

# Anturijärjestelmien hyödyntäminen robottien ohjaukseen koneistuksessa

*Jukka Koskinen\**

*Jari M. Ahola\**

*Tapio Heikkilä\**

*Tuomas Seppälä\**

*Marko Korkalainen\**

*Petri Kosonen\*\**

\* Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Kaitoväylä 1, 90571 Oulu  
Puh. 020 722 2132, Jukka.Koskinen@vtt.fi, www.vtt.fi

\*\* JOT Automation Ltd., Elektroniikkatie 17  
90590 Oulu, Finland, www.jotautomation.com

AVAINSANAT robotti, anturijärjestelmät, koneistus

## TIIVISTELMÄ

Tässä paperissa esitetään kappaleiden paikoitukseen ja voima-ohjaukseen kehitettyjä anturijärjestelmiä, jotka soveltuvat robottien ohjaukseen koneistustehtävissä. Esitämme kehitettyjen anturijärjestelmien sekä niiden kalibrointiin liittyvät periaatteet. Lisäksi esitämme langattoman anturimoduulin, jonka avulla voidaan opettaa robotille työstettävät liikeradat ohjaamalla robotin käsivartta voima-anturia hyödyntäen. Langattomalle anturimoduulille kehitetty kalibrointimenetelmä mahdollistaa moduulin sijoittamisen vapaasti robotin työkaluun, ranteeseen tai robotin tarttumaan kappaleeseen. Kehitetyillä järjestelmillä voidaan nopeuttaa koneistustehtäviä robottisolussa.

## 1 Johdanto

Robotteja on viime vuosina hyödynnetty yhä enemmän myös koneistussovelluksissa ja näissä on hyödynnetty perinteisissä suunnittelu- ja käyttöönotto menetelmiä (CAD/CAM -ohjelmistoja, robottien off/on-line -ratasuunnittelumenetelmiä ja simulointityökaluja). Näiden tehokas hyödyntäminen vaatii käyttäjiltä kokemusta ja näiden käyttö on usein aikaavievää. Erityisesti piensarjatuotannossa /1/ järjestelmien tulisi olla joustavia ja nopeasti käyttöönotettavia, koska tuotantoerät voivat olla hyvinkin pieniä ja jokaiselle uudelle kappaleelle voidaan joutua tekemään erikseen suunnittelutyö ja käyttöönotto /2/. Lisäksi erilaisten antureiden kalibrointi voi olla työlästä. Näiden rinnalle tarvitaan menetelmiä, joilla työstettävien kappaleiden paikoitus, asemointi ja työstörajojen suunnittelu voitaisiin tehdä nopeammin kuin nykyisillä menetelmillä. Erityisesti anturijärjestelmien entistä tehokkaammalla hyödyntämisellä voidaan tehdä suunnittelutyö entistä nopeammin. Seuraavassa esitämme miten anturijärjestelmille kehitetyt paikoitus- ja kalibrointimenetelmät sekä simulointityökalujen monipuolisempi hyödyntäminen nopeuttavat koneistustehtäviä robottisolussa. Varsinainen robotilla materiaalin työstämiseen suunniteltu voimaohjauksen periaate on esitetty viitteessä /3/.

## 2 Kappaleen paikoitus

Robotilla työstettävien kappaleiden paikoituksen ja asemoinnin anturijärjestelmät koostuvat laserskannereista ja kameroista. Kappaleiden paikoitus antureilla tehdään kahdella tavalla; joko automaattisesti tai interaktiivisesti. Automaattisessa paikoituksessa kappaleen paikka ja asema määritetään työalueen tai ainakin kappaleen laajemmin kattavalla laserskannerilla, jonka mittauksista määritetään työstettävä alue kappaleessa. Tämän jälkeen työstettävä alue skannataan korkearesoluutioisella laserskannerilla. Tämä jälkeen lasketaan työstöraajat robotinohjaimelle. Interaktiivisessa paikoituksessa työstettävä alue määritetään interaktiivisesti: operaattori merkitsee kappaleeseen kiinnitettävillä merkeillä työstettävän alueen. Merkkien 3D-koordinaatit määritetään

käyttäen kahden kameran mittausjärjestelmää. Työstettävä alue skannataan edelleen korkearesoluutisella laserskannerilla ja tästä lasketaan työstöradat robotin ohjaimelle. Simulointityökaluja käytetään verifioimaan anturitiedosta lasketut radat (törmäykset, ulottuvuudet) ja visualisoimaan skannattuja pintoja.

