



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# RÖNTGENDIFFRAKTIOROBOTTIEN TARKKUUSMITTAUKSET

Sauli Lappalainen

Opinnäytetyö  
Helmikuu 2016  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Kone- ja laiteautomaatio



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Kone- ja laiteautomaatio

LAPPALAINEN, SAULI:  
Röntgendiffraktiorobottien tarkkuusmittaukset

Opinnäytetyö 41 sivua, joista liitteitä 5 sivua  
Helmikuu 2016

---

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli jyvaskyläläinen Stresstech Oy, joka valmistaa mittalaitteita ja tuottaa palveluita laadunvalvontaan. Opinnäytetyön tarkoituksena oli suorittaa tarkkuusmittauksia toimeksiantajan valmistamille röntgendiffraktiorobottijärjestelmille osana toimeksiantajan normaalia tuotekehitystoimintaa mittauslaitteiden tarkkuuden, luotettavuuden ja toistettavuuden parantamiseksi. Työssä keskityttiin vain mittauksiin ja niiden tulosten analysointiin, joten varsinainen mittaustarkkuuden parantamiseen tähtäävät toimenpiteet rajattiin työn ulkopuolelle.

Tarkkuusmittaukset tehtiin käyttämällä kahta erilaista tapaa, kääntyvänivelisten robottien kalibrointiin suunniteltua Wiest LaserLAB -laitteistoa ohjelmistoinen ja Stresstechin omaa Xtronic-ohjelmistoa ja linjauskameraa. Kyseiset mittausmenetelmät valittiin, koska ne olivat jo yrityksen käytössä.

Tarkkuusmittauksia tehtiin usealle eri robotille. Kattavimmin tutkittu robotti oli yrityksen oma tuotekehitysrobotti, ja lisäksi mittauksia tehtiin asiakkaille lähtevillä roboteilla tuotantoaikataulun salliessa.

Mittaustulosten perusteella tutkittujen teollisuusrobottien tarkkuus vaihtelee robottiyksilöiden välillä. Lisäksi mittaustapahtumassa tehtävien liikkeiden ja asentojen välillä voi olla suuriakin eroja. Työstä saatujen tulosten perusteella yrityksessä aloitettiin uuden kohdistusteknologian kehitystyö, jonka avulla mittausrobottien tarkkuutta voidaan entisestään parantaa.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Mechanical and Production Engineering  
Machine Automation

LAPPALAINEN, SAULI:  
Accuracy Measurements of X-ray Diffraction Robots

Bachelor's thesis 41 pages, appendices 5 pages  
February 2016

---

The thesis was commissioned by Stresstech Oy from Jyväskylä, which produces equipment and provides services for quality control. The goal of the thesis was to carry out accuracy measurements for the X-ray diffraction robot systems produced by the company. The thesis was part of the company's research and development plan to increase the accuracy, reliability and repeability of X-ray diffraction equipment. This thesis concentrates only on taking measurements and analyzing them, so actual work aim to improve the measurement results was outside the scope of this thesis.

The accuracy measurement were taken by using two different systems: the Wiest LaserLAB, which is a calibration equipment for serial robots, and Stresstech's proprietary Xtronic software with an alignment camera. These measuring systems were chosen because they were already used in the company.

Accuracy measurement were made on several robots. The most comprehensive measurements were taken using Stresstech's own research and development robot. When the production timetables allowed, additional measurements were also made on robots which were to be sent to customers.

According to the results there is variation between individual robots of same model. In addition to this, the results varied between robot's different orientations during the simulated X-ray diffraction measurement. Based on the results the company has started a project for a new alignment method to increase the accuracy of measuring robots.

---

Key words: robot accuracy measurement

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TOIMEKSIANTAJAN JA TEKNOLOGIAN ESITTELY .....	7
2.1	Stresstech Oy .....	7
2.2	Xstress Robot.....	7
3	ROBOTIIKKA JA ROBOTIT .....	11
3.1	Teollisuusrobotiikka .....	11
3.2	Rakenne .....	12
3.2.1	Nivelet ja tukivarret.....	12
3.2.2	Ohjausjärjestelmä ja anturointi .....	13
3.2.3	Työkalu ja lisälaitteet .....	13
3.3	Robottityypit .....	14
3.3.1	Suorakulmainen robotti.....	14
3.3.2	SCARA-robotti .....	15
3.3.3	Sylinterimäinen robotti.....	15
3.3.4	Rinnakkaisrakenteinen robotti .....	16
3.3.5	Kiertyvänivelinen robotti .....	17
4	MITTAUSTEN TOTEUTUS .....	19
4.1	Wiest LaserLAB .....	19
4.2	Xtronic ja kameralinjaus .....	21
4.3	Mittaustekniikka .....	21
4.4	Työturvallisuus .....	22
5	ROBOTTI 1.....	24
5.1	Mittaus 1 .....	24
5.2	Mittaus 2 .....	26
5.3	Mittaus 3 .....	27
5.4	Mittaus 4 .....	28
6	ROBOTTI 2.....	30
6.1	Mittaus .....	30
7	ROBOTTI 3.....	32
7.1	Mittaus .....	32
8	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	34
	LÄHTEET.....	36
	LIITTEET .....	37
	Liite 1. Robotin 1 mittauspöytäkirjat .....	37
	Liite 2. Robotin 2 mittauspöytäkirja.....	40
	Liite 3. Robotin 3 mittauspöytäkirja.....	41

**ERITYISSANASTO**

Masterointi	Robotin akseleiden asennon nollaaminen
NDT	nondestructive testing, rikkomaton aineenkoestus
Rotaatio	Robotin x-y-tasossa suorittama kiertoliike
SCARA	Selective compliant assembly robotic arm
Tiltti	Robotin työkalun kallistus sivusuuntaan
XMU	X-ray main unit

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni sai alkunsa saadessani työharjoittelupaikan Stresstech Oy:stä, joka valmistaa mittalaitteita laadunvalvontaan. Harjoittelun aikana ilmeni yrityksen tarve selvittää röntgendiffraktiomittauksissa käytettyjen robottien tarkkuutta. Osassa Stresstechin valmistamia röntgendiffraktiolaitteita mittaustapahtuma on automatisoitu liittämällä varsinainen mittapää teollisuusrobottikäsivarteen. Robotilla saadaan sen ulottuvuuden ja suuren vapausastemäärän ansiosta mitattua huomattavasti suurempia ja monimutkaisempia kappaleita kuin tavanomaisella röntgenmittauslaitteella eli goniometrillä.

Opinnäytetyö oli tuotekehitysprojekti, ja sen tavoitteena oli kartoittaa yrityksen valmistamien mittausrobottilaitteiden tarkkuutta erilaisten mittausmenetelmien avulla. Saatavien tulosten oli tarkoitus toimia pohjana lisätutkimukselle, joka pyrki edelleen kehittämään mittalaitteiden tarkkuutta. Varsinainen tarkkuuden parantamiseen tähtäävä muutostyö rajattiin siten opinnäytetyön ulkopuolelle. Mittauskohteina olivat yrityksen oma tuotekehitysrobotti, jolle suoritettiin laajin mittausohjelma, sekä useita asiakkaille toimitettavia robotteja.

Työssä valittiin käytettäväksi kaksi toisistaan poikkeavaa mittausmenetelmää, Wiest AG:n LaserLAB sekä Stresstechin oma Xtronic-ohjelmisto ja röntgenkamera. Mittauslaitteistoja pystyttiin myös yhdistelemään, jolloin saatiin laajempia tuloksia ja lisää tietoa mittausten toistettavuudesta.

