet

- 1 Facts & Figure. Verkkoaineisto. Enics. <<https://enics.com/enics2/enics-content/#facts>>. Luettu 20.3.2020.
- 2 Enics in Finland. Verkkoaineisto. Enics. <<https://enics.com/enics2/enics-content/#finland>>. Luettu 20.3.2020.
- 3 Aapala, Kirsti. Kotus, kotimaisten kielten keskus. Robotti. Verkkoaineisto. Kotus. <https://www.kotus.fi/nyt/kysymyksiä_ja_vastauksia/sanojen_alkuperasta/robotti>. Luettu 18.2.2020.
- 4 Robotti. Verkkoaineisto. Kielitoimiston sanakirja. <<https://www.kielitoimiston-sanakirja.fi/#/robotti>>. Luettu 18.2.2020.
- 5 Matarić, Maja J. 2007. The Robotics Primer. London: The MIT Press.
- 6 Aalto, Heikki; Heilala, Juhani; Hirvelä, Tuomas; Kuivanen, Risto; Laitinen, Mika; Lehtinen, Hannu; Lempiäinen, Juhani; Lylynoja, Ari; Renfors, Juha; Selin, Keijo; Siintoharju, Tero; Temmes, Jaakko; Tuovila, Tommi; Veikkolainen, Mikko; Vihtinen, Jorma & Virtanen, Ari. 1999. Robotiikka. Vantaa: Talentum Oyj/MetalliTekniikka.
- 7 ABB – first global industrial robotics company to manufacture robots in the United States. 2015. Verkkoaineisto. ABB. <<https://new.abb.com/news/detail/12997/abb-first-global-industrial-robotics-company-to-manufacture-robots-in-the-united-states/>>. Luettu 16.3.2020.,
- 8 Demystifying Collaborative Industrial Robots. 2018. Verkkoaineisto. <https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf>. Luettu 28.2.2020.
- 9 OMRON TM Collaborative Robots. Verkkoaineisto. Omron. <https://assets.omron.eu/downloads/brochure/en/v11/i836_tm_collaborative_robot_brochure_en.pdf>. Luettu 30.3.2020.
- 10 LBR iiwa. Verkkoaineisto. Kuka. <<https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>>. Luettu 31.3.2020.
- 11 KUKA LBR IIWA 7 R800. Verkkoaineisto. RobotWorkx a SCOTT company. <<https://www.robots.com/robots/lbr-iiwa-7-r800>>. Luettu 31.3.2020.
- 12 Experience more Collaborative robots for a wide range of applications. Verkkoaineisto. Fanuc. <[Collaborative-robot-brochure-en.pdf](#)>. Luettu 1.4.2020.

- 13 The future lies in the collaboration. Verkkoaineisto. Fanuc. <<https://www.fanuc.eu/ch/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots>>. Luettu 1.4.2020.
- 14 UNIVERSAL ROBOT UR3e. Verkkoaineisto. Universal Robots. <<https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/>>. Luettu 3.3.2020.
- 15 Verkkoaineisto. Universal Robots. <<https://www.universal-robots.com/3d/ur3.html>>. Luettu 3.3.2020.
- 16 UNIVERSAL ROBOTS LAUNCHES UR3. Verkkoaineisto. Universal Robots. <<https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/universal-robots-launches-ur3/>>. Luettu 3.3.2020.
- 17 FT 300 FORCE TORQUE SENSOR. Verkkoaineisto. Universal Robots. <<https://www.universal-robots.com/plus/urplus-components/accessories/ft-300-force-torque-sensor/>>. Luettu 18.3.2020.
- 18 Liljamon, Juho. 2020. Myynti-insinööri. Oy Maahine Tool Co. Helsinki. Keskustelu 5.3.2020.
- 19 Svahn, Veli-Pekka. Business Development Manager Oy Maahine Tool Co. Helsinki. Keskustelu 5.3.2020.
- 20 YuMi®-IRB 14000. 2018. Verkkoaineisto. ABB. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106354A3256&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 20.3.2020.
- 21 ABOUT US. Verkkoaineisto. Visual Components. <<https://www.visualcomponents.com/about-us/>>. Luettu 23.3.2020.
- 22 VISUAL COMPONENTS 4.2. Verkkoaineisto. Visual Components. <<https://www.visualcomponents.com/products/visual-components/>>. Luettu 23.3.2020.
- 23 ABB:stä lyhyesti. Verkkoaineisto. ABB. <<https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>>. Luettu 24.3.2020.
- 24 RobotStudio®. The world's most used offline programming tool for robotics. Verkkoaineisto. ABB. <<https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>>. Luettu 25.3.2020.
- 25 Digi-Salama simulaatio. 2020. Video. Katsottu 14.4.2020.

- 26 Eskelinen Joonas, Koskinen Jere, Kuurinmaa Mila, Määttä Joni. 2020. Kobotiikan käyttö piirilevytestauksessa. Luettu 14.4.2020.
- 27 Enics simulaatio. 2020. Video. Katsottu 14.4.2020.
- 28 Miten lasketaan KVTES:n mukainen tuntipalkka?. 6.6.2017 Verkkoaineisto. Kuntatyönantajat. <<https://www.kt.fi/sopimukset/ukk/kvtes/tuntipalkka>>. Luettu 14.4.2020.
- 29 UR3 robot. Verkkoaineisto. Cobots. <<https://cobots.se/produkt/ur3-robot/>>. Luettu 14.4.2020.
- 30 Gripdon. Verkkoaineisto. Cobots. <<https://cobots.se/verktyg/gripdon/>>. Luettu 14.4.2020.
- 31 Visionsystem. Verkkoaineisto. Cobots. <<https://cobots.se/verktyg/visionsystem/>>. Luettu 14.4.2020.
- 32 Robotiq. Verkkoaineisto. Cobots. <<https://cobots.se/produkt-kategori/verktyg/kraftsensorer/kraftsensorer-robotiq/>>. Luettu 14.4.2020.
- 33 YuMi robot cost. Verkkoaineisto. Bots.co.uk Automation Experts. <<https://bots.co.uk/yumi-robot-cost/>>. Luettu 18.4.2020.
- 34 Osta tai varaa valuuttaa. Verkkoaineisto. Forex. <<https://www.forex.fi/valuutta/valuutanvaihto?currency=USD>>. Luettu 18.4.2020.
- 35 Uitto, Jesse. Investointilaskuri. Verkkoaineisto. <<https://jesseuitto.fi/laskureita/investointilaskuri/>>. Luettu 18.4.2020.
- 36 Teerinaho, Jouko. Kannattavuus- ja elinkaarilaskennan matematiikka. Verkkoaineisto. Lapin Ammattikorkeakoulu. <<http://web.lapinamk.fi/jouko.teeriaho/Elinkaarilaskentaa.pdf>>. Luettu 25.4.2020.