## 2.1 Automaattinen paikoitus

Automaattisessa kappaleen paikoituksessa kappaleesta mitataan laserskannerilla 3D-pistepilvi, joka suodatetaan ja segmentoidaan alueisiin, ja näiden perusteella tunnistetaan kappale ja sen asento. Kappaleesta määritetään edelleen muodot, dimensiot ja paikka. Paikanmäärittäminen sovittelee kappaleen alueisiin lajitellut pistepilven pisteet vastaaviin 3D CAD -mallin referenssipintoihin. Kappaleen paikan laskenta on esitetty tarkemmin viitteessä /4/. Kappaleen paikoituksen jälkeen kappaleesta määritetään haluttu työstettävä alue, jolle lasketaan robotin liikerata skannaamaan robotin ranteeseen kiinnitetyllä korkearesoluutisella laserskannerilla työstettävä alue ja jolle lasketaan työstöradat.

Laserskannereiden kalibrointi voidaan automatisoida hyödyntämällä ns. ”Hand-eye” –kalibrointia /5, 6/. Kalibroinnissa robotin käsivarteen kiinnitetyllä laserskannerilla mitataan stationaarinen kalibrointi kappale viidestä eri asennosta useita kertoja. Jokaisella mittauskerralla laserskannerin asema suhteessa kalibrointikappaleeseen estimoidaan sovittelemalla kalibrointikappaleen CAD-malli mitattuun profiiliin. Näistä sekä vastaavista robotin liikkeistä voidaan ratkaista kalibrointiparametrit, so. laserskannerin paikka ja asento robotin ranteessa. Kalibroinnin periaate on esitetty yksityiskohtaisesti viitteessä /7/.

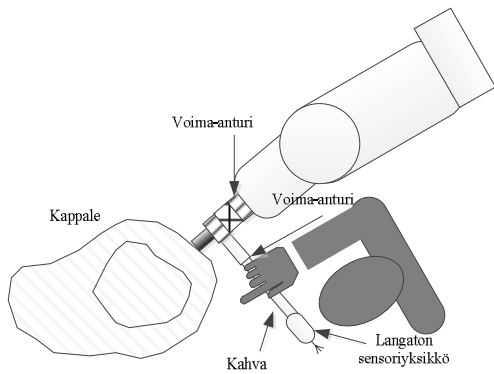
## 2.2 Interaktiivinen kappaleen paikoitus

Kappale voidaan paikoittaa myös interaktiivisesti. Operaattori osoittaa työstettävien pintojen paikat osoittamalla halutun alueen koordinaattipisteitä joko laser-osoittimella tai merkitsemällä halutut koordinaattipisteet esimerkiksi paperimerkeillä. Merkkien koordinaatit määritetään ottamalla kahdella kameralla kuvat merkeistä kahdesta eri kuvakulmasta ja laskemalla kolmiomittausperiaatteella merkkien 3D-koordinaatit. Koska kamerat on kalibroitu robotin koordinaatistoon, merkkien koordinaatteja voidaan käyttää robotin liikeratojen laskentaan halutulle alueelle. Merkkien rajoittamat alueet määrittävät rajat ja alueen, jonka robotti skannaa korkearesoluutisella laserskannerilla. Mitatulle alueelle tehdään edelleen varsinainen työstöratojensuunnittelu.

Kamerojen kalibroinnissa määritetään kameroiden ja robotin sijainnit ja orientaatiot toisiinsa nähden. Tässä yhteydessä on oletuksena, että kameran sisäiset parametrit ovat kalibroitu. Kalibroinnissa kamerat kalibroidaan robotin koordinaatistoon käyttäen teräväkärkistä työkalua, joka on kiinnitetty robotin ranteeseen. Robotti liikuttaa työkalua robotin työskentelyalueella vapaasti eri paikkoihin ja asentoihin. Työkalun kärjen sekä kameroiden paikka- ja asentoparametrit lasketaan kameroiden kuvista. Lisätietoja kalibroinnista löytyy viitteistä /4/ ja /7/.