Opinnäytetyö käy läpi röntgendiffraktiomittauksen fysikaalisen taustateorian ja perusteet sekä robotiikan teoriaa ja peruskäsitteitä painottuen kiertyvänivelisiin teollisuusrobotteihin, jotka olivat työn tutkimuskohde. Työssä esitellään tarkkuusmittauksissa käytetty laitteisto ja menetelmät. Mittauksista saadut tulokset käsitellään, ja niistä tehdyt loppupäätelmät käydään läpi työn viimeisessä osassa.

## **2 TOIMEKSIANTAJAN JA TEKNOLOGIAN ESITTELY**

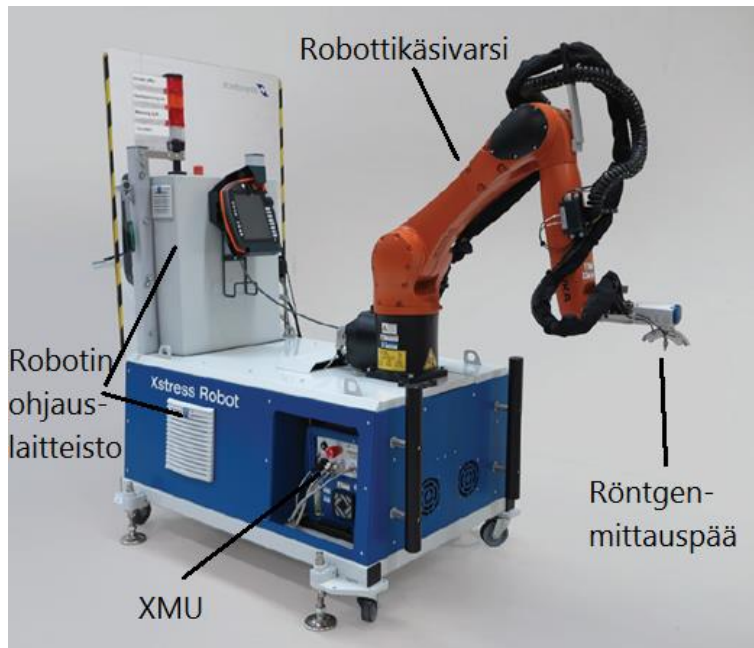
### **2.1 Stresstech Oy**

Stresstech Oy on Jyväskylän Vaajakoskella sijaitseva mittauslaitteita valmistava ja mittauspalveluita tuottava yritys. Se on perustettu vuonna 1984, ja se muodostaa Saksassa, Yhdysvalloissa ja Intiassa sijaitsevien tytäryhtiöidensä kanssa Stresstech Group -konsernin. Stresstech on erikoistunut mittausvälineisiin, jotka soveltavat rikkomatonta aineenkoestusta (NDT) mittaamaan jäännösausteniittia rautametalleissa, jäännösjännityksiä sekä mekaanisen muokkauksen ja lämpökäsittelyn aiheuttamia pinnankovuuden muutoksia. Lisäksi yritys tarjoaa mittauspalveluita. Tärkeimmät asiakassegmentit ovat autoteollisuus ja sen alihankkijat, metalliteollisuus ja tutkimuslaitokset sekä yliopistot.

Yrityksen mittalaitteissaan käyttämiä NDT-menetelmiä ovat koneistettujen osien laadunvalvontaan käytettävä Barkhausenin kohina ja jäännösjännitysten sekä jäännösausteniitin tutkimiseen käytettävä röntgendiffraktio. Lisäksi yritys valmistaa ainetta rikkovaa menetelmää käyttäviä reiänporauslaitteistoja jäännösjännitysten mittaamiseen. Stresstechin valmistamien mittalaitteiden koko vaihtelee käsikäyttöisistä anturi-mittalaitteyksiköistä automatisoituihin ja asiakkaan toiveiden mukaan räätälöityihin järjestelmiin. Tässä työssä käsitellään röntgendiffraktiota hyödyntävää Xstress Robot -sarjaa, jossa varsinaista mittausanturia ohjataan kuusinivelisellä teollisuusrobotilla.

### **2.2 Xstress Robot**

Stresstech Oy:n valmistamalla Xstress Robot -mittauslaitteistolla mitataan kiteisten materiaalien jäännösjännityksiä. Xstress Robot -järjestelmä (kuva 1) koostuu robotista ohjaus- ja hallintalaitteineen, robotin työkalulappaan kiinnitetystä mittauspäästä, röntgensäteen tuottamiseen käytettävästä röntgenyksiköstä (XMU) ja mittauksen hallintaan ja tallentamiseen käytetystä Xtronic-ohjelmistosta. Lisäksi Xstress Robot -järjestelmään kuuluvat robotti- ja röntgenturvallisuuden vaatimat oheis- ja turvalaitteet kuten suojaseinät ja turvapiirit.



KUVA 1. Xstress Robot KUKA:n robottikäsivarrella (Kuva: Stresstech Oy)

Xstress Robot -mittauslaitteiston käyttö jäännösjännitysten mittaamiseen perustuu röntgendiffraktioon kiteisessä aineessa. Kiteinen aine voidaan määrittellä kiinteäksi aineeksi, jossa atomit ovat järjestäytyneet säännölliseen järjestykseen kolmessa ulottuvuudessa (Cullity 1978, 32; Fitzpatrick ym. 2005 5–7). Jäännösjännitys on seurausta kiteisen aineen plastisesta muodonmuutoksesta, jossa aineen kiderakenteeseen aiheutuu muutoksia, jotka jättävät osan kiteistä jännitteiseen tilaan (Cullity 1978, 285–286). Jäännösjännityksiä syntyy kappaleen lämpökäsittelystä ja mekaanisesta muokkauksesta.

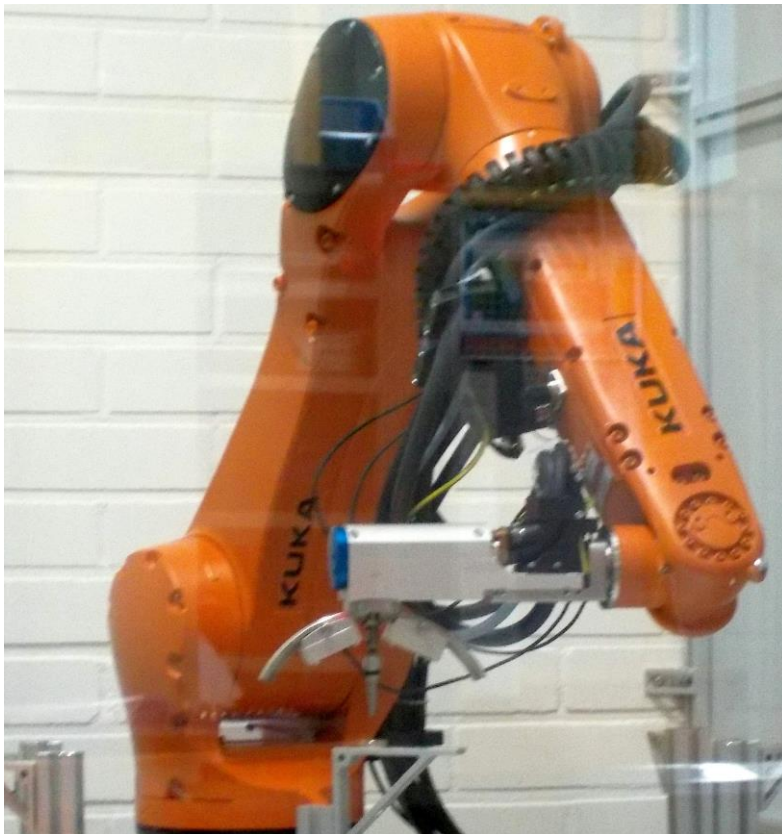
Röntgensäteilyn ominaisuutena on siroaminen atomirakenteeseen osuessaan. Siroavat säteet aiheuttavat toisiinsa vahvistavaa tai vaimentavaa interferenssiä. Siroava säteily voidaan havaita herkällä vastaanottimella eli detektorilla. Siroava säteily saavuttaa maksimi-intensiteettinsä, kun Braggin laki (1) toteutuu.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

Kun tunnetaan säteilyn aallonpituus  $\lambda$  ja säteilyn tulokulma  $\theta$ , voidaan selvittää tutkittavan aineen kiderakenteen diffraktoitumistasojen välinen etäisyys  $d$ ;  $n$  on aallonpituuksien monikerta. (Young & Freedman 2004, 1205-1208).