## 3 Ratojen opetus

Yksinkertaisin tapa opettaa robotille liikeradat on ohjata robotin käsivarren työkalun kärkeä piste kerrallaan manuaalisesti robotin käsiohjaimen avulla ja tallentaa ratapisteet. Tämä on kuitenkin hidasta, koska opetettavia pisteitä voi olla paljon ja vaatii paljon testausta /8/. Liikeradat voidaan opettaa nopeammin siten, että operaattori ohjaa robotin käsivartta ”taluttamalla” erillisen ohjaussauvan voima-anturitiedon perusteella. Operaattori tarttuu robotin ranteeseen tai robotin tarttumaan kappaleeseen kiinnitettyyn ohjaussauvaan ja voima-anturi aistii operaattorin aiheuttamat voimat, joiden perusteella voimaohjaus liikuttaa käsivartta vastaavasti. Liikeradan koordinaatit tallennetaan automaattisesti ja opetuille liikeradoille tehdään vielä jälkikäsitteilyä sekä simulointeja. Kehitettyä voima-anturipohjaista järjestelmää on havainnollistettu kuvassa 1. Voima-anturista mitatut voimat ja vääntömomentit lähetetään langattomasti vastaanottimelle, joka siirtää mittaukset edelleen voima-ohjaimelle, joka lähettää impedanssisäätöalgoritmien laskemat robotin liikkeiden inkrementtiarvot robotin ohjaimelle. Ratapisteet tallennetaan robotin ohjaimelle ja lähetetään esimerkiksi ylemmän tason ohjaimelle, joka voi suorittaa ratojen jälkikäsitteilyä ja lähettää tallennetut liikeradat esimerkiksi simulointiohjelmistolle.



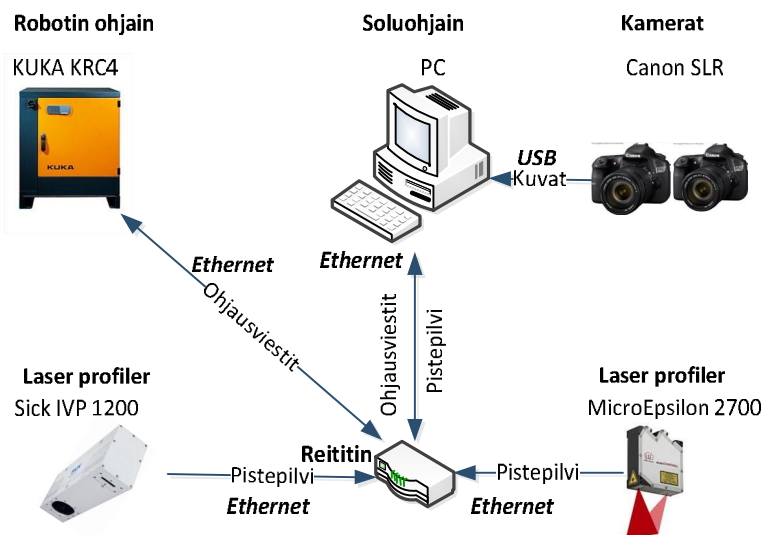
Kuva 1. Robotin liikeratojen opetuksen periaate

Ratojen opetukseen kehitetyn anturijärjestelmän kalibrointiin kehitettiin /9/ menetelmä, jonka avulla kalibrointi voidaan tehdä nopeasti. Menetelmä sallii opetusmoduulin vapaan sijoittelun robotin ranteeseen tai työkaluun tai se voidaan myös kiinnittää robotin tarttumaan kappaleeseen. Algoritmi hyödyntää robotin ranteeseen asennetun voima-anturin ja robotin kiinnityslaippaan asennetun voima-anturin voima- ja momenttitietoja. Kalibrointi suoritetaan työntämällä opetusmoduulin kahvaa eri suuntiin muutaman kerran ja mitatuista voimista ja momenteista lasketaan kalibrointitiedot, so. opetusmoduulin voima-anturin koordinaatiston sijainti robotin ranteeseen kiinnitetyn voima-anturin ja siten robotin laipan koordinaatistossa. Edellytyksenä on että opetusmoduuli sijaitsee robotin ranteeseen sijoitetun voima-anturin jälkeen.

## 4 Tulokset

### 4.1 Paikoitus

Kuvassa 2 on esitetty kappaleiden paikoitukseen kehitettyjen anturijärjestelmien testausympäristön arkkitehtuuri. Järjestelmä koostuu Kuka KRC4 robotin ohjaimesta, Sick IVP 1200 laserskannerista, MicroEpsilon 2700 laserskannerista, Canonin järjestelmäkameroista, ylemmätason soluohjaimesta (PC/Windows7) ja KUKA KR120 -teollisuusrobotista. Soluohjain suorittaa ylemmätason sekvenssiohjauksen sekä paikoitus- ja kalibrointitehtävät.

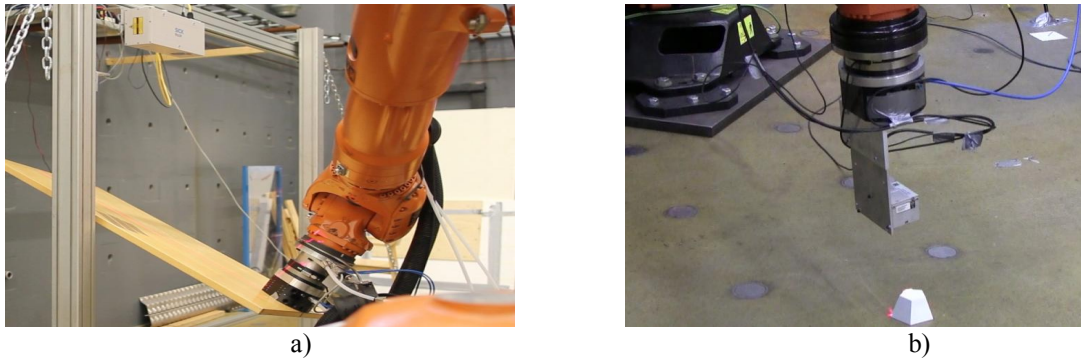


Kuva 2. Kappaleiden paikoitukseen kehitettyjen anturijärjestelmien testausympäristön arkkitehtuuri.

#### 4.1.1 Kappaleen paikoitus automaattisesti

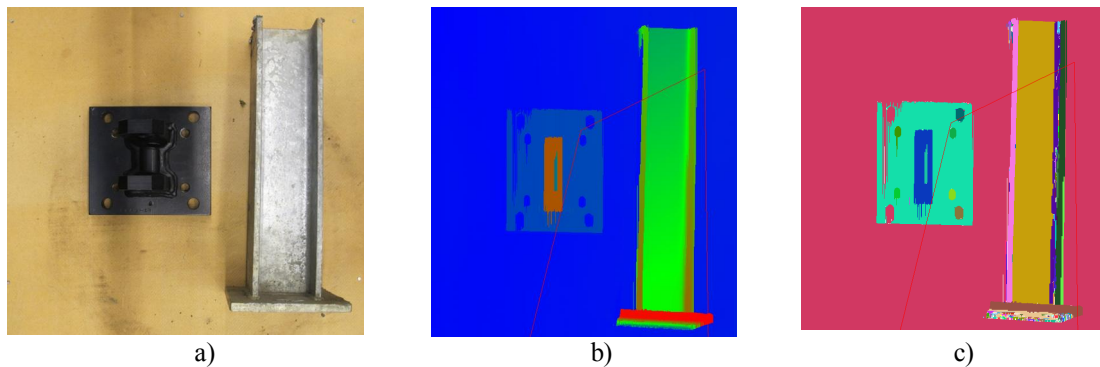
Paikotusanturit koostuvat lineaariakseliin kiinnitetystä SICK IVP1200 laseranturista ja robotin ranteeseen kiinnitetystä MicroEpsilon 2700 laseranturista. Ennen testimittauksia kumpikin anturi kalibroitiin edellinen

robotin peruskoordinaatistoon (kuva 3a), ja jälkimmäinen robotin laipan koordinaatistoon (kuva 3b), kappaleessa 2 esitettyjen menetelmien mukaisesti.