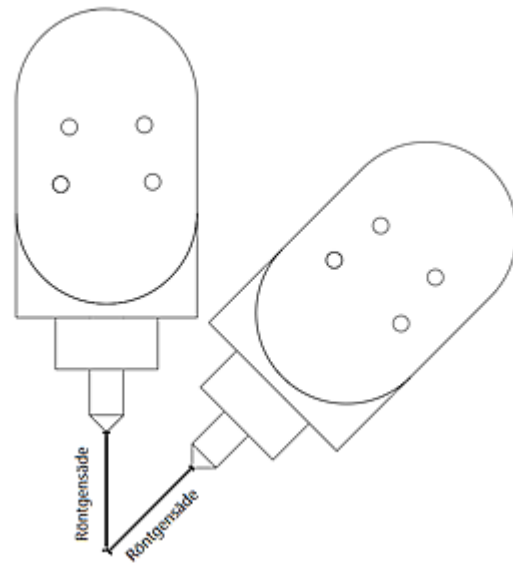
Xstress Robot -järjestelmällä jäännösjännityksiä mitattaessa käyttäjän tulee tietää mitattava materiaali, ja valita sen perusteella sopiva röntgenputki, detektoreiden asento ja kollimaattorin eli röntgensäteet kohdistavan suuttimen koko.

Mitattaessa jäännösjännitystä Xstress Robotilla olennaisin tarkkuuteen vaikuttava asia on robotin liikkeiden tarkkuus. Robotin työkalupiste sijaitsee edellä mainittujen parametrien avulla määritetyn kalibrointiarvon verran kollimaattorin kärjestä. Mittauksessa robotin työkalupiste pysyy paikallaan, mutta mittauspää kääntyy työkalupisteen pystysuoran akselin ympäri maksimissaan  $\pm 90^\circ$  (kuva 2).



KUVA 2. Robotti  $-90^\circ$  rotaatiossa.

Lisäksi mittauspää voidaan kallistaa mittauksen aikana  $\pm 45^\circ$  työkalupisteen pysyessä edelleen paikallaan ja röntgensäteiden etäisyyden pysyessä muuttumattomana (kuva 3). Mittauspään kääntymistä kutsutaan rotaatioksi ja kallistusta tiltiksi.



KUVA 3. Mittauspään kallistus eli tilitys  $0^\circ$  ja  $45^\circ$  kulmassa

### 3 ROBOTIIKKA JA ROBOTIT

Robotti voidaan määritellä moniakseliseksi laitteeksi, joka pystyy itsenäisesti suorittamaan ohjelmoituja tehtäviä ympäristössään. Robotit voivat siis toimia monissa tehtävissä, joissa on perinteisesti käytetty joko ihmisen suoraan ohjaamaa tai automatisoitua konetta tai työkalua. Sana robotti perustuu tsekin kielen pakkotyötä tarkoittavaan sanaan ”robota”. Itsenäisesti toimivaa konetta tarkoittavana se esiintyi ensimmäisen kerran tsekkiläisen Karel Čapekin näytelmässä R.U.R. vuonna 1920. Robotiikka on useiden tieteenalojen muodostama ala, joka tutkii ja käsittelee robottien suunnittelua, valmistusta ja käyttöä. (Siciliano & Khatib 2008, 1). Robotiikkaan vaikuttavia tieteenaloja ovat kone-, sähkö ja ohjelmistotekniikka.

Robotit voidaan jakaa käyttötarkoituksensa perusteella teollisuusrobotteihin ja palvelurobotteihin. Teollisuusrobotit toimivat nimensä mukaisesti teollisuuden tehtävissä. Niiden perustehtäviä ovat valmistus, kokoonpano, laadunvalvonta ja pakkaaminen. Palvelurobotit toimivat automatisoituina ihmisen tai tavanomaisen koneen korvaajina ja avustajina esimerkiksi terveydenhuollossa, tutkimuksessa ja sodankäynnissä.

#### 3.1 Teollisuusrobotiikka

Kansainvälinen standardisointijärjestö ISO määrittelee teollisuusrobotin vähintään kolminiveliseksi uudelleen ohjelmoitavaksi monikäyttölaitteeksi, jota voidaan käyttää kiinteästi asennettuna tai liikkuvana automatisoiduissa teollisuussovelluksissa (ISO 8373:2012). Robotin erottaa muista automaattisista koneista juuri sen uudelleenohjelmoitavuus: robotti pystyy tarvittaessa suorittamaan uutta tehtävää pelkällä ohjausohjelmiston muutoksella.

Ensimmäiset patentit teollisuusroboteista tehtiin 1950-luvulla, ja seuraavan vuosikymmenen alussa ensimmäiset robotit otettiin käyttöön autoteollisuudessa. 1970-luvun alussa tulivat käyttöön täysin sähkötoimiset ja mikrotietokoneen ohjaamat robotit. Saman vuosikymmenen jälkimmäisellä puoliskolla käyttöön tulivat modernit kuusiniveliset ja SCARA-robotit. 80-luvulta tähän päivään teollisuusrobottien

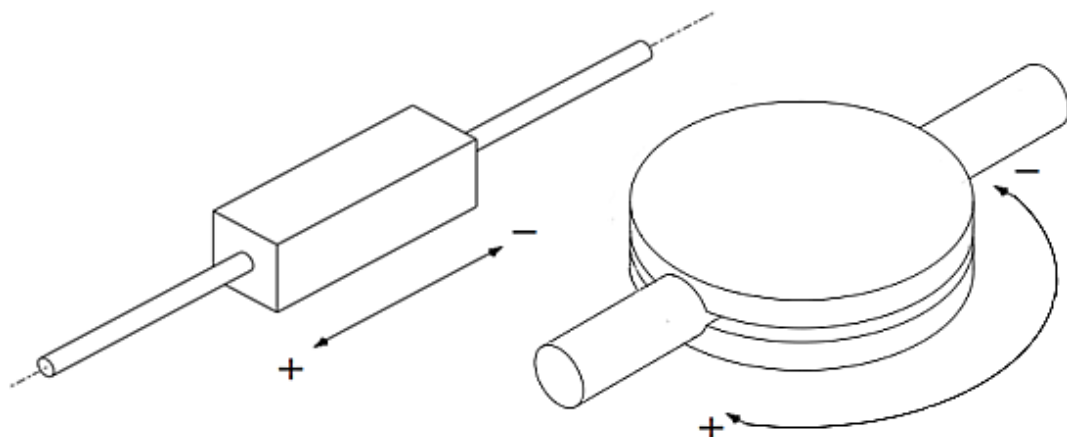
suorituskyky ja luotettavuus ovat parantuneet valtavasti, samalla kun niiden hinta on pudonnut noin kolmasosaan samalla ajanjaksolla (Hägele, Nilsson & Pires 2008, 964-969). Erityisesti tieto- ja verkkoteknologian kehitys on lisännyt robotiikan käytettävyyttä teollisuudessa.

## 3.2 Rakenne

Robottijärjestelmä koostuu varsinaisesta robotista ja sen tarvitsemista lisälaitteista, joita vaaditaan tietyn tehtävän suorittamiseen. Teollisuusrobottien erilaiset tyypit eroavat toisistaan suuresti, mutta niiden rakenne ja toimintaperiaate perustuvat samoihin teknisiin perusrakenteisiin.

### 3.2.1 Nivelet ja tukivarret

Perusrakenteeltaan robotin liikkuva osa eli manipulaattori koostuu jäykistä tukivarsista, joita yhdistävät toisiinsa nivelet (Waldron & Schmiebler 2008, 9; Bajd ym. 2010, 140). Nivelet ovat peruseriaatteeltaan lineerisiä tai kiertyviä (kuva 4). Robotti saa niveltensä liikuttamiseen tarvitsemansa käyttövoiman toimilaitteista, joista yleisin on sähköinen servomoottori, mutta myös hydraulisia ja paineilmalla toimivia robotteja voidaan käyttää tietyissä erityissovelluksissa. Tukivarsien ja nivelten lisäksi robottimanipulaattoriin kuuluvat alusta, jolla robotti kiinnitetään työskentelypisteeseensä, ja työkalulaippa, joka sijaitsee robotin viimeisen akselin päässä ja johon robotin työkalu kiinnitetään.



KUVA 4. Lineaarinen ja kiertyvä nivel

Yksittäinen nivel antaa robotille mahdollisuuden liikkua tai kääntyä kolmiulotteisen avaruuden yhteen suuntaan, eli yhden vapausasteen (Bajd ym. 2010, 2-5). Vapausasteiden lukumäärä määrittää, kuinka moneen suuntaan ja asentoon robottiin kiinnitetty työkalua voidaan liikuttaa. Täysi liikevapaus saadaan kuudella vapausasteella, jolloin työkalu voi liikkua kolmiulotteisen karteesisen eli suorakulmaisen koordinaatiston x-, y- ja z-suuntiin, ja lisäksi pyöriä kolmen toisiinsa nähden suorassa kulmassa olevien akseleiden ympäri (Bajd ym. 2010, 2).

Tukivarret ja nivelet muodostavat kinemaattisen ketjun, joka voi olla avoin tai suljettu. Avoimessa kinemaattisessa ketjussa tukivarren asentoon vaikuttavat sitä edeltävien nivelten ja tukivarsien asennot, kun taas suljetussa kinemaattisessa ketjussa asentoon vaikuttavat myös tukivarren jälkeen tulevien nivelten ja tukivarsien asennot. Avoimella kinemaattisella ketjulla saadaan tavallisesti suuri ulottuvuus ja asennon vapaus. Suljetun kinemaattisen ketjun etuina ovat suuri jäykkyys, nopeus ja tarkkuus, mutta haittapuolena on yleensä pieni työalue ja vapausasteiden määrä (Hägele, Nilsson & Pires 2008, 966).

### **3.2.2 Ohjausjärjestelmä ja anturointi**

Ohjausjärjestelmä sisältää robotin ohjaamiseen tarvittavan ohjelmiston laitteistoineen ja käyttöliittymän kuten käsiohjaimen sekä tehonsyötön. Ohjausjärjestelmä välittää käskyt robotin toimilaitteiden ja ohjelmien välillä. Se muuttaa robotille annetut käskyt liikekäskyiksi, ja valvoo niiden suorittamista. Anturointia robottijärjestelmä tarvitsee oman toimintansa hallintaan ja ulkoisten muutosten havainnointiin (Bajd ym. 2010, 49). Molemmat ovat tärkeitä, kun halutaan robotin suorittavan työnsä tarkasti, tehokkaasti ja turvallisesti.

### **3.2.3 Työkalu ja lisälaitteet**

Työkalu on robottijärjestelmän osa, joka manipulaattorin työkalulaippaan kiinnitettynä tekee varsinaisen työn. Robotin työkalut ovat erikoistuneet vaadittuun tehtävään kuten hitsaukseen, maalaamiseen ja esineiden liikkutteluun, ja ne ovat usein robottikäyttöön

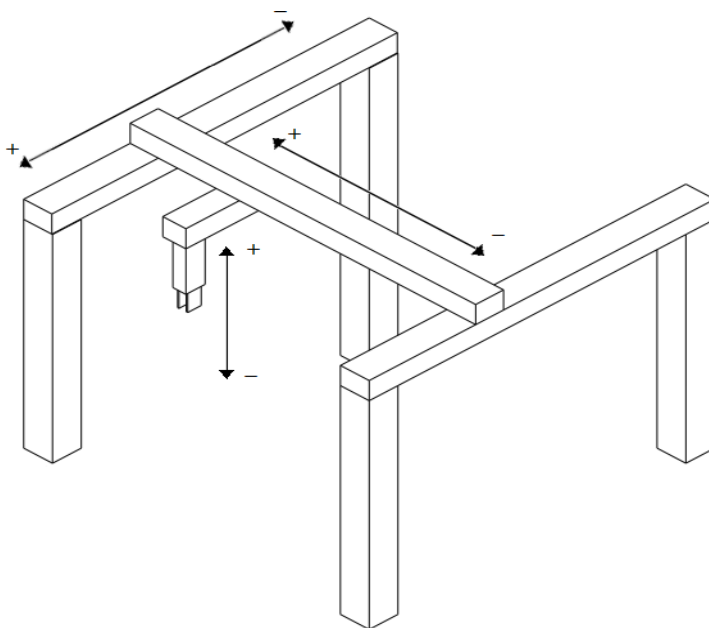
mukautettuja versioita tavallisista työkaluista. Oheis- ja turvalaitteet sisältävät mahdolliset apulaitteet, valaistuksen ja turvallisuutta lisäävät laitteet kuten suojaseinät.

### 3.3 Robottityypit

Teollisuusrobotit voidaan jakaa kinemaattisen perusrakenteensa sekä niveltensä lukumäärän ja rakenteen perusteella suorakulmisiin, rinnakkaisrakenteisiin, kääntyvänivelisiin, sylinterimäisiin ja SCARA-robotteihin. Erilaisilla robottityypeillä on omat vahvuutensa eri työtehtävissä, eikä ole taloudellisesti järkevää valita liian monimutkaista robottityyppiä yksinkertaiseen tehtävään.

#### 3.3.1 Suorakulmainen robotti

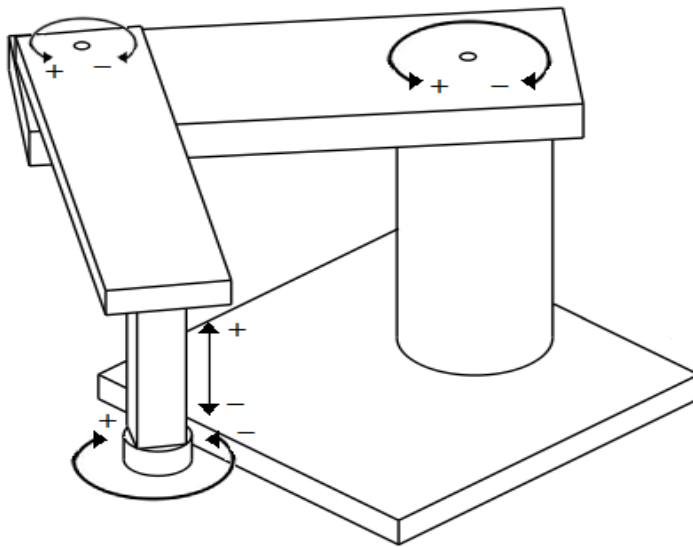
Suorakulmainen robotti (kuva 5) on toteutettu lineaarisilla akseleilla, jotka ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden (Bajd ym. 2010, 7). Suorakulmaisella robotilla on suuri ja yhtenäinen työalue, sen tarkkuus on hyvä ja se kestää suuriakin kuormia (Bajd ym. 2010, 137). Suorakulmaisia robotteja käytetään esimerkiksi pakkaamisessa, esineiden siirrossa ja kokoonpanossa, eli tehtävissä, joissa tarkkuus ja kuormankantokyky on tärkeämpää kuin suuri vapausasteiden määrä.