Kuva 3. SICK IVP 1200 laserskannerin kalibrointi robotin peruskoordinaatistoon (a) ja ranteeseen kiinnitetyn MicroEpsilon -laserskannerin kalibrointi ”Hand eye” -periaatteen mukaisesti (b) /7/.

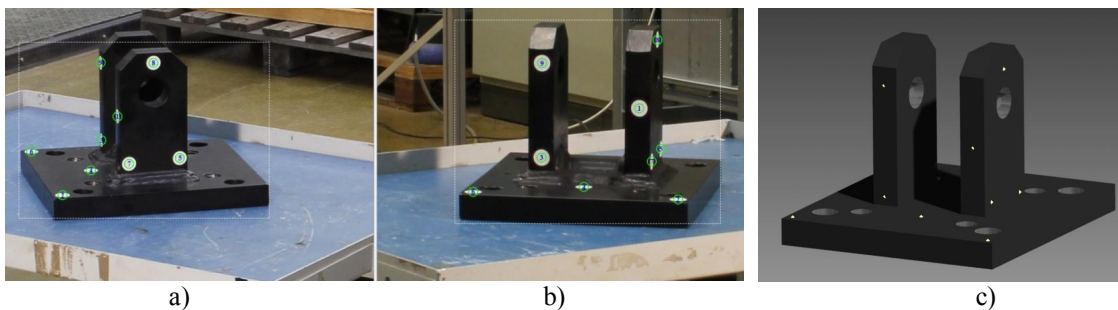
Paikoitustesteissä mitattiin pistepilvet kappaleiden paikoitusalueelta ja pistepilvi suodatettiin, ja segmentoitiin, minkä jälkeen pintasegmenteistä tunnistettiin kappaleet ja laskettiin niiden paikat. Kuva 4 havainnollistaa pistepilven mittausta ja käsittelyä. Kappaleen paikoitustuloksen perusteella koneistuskohte, esim. kappaleen purseinen reuna mitataan tarkemmalla laserskannerilla, jolle tehdään vastaavat analyysit, joskin rajoitetummin.



Kuva 4. Kuvassa a) on esitetty paikannettavat kappaleet, b) mitattu syvyyskartta ja c) lasketut pinta-segmentit

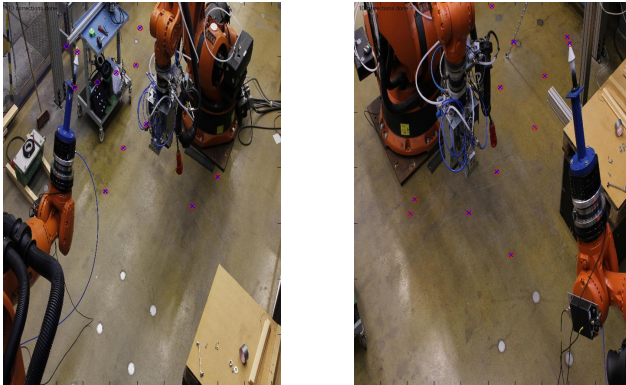
#### 4.1.2 Interaktiivinen kappaleen paikoitus

Interaktiivisessa paikoituksessa kappaleen paikka määritetään mittaamalla kameroilla kappaleisiin kiinnitettyjen tarramerkkien paikat ja parittamalla mitatut paikat referenssipintoihin, jotka saadaan CAD-mallista. Kuvassa 5 on esitetty kuvat, jotka on otettu kappaleesta kameroilla eri kulmista sekä CAD-malli, johon on merkitty kappaleen pintaan laitettujen merkkien paikat



Kuva 5. Kuvassa a) on paperimerkeillä merkitty kappale, kuvassa b) on sama kappale kuvattuna toisesta kulmasta oikealta ja kuvassa c) kappaleesta mitattujen merkkien paikat visualisoituna CAD-mallissa.