KUVA 5. Suorakulmainen portaalirobotti

### 3.3.2 SCARA-robotti

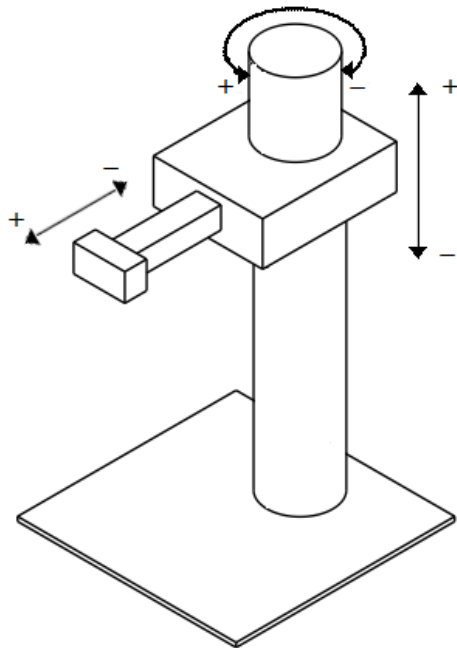
SCARA-robotissa on vähintään kaksi, usein kuitenkin kolme kiertyvää ja yksi lineaarinen nivel (kuva 6). Kiertyvien niveltensä ansiosta SCARA-robotti pystyy työskentelmään x-y-tasossa, ja lineaarinen nivel mahdollistaa pystysuuntaisen liikkeen, eli robotin työskentelyalue on sylinterimäinen (Bajd ym. 2010, 5). Rakenteensa vuoksi SCARA-robotti on tarkka ja nopea, ja sitä käytetään erilaisissa kokoonpanotehtävissä erityisesti elektroniikkateollisuudessa (Hägele, Nilsson & Pires 2008, 967). SCARA-robotilla on vähintään kolme vapausastetta.



KUVA 6. SCARA-robotti

### 3.3.3 Sylinterimäinen robotti

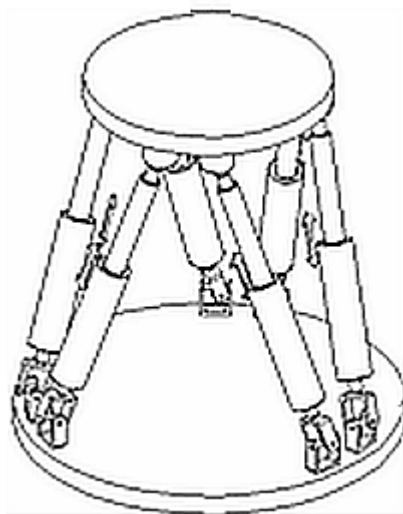
Sylinterimäisessä robotissa (kuva 7) ensimmäinen eli jalustaan kiinnitetty nivel on kiertyvä ja lisäksi siinä on vähintään kaksi lineaarista niveltä. Sylinterimäisen robotin työalue on sylinterimäinen. Sitä on perinteisesti käytetty pakkaamisessa ja kokoonpanossa, mutta nykyään muut robottityypit, erityisesti monipuolinen kääntyvänivelinen robotti, ovat syrjäyttämässä sylinterimäistä robottia.



KUVA 7. Sylinterimäinen robotti

### 3.3.4 Rinnakkaisrakenteinen robotti

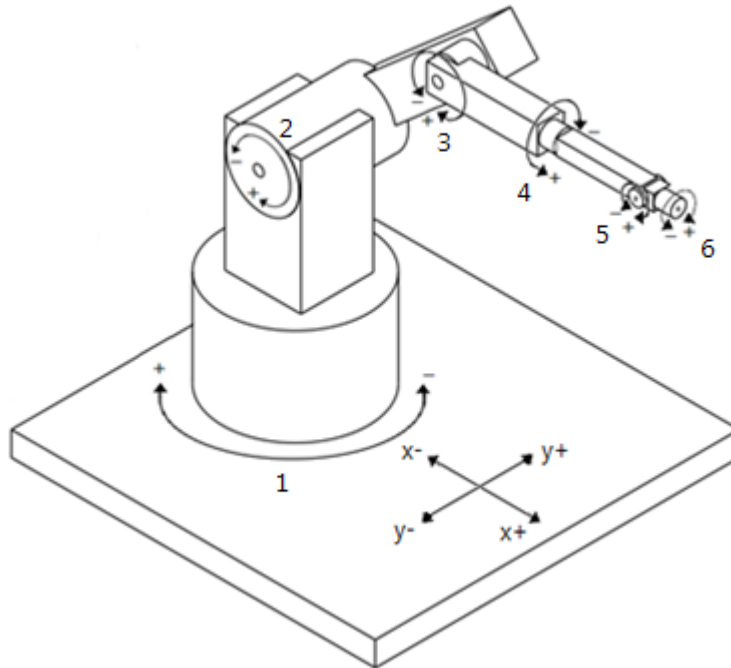
Rinnakkaisrakenteinen robotti koostuu kahdesta tai useammasta suljetusta kinemaattisesta ketjusta, jotka yhdistävät robotin alustaan ja työkalulaipan (Bajd ym. 2010, 142). Rinnakkaisrakenteisen robotin nivelet voivat olla lineaarisia (kuva 8) tai kääntyviä. Kyseinen rakenne on erittäin jäykkä, ja sillä saavutetaan hyvä tarkkuus ja korkeat nopeudet. Rinnakkaisrakenteisia robotteja käytetään esimerkiksi lajittelussa ja kokoonpanossa, tavallisesti kattoon asennettuna



KUVA 8. Rinnakkaisrakenteinen robotti (Kuva: PKMtriceps)

### 3.3.5 Kiertyvänivelinen robotti

Kiertyvänivelin robotti (kuva 9) erittäin yleinen ja monikäyttöinen teollisuusrobotti. Nimensä mukaisesti se koostuu peräkkäisistä avoimessa kinemaattisessa ketjussa olevista kiertyvistä nivelistä, joita on yleensä kuusi, joiden ansiosta se saavuttaa kuusi vapausastetta. Kiertyvänivelisen robotin kinemaattinen malli vastaa hyvin paljon ihmisen käsivarren liikeratoja.



KUVA 9. Kiertyvänivelinen robotti.

Tavallisessa kääntyvänivelisessä robotissa ensimmäinen nivel on kiinnitetty alustaan. Kaksi seuraavaa niveltä ovat ensimmäiseen nähden kohtisuorassa ensimmäistä vastaan. Neljäs, viides ja kuudes nivel muodostavat robotin ”ranteen”, ja kuudenteen niveleen kiinnittyy tavallisesti robotin työkalu.

Robotin liikkeiden tarkkaan hallintaan sekä automaatti- että käsiajolla on tärkeää tuntea robotin liikekoordinaatisto. Yleisimmin käytety koordinaatistot ovat perus-, maailma-, työkalu- ja kappelekoordinaatisto. Peruskoordinaatisto on normaalisti kiinnitetty robotin alustaan, ja sen z-akseli on sama kuin robotin ensimmäisen akseli. Z-akselin positiivinen suunta on ylöspäin. X- ja y-akselit ja niiden positiiviset suunnat ovat kuvan 9 mukaiset.

Maailmakoordinaatisto vastaa akseleiltaan peruskoordinaatistoa, mutta sen sijainti on käyttäjän päätettävissä. Maailmakoordinaatisto on hyödyllinen esimerkiksi useamman eri asentoon asennetun robotin yhteiskäytössä. Työkalukoordinaatisto sijaitsee robottiin kiinnitetyn työkalun työkalupisteessä. Työkalukoordinaatisto muuttaa asentoon työkalun mukana, joten sen avulla työkalun liikkeiden hallinta on yksinkertaista. Kappalekoordinaatisto kertoo robotin työssään tarvitseman ulkoisen kappaleen tai työkohteen sijainnin. (Bajd ym. 2010, 121-123; ABB 2014, 30-34).

Kiertyvänivelinen robottimanipulaattori soveltuu ulottuvuutensa ja mukautuvuutensa vuoksi moniin erilaisiin tehtäviin. Perinteisten teollisuuden tehtävien kuten hitsauksen ja kappaleiden käsittelyn lisäksi kääntyvänivelisten robottien käyttö laajenee niiden hinnan laskiessa ja käytön helpottuessa myös lähemmäs palvelurobotiikan tehtäviä. (Hägele, Nilsson & Pires 2008, 969-972).

## 4 MITTAUSTEN TOTEUTUS

Robottien tarkkuuden mittaamisessa päädyttiin käyttämään kahta toisistaan poikkeavaa menetelmää, jotka olivat kääntyvänivelisten teollisuusrobottien kalibrointiin käytettävä Wiest LaserLAB ja Stresstechin oman Xtronic-ohjelmiston ja röntgenkameran käyttö. Molemmat mittausmenetelmät olivat jo yrityksen käytössä, eikä niitä varten ollut siten tarvetta tehdä erillisiä hankintoja. Ennen varsinaisia mittauksia molempien laitteistojen käyttöön saatiin koulutus.

### 4.1 Wiest LaserLAB

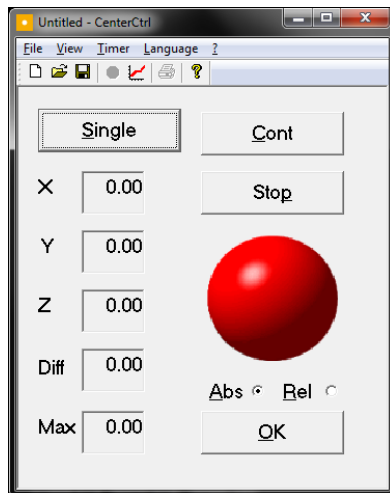
LaserLAB on saksalaisen Wiest AG:n kehittämä laitteisto teollisuusrobottien kalibrointiin. LaserLAB-laitteiston ja siihen kuuluvan ohjelmiston avulla voidaan kalibroida robotti, opettaa uusien työkalujen mitat sekä mitata toistotarkkuutta.

LaserLAB-laitteisto (kuva 10) perustuu lasersäteen taittumiseen robotin työkalulaippaan kiinnitetyssä kuulassa. LaserLABissa on viisi laserlähetin-vastaanotinparia viisikulmaisessa mittauslaitteessa, jotka rekisteröivät kuulan paikan muutokset ja lähettävät ne tietokoneelle tai robottiohjaimelle analysoitavaksi.. LaserLAB kommunikoi robotin ohjaimen kanssa sarjaportin tai USB-liitännän kautta. Valmistaja lupaa laitteistolle tarkkuudeksi vähintään 0,1 millimetriä. (Wiest AG 2014, 4.)



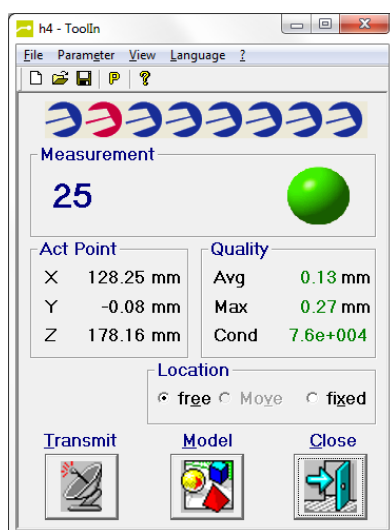
KUVA 10. Wiest LaserLAB-laitteisto

Tässä opinnäytetyössä käytettiin LaserLABia juuri toistotarkkuuden mittaamiseen. Ohjelmistona käytettiin Wiest AG:n CenterControllia (kuva 11), joka ilmoittaa mittauskuulan paikan muutokset x-y-z-koordinaatistossa millimetreinä. Mittaukset tehtiin kahdella tavalla: ajamalla robottia käsiajolla mittauksessa käytettäviin asentoihin, ja käyttämällä robottia automaattisesti, jolloin ohjauskäskyt tulivat Xtronicilta.



KUVA 11. Wiest CenterControl

Mittaus LaserLABilla edellyttää, että kuulatyökalun mitat opetetaan tarkasti robotille, jotta se pystyy toteuttamaan mittauksessa tehdyt liikkeet tarkasti. Mittauskuula ja sen kiinnitysvarsi vastaavat mitoiltaan röntgendiffraktiomittauksessa käytettyä työkalua, joten olisi mahdollista käyttää suoraan röntgenputken mittoja työkalukoordinaatteina, mutta parhaan mahdollisen tarkkuuden saavuttamiseksi työkalun mitat opetettiin Wiestin ToolIn-ohjelmalla (kuva 12).



KUVA 12. Wiest ToolIn

ToolInssä mittauskuulaa liikutetaan käsiajolla LaserLABin mittausalueella. LaserLAB laskee eron kuulun ja robotin liikkeen välillä, ja tekee korjaukset työkalun mittoihin, jotka lähetetään robottiohjaimelle.

## 4.2 Xtronic ja kameralinjaus

Toinen mittausmenetelmä oli Stresstechin oman Xtronic-ohjelmiston ja röntgensäteiden linjaamiseen käytetyn kamerasäteen käyttö. Xtronic on Xstress-järjestelmissä käytettävä tiedonkeruu- ja liikkeenhallintaohjelmisto. Se koostuu varsinaiseen röntgendiffraktiomittauksen datankäsittelystä ja liikkeenhallinnasta, kalibroinnista ja linjauksesta. Varsinainen tarkkuusmittaus tehtiin käyttämällä Xtronicin kameramoduulia. Normaalisti kameraa käytetään linjaamaan röntgensäde siten, että sen liikkeet vastaavat robotin liikkeitä.

Mittauksessa röntgensäde kohdistetaan kamerasäteen linssiin, joka on päällystetty fluoresoivalla metallikalvolla. Röntgensäde aiheuttaa tumman näkyvälle kalvolle vaalean pisteen, jonka Xtronicin hahmontunnistus tunnistaa. Xtronic ilmoittaa pisteen keskipisteen liikkeen kamerasäteen tarkkuuden mittayksikkönä eli pikseleinä.