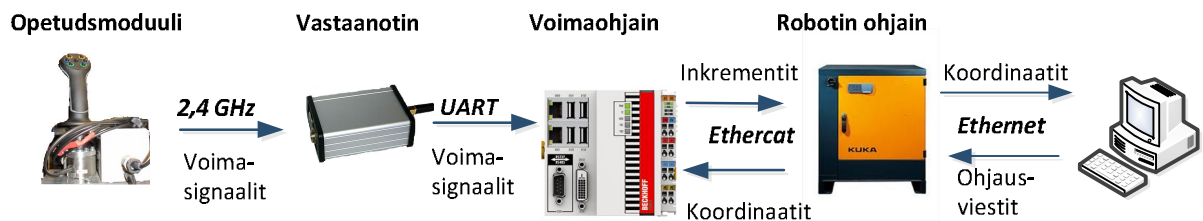
Kuva 6 havainnollistaa kalibrointia. Kuvissa esitetty kahdesta kamerasta otetut kuvat, joissa näkyy robottiin kiinnitetyn kalibrointityökalin paikat eri asemissa (punaisella ympäröidyt rastit).



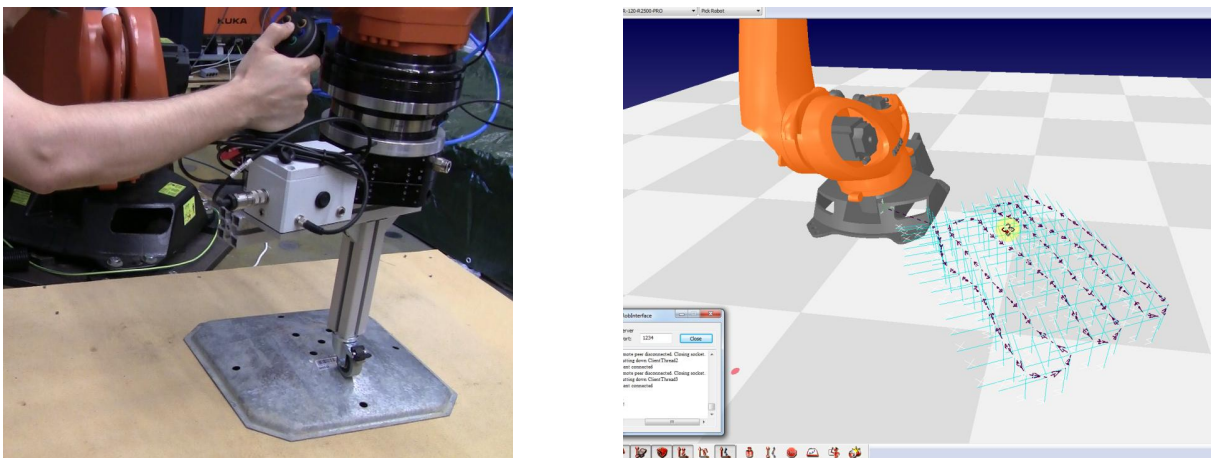
Kuva 6. Kalibrintipisteet interaktiivisen paikoitusjärjestelmän kameroiden kalibroinnissa /7/.

## 4.2 Ratojen opetus

Ratojen opetusta testattiin langattomalla yhteydellä varustetulla opetusmoduulilla ja sitä hyödyntävällä ohjausjärjestelmällä. Kuvassa 7 on esitetty järjestelmän rakenne. Järjestelmä koostuu langattomasta opetusmoduulista, vastaanotin yksiköstä, voimaohjain yksiköstä, robotin ohjaimesta. Opetusmoduuli (MEMS F/T K6D40-voima-anturi, signaalivahvistimet, ARM Cortex M0 prosessori, 24-bitn AD muunnin, 2.4 GHz radio, akut) on kytketty langattomasti vastaanotinyksikköön, joka on kytketty sarjaväylällä (UART) voimaohjain (Beckhoff's CX5020 sulautettu PC). Impedanssisäädin /10/ on toteutettu TwinCAT ohjelmana, joka kommunikoi robotin ohjaimen (Kuka KRC4) kanssa EtherCAT väylän kautta 4 ms säätöväylillä. Robotin ranteessa on lisäksi ATI voima-anturi, jota hyödynnetään opetusmoduulin kalibroinnissa. Ranneanturia käytetään myös voima-ohjatun liikkeen toteutuksessa kun robotti on kontaktissa ympäristöön ("kova kontakti"). Tätä varten PLC:ssä on kovaan kontaktiin viritetty impedanssisäädin. Kuvassa 8 on esitetty liikeradan opetusta testikkappaleella. Lisäksi kuvassa on esitetty opetettu rata EasyRob-simulointityökalulla.