## 4.3 Mittaustekniikka

Molemmilla laitteistoilla mittauksessa tehtävät liikkeet olivat samanlaiset. Tarkoituksena oli tehdä robotin työkalun liikkeet mahdollisimman samalla tavalla kuin varsinaisessa röntgendiffraktiomittauksessa. Mittaukset tehtiin siten, että robotin työkalupiste oli  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  ja  $90^\circ$  kulmassa x-y-tasossa. Kiertokulma  $0^\circ$  eli rotaatio oli aloituspiste, johon käytettävä mittalaitteisto nollattiin. Jokaisessa kolmessa pisteessä robotin mittapää ajattiin lisäksi  $-45^\circ$ ,  $-30^\circ$ ,  $30^\circ$  ja  $45^\circ$  kallistuskulmaan eli tilttiin. Mittaustapahtuma vastasi siten Xstress-laitteiston tavallista perusmittausta, jota käytetään esimerkiksi kalibroinnin verifiointiin ja laitteistojen lopputestaamiseen.

Yllä kuvatut mittaukset tehtiin jokaiselle robotille viidessä eri pisteessä, jotka olivat robotin nelikulmaisen työalueen kärkipisteet ja sen keskipiste. Työalueen koon määrittelevänä tekijänä olivat rotaatiot eli robotin kääntyminen  $90^\circ$ ,  $0^\circ$  ja  $90^\circ$  kulmiin

mittauksen aikana. Liian lähellä robotin alustaa olevassa mittauspisteessä robotin nivelet eivät mahdu kääntymään, ja liian kaukana alustasta robotin ulottuvuus ei riitä toteuttamaan liikkeitä. Ennen varsinaisia mittauksia työalue määriteltiin kokeellisesti ajamalla robottia käsiäjolla ja valitsemalla pisteet, joissa robotti pystyi toteuttamaan liikkeitä. Samaa työaluetta käytettiin kaikissa mittauksissa. Pisteiden sijainti määritettiin robotin käsiohjaimen antaman sijaintitiedon perusteella etäisyytenä robotin alustan keskikohdasta millimetreissä. Viiden mittauspisteen x-y-koordinaatit kuvan 9 mukaisessa koordinaatistossa olivat

- (635,0), työalueen keskipiste
- (550, -270)
- (720, -270)
- (720, 270)
- (550, 270).

Tarkkusmittauksista saatavista tuloksista tärkeimmät ovat x- ja y-arvot, eli työkalun liikkeet vaakasuorassa tasossa. Näiden liikkeiden virheistä aiheutuu mittauserätarkkuuksia röntgendiffraktiomittaukseen röntgensäteen liikkeessa pois halutulta mittausalueelta. Z-arvo eli työkalun pystysuora etäisyys mitattavasta kappaleesta kalibroidaan jokaisessa röntgendiffraktiomittauksessa erikseen käyttäjän antamien mittauseräparametrien mukaisesti, joten sen merkitys tarkkuuteen on vähäisempi. Xtronicia ja kameraa käytettäessä z-arvoa ei voida määrittää lainkaan, koska kameran välittämä data on kaksiulotteisesta x-y-tasosta. LaserLABilla saatujen tulosten vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi kameramittaukseen kaikissa mittauksissa käsiteltiin vain x- ja y-arvot.

#### **4.4 Työturvallisuus**

Xstress-laitteisto käyttää mittaamiseen röntgensäteilyä, joka on vaarallista terveydelle. Kaikki mittaukset, joissa käytettiin röntgenlaitteistoa, tehtiin Stresstech Oy:n säteilyturvallisuusohjeen mukaan. Vähimmäisetäisyytenä säteilylähteeseen pidettiin ohjeen mukaiset kaksi metriä, ja lisäksi mittauksissa käytettiin joko kiinteää tai siirrettävää suojaseinää mittaushenkilöstön ja säteilylähteen välissä.

LaserLAB-laitteisto käyttää mittauksissaan lasersädettä. LaserLABin laserit ovat pienitehoisia ja kuuluvat luokkaan 2, joten niiden teho ei riitä aiheuttamaan silmävaurioita muutoin kuin pitkäkestoisessa ja tietoisessa altistuksessa (Säteilyturvakeskus 2016).

## 5 ROBOTTI 1

Ensimmäinen mitattava robotti oli KUKA KR 10 R1100 Sixx ja robottiohjain KUKA KR4 Compact. Robotti oli yrityksen oma tuotekehitys- ja mittausrobotti. Kyseinen robottiyksilö oli ostettu ilman tehdaskalibrointia, eikä sen tarkkuuteen tuotekehitysmittauksissa oltu tyytyväisiä, joten opinnäytetyön aikana robotti lähetettiin valmistajalle tehdaskalibroitavaksi. Mittaus 1 robotille tehtiin ennen ja mittaukset 2-4 jälkeen tehdaskalibroinnin. Robotin 1 mittauspöytäkirjat ovat liitteessä 1.

### 5.1 Mittaus 1

Ensimmäinen mittaus robotille tehtiin ennen tehdaskalibrointia käyttäen LaserLABia ja ajamalla robottia käsiohjauksella haluttuun asentoon ja kirjaamalla asennon muutokset CenterControllilla.

Tuloksista analysoitiin kaikkien viiden mittauspisteen arvoista taulukon 1 mukaiset tunnusluvut. Vaihteluväli kuvaa koko mittausdatan suurimman ja pienimmän tuloksen erotusta, joka röntgendiffraktiomittauksen toistotarkkuuteen. Suurin virhe ja suurin tilttien välinen virhe yhdessä pisteessä vaikuttavat röntgendiffraktiomittauksen absoluuttiseen tarkkuuteen.

TAULUKKO 1. Robotti 1:n ensimmäisen mittauksen 0° rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,14
Vaihteluväli y	0,3
Suurin virhe x	0,09
Suurin virhe y	-0,22
Suurin tilttien välinen ero x	0,13
Suurin tilttien välinen ero y	0,18

Mittausten perusteella 0° rotaatio oli selvästi tarkkuudeltaan paras. Tulosten perusteella mittauspisteellä ei ollut juurikaan merkitystä, ainoastaan ensimmäiseksi mitatussa

keskipisteessä saatiin noin 0,1 millimetrin ero muihin pisteisiin. Tilttien eli kallistuskulmien virheet jäivät myös pieniksi.

Sen sijaan rotaatioissa  $-90^\circ$  ja  $+90^\circ$  virheet kasvoivat suuriksi. Taulukoiden 2 ja 3 perusteella sekä suurimmat virheet että virheiden vaihteluväli kasvoivat moninkertaisiksi. Myös suurimmat erot tilttien välillä kasvoivat noin kaksinkertaisiksi. Mittauspisteen sijainnilla havaittiin olevan pientä vaikutusta: pisteessä (550, 270) rotaation  $-90^\circ$  molempien arvojen tarkkuus oli huomattavasti parempi kuin neljässä muussa pisteessä.

TAULUKKO 2. Robotti 1:n ensimmäisen mittauksen  $-90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,50
Vaihteluväli y	0,63
Suurin virhe x	0,43
Suurin virhe y	-0,73
Suurin tilttien välinen ero x	0,29
Suurin tilttien välinen ero y	0,26

TAULUKKO 3. Robotti 1:n ensimmäisen mittauksen  $+90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,65
Vaihteluväli y	0,58
Suurin virhe x	0,86
Suurin virhe y	-0,38
Suurin tilttien välinen ero x	0,35
Suurin tilttien välinen ero y	0,33

Ensimmäisen mittauksen perusteella  $0^\circ$  rotaatioon verrattuna kahdessa muussa rotaatiossa syntyy vähintään kaksinkertainen virhe. Eroa selittää osaltaan se, että robotin mittaus aloitetaan  $0^\circ$  rotaatiossa, jolloin muiden rotaatioiden virhe kasvaa, jos robotin muuttaessa orientaatiotaan sen työkalupisteen sijainti muuttuu.