Kuva 7. Robotin liikeratojen opetukseen kehitetyn järjestelmän rakenne.



Kuva 8. Vasemmassa kuvassa on esitetty liikeradan opetus testikkappaleella ja oikeassa kuvassa on esitetty testissä opetettu rata visualisoituna simulointiohjelmistossa

Opetusmoduulin kalibrointi tehdään yksinkertaisesti kiinnittämällä moduuli haluttuun paikkaan, käynnistetään voimaohjausohjelmiston kalibrointitila ja väännetään kahvaa muutama kerta eri suuntiin. Tämä vie aikaan alle yhden minuutin. Tämän jälkeen moduulin on valmis käyttöön.

## 5 Yhteenveto

Kehitetyillä anturijärjestelmillä on tavoitteena nopeuttaa nykyisin käytössä olevia työskentelytapoja robotilla suoritettavissa koneistustehtävissä. Kappaleet voidaan paikoittaa vapaammin robotin työympäristöön, minkä jälkeen koneistusradat voidaan generoida mittauksen perusteella tai kiinnittää ennalta lasketut koneistusradat paikoitettuihin kappaleisiin. Koneistusratoja voidaan myös opettaa joustavasti ohjaussauvan avulla eikä kappaleiden malleja tällöin tarvita. Menetelmät soveltuvat myös muihin robotilla tehtäviin operaatioihin kuten esimerkiksi hiontaan ja kiillotukseen. Robotilla tapahtuvat koneistustehtävät sopivat tapauksiin, joissa koneistuksen tarkkuusvaatimukset ovat matalia.

## 6 Kirjallisuus

1. Surdilovic, D., Zhao, H., Schreck, G., Krueger, J.: Advanced methods for small batch robotic machining of hard materials. Proceedings of the 7th German Conference on Robotics, Munich, Germany, May 21-22, 2012, pp. 284 – 289.
2. Karim, A., Verl, A.: Challenges and obstacles in robot-machining. Proceedings of the 2013 44th International Symposium on Robotics (ISR), Seoul, Korea, October 24-26, 2013. 4 p.
3. Ahola, J. M., Koskinen, J., Seppälä, T. and Heikkilä, T.: Development of impedance control for human/robot interactive handling of heavy parts and loads. Submitted to Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2015, Boston, USA, August 2-5, 2015. 6 p.
4. Heikkilä T., Ahola, J. M., Viljamaa, E., Järviluoma, M.: An interactive 3D sensor system and its programming for target localizing in robotics applications. Proceedings of the IASTED International Conference on Robotics, Phuket, Thailand, November 25-26, 2010, pp 89 -96.
5. Tsai, R.Y., Lenz, R.K.: A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration. IEEE Transactions on robotics and automation. vol. 5(1989)3, 345-358.
6. Shiu, Y.C., Ahmad, S.: Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX=XB$ . IEEE Transactions on Robotics and Automation. vol. 5(1989)3, 16-29.
7. Heikkilä, T., Ahola, J.M., Koskinen, J., Seppälä, T.: Calibration procedures for object locating sensors in flexible robotized machining. Proceedings The 10th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Senigallia, Italy, September 10 – 12, 2014. 6 p.
8. Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Van Duin, S., Norrish, J.: Recent progress on programming methods for industrial robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. vol. 28(2012), 87-94.
9. Ahola, J. M., Koskinen, J., Seppälä, T. and Heikkilä, T.: Calibration of the pose parameters between coupled 6-dof F/T sensors in robotics applications. Submitted to The 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany, September/October 28-3, 2015. 6 p
10. Vukobratovic, M., Surdilovic, D., Ekalo Y., Katic. D.: Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction. New Frontiers in Robotics –Vol. 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 200, 638 p.