## 5.2 Mittaus 2

Toinen mittaus robotille suoritettiin LaserLABilla sen tultua tehdaskalibroinnista. Mittaustekniikka oli sama kuin mittauksessa 1. Mittaustulosten (taulukot 4, 5 ja 6) perusteella tehdaskalibroinnista ei ollut apua robotin tarkkuuteen.

TAULUKKO 4. Robotti 1:n toisen mittauksen  $0^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,68
Vaiheluväli y	0,62
Suurin virhe x	0,35
Suurin virhe y	0,40
Suurin tilttien välinen ero x	0,36
Suurin tilttien välinen ero y	0,62

TAULUKKO 5. Robotti 1:n toisen mittauksen  $-90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,64
Vaiheluväli y	1,26
Suurin virhe x	-0,44
Suurin virhe y	-0,99
Suurin tilttien välinen ero x	0,27
Suurin tilttien välinen ero y	0,44

TAULUKKO 6. Robotti 1:n toisen mittauksen  $+90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,74
Vaiheluväli y	0,94
Suurin virhe x	-0,48
Suurin virhe y	1,03
Suurin tilttien välinen ero x	0,12
Suurin tilttien välinen ero y	0,30

Tulosten vaihteluväli heikkeni kaikissa kolmessa rotaatiossa, erityisesti  $0^\circ$  rotaatiossa verrattuna kalibroimattomaan. Ainoastaan rotaatiossa  $90^\circ$  suurin tilttien välinen ero pystyi samana tai parani hieman.

Mittauspaikoilla oli myös pieni vaikutus tarkkuuteen erityisesti y:n arvoissa. Rotaation  $-90^\circ$  y:n arvojen virhe oli yli 0,80 millimetriä pisteessä (550, 270), kun taas rotaation  $+90^\circ$  y:n arvot ylittivät 0,80 millimetriä pisteissä (550, -270) ja (720, -270). Huomattavaa on se, että molempien rotaatioiden y:n arvojen saavuttaessa suuren, yli 0,80 millimetrin virheen olivat x-arvon virheet suurimmillaankin vain 0,26 millimetriä.

Heikot tulokset voivat johtua robotin heikosta masteroinnista. Robottia masteroitiin useaan otteeseen tehdaskalibroinnin jälkeen, mutta tarkkuutta ei saatu hyväksi. Myös työkalun mittojen opettamisessa on saattanut virhe, jolloin mittauskuula liikkuu virheellisesti ja antaa virheellisiä tuloksia CenterControllissa.

### 5.3 Mittaus 3

Kolmas mittaus tuotekehitysrobotille tehtiin Xtronicilla ja kameralla. Kameran ilmoittamat arvot olivat pikseleinä, ja kameran tarkkuus oli 72 pikseliä millimetrillä. Lisäksi kameran ja LaserLABin koordinaatistot olivat päinvastaiset, joten selvyiden vuoksi tämän mittauksen tulokset muutettiin LaserLAB-mittausta vastaavaksi (taulukot 7, 8 ja 9).

TAULUKKO 7. Robotti 1:n kolmannen mittauksen  $0^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,28
Vaiheluväli y	0,20
Suurin virhe x	0,14
Suurin virhe y	-0,13
Suurin tilttien välinen ero x	0,25
Suurin tilttien välinen ero y	0,13

TAULUKKO 8. Robotti 1:n kolmannen mittauksen  $-90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,69
Vaiheluväli y	0,95
Suurin virhe x	-0,43
Suurin virhe y	-1,19
Suurin tilttien välinen ero x	0,29
Suurin tilttien välinen ero y	0,20

TAULUKKO 9. Robotti 1:n kolmannen mittauksen  $+90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	1,32
Vaiheluväli y	0,93
Suurin virhe x	0,74
Suurin virhe y	1,00
Suurin tilttien välinen ero x	0,54
Suurin tilttien välinen ero y	0,24

Kolmannen mittaukset perusteella  $0^\circ$  rotaatio on edelleen tarkka. Rotaatio  $-90^\circ$  oli erityisen epätarkka pisteissä (635, 0), (550, 270) ja (720, 270), erityisesti y-suuntainen muutos kasvoi lähes millimetriin. Vastaavasti rotaatio  $+90^\circ$  oli huomattavan epätarkka pisteissä (635, 0), (550, -270) ja (720, -270).

Huomattavaa oli kolmannen mittauksen  $+90^\circ$  ja  $-90^\circ$  rotaatioiden tulosten samankaltaisuus mittauksen kaksi kanssa. Koska kyseiset mittaukset tehtiin täysin toisistaan poikkeavilla laitteistoilla, ovat samansuuntaiset tulokset osoitus mittauksen toistettavuudesta.

#### 5.4 Mittaus 4

Neljäs mittaus tehtiin LaserLABilla siten, että robotin liikkeiden ohjauskomennot tulivat Xtronicilta. Muutoin robotin liikkeet vastasivat edellisiä mittauksia. Tulosten (taulukot 10, 11 ja 12) odotettiin olevan samankaltaisia kuin toisessa ja kolmannessa

mittauksessa, koska mittausliikkeet olivat täysin samanlaiset, eikä robotiin tehty muutoksia mittausten välillä.

TAULUKKO 10. Robotti 1:n neljännen mittauksen  $0^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,43
Vaiheluväli y	0,81
Suurin virhe x	-0,32
Suurin virhe y	0,53
Suurin tilttien välinen ero x	0,43
Suurin tilttien välinen ero y	0,80

TAULUKKO 11. Robotti 1:n neljännen mittauksen  $-90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,84
Vaiheluväli y	1,18
Suurin virhe x	-0,53
Suurin virhe y	-0,91
Suurin tilttien välinen ero x	0,55
Suurin tilttien välinen ero y	0,61

TAULUKKO 12. Robotti 1:n neljännen mittauksen  $+90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,76
Vaiheluväli y	0,99
Suurin virhe x	0,53
Suurin virhe y	1,02
Suurin tilttien välinen ero x	0,38
Suurin tilttien välinen ero y	0,22

Tulokset vastasivat hyvin mittauksista 2 ja 3 saatuja tuloksia. Kuten mittauksissa kaksi ja kolme, oli neljännessäkin mittauksessa eroja mittauspisteiden välillä y:n arvossa. Rotaatiossa  $-90^\circ$  y-suuntaan muodostui suuri, yli 0,80 millimetrin virhe pisteessä (550, 270), ja rotaatiossa  $+90^\circ$  virhe oli yhden millimetrin pisteessä (550, -270).

## 6 ROBOTTI 2

Toinen mitattava robotti oli myöskin mallia KUKA KR 10 R1100 Sixx ja sen robottiohjain oli mallia KR 4 Compact. Robottijärjestelmä vastasi ominisuuksiltaan robottia 1.

### 6.1 Mittaus

Robotille suoritettiin tuotantoaikataulun salliessa vain LaserLAB-mittaus käsiajolla. Mittaus toteutettiin täysin samalla tavalla kuin robotin 1 ensimmäinen ja toinen mittaus.

TAULUKKO 13. Robotti 2:n tarkkuusmittauksen 0° rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,40
Vaiheluväli y	0,69
Suurin virhe x	0,26
Suurin virhe y	-0,41
Suurin tilttien välinen ero x	0,28
Suurin tilttien välinen ero y	0,37

TAULUKKO 14. Robotti 2:n tarkkuusmittauksen -90° rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	2,34
Vaiheluväli y	1,03
Suurin virhe x	1,52
Suurin virhe y	1,36
Suurin tilttien välinen ero x	0,51
Suurin tilttien välinen ero y	0,41

TAULUKKO 15. Robotti 2:n tarkkuusmittauksen +90° rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	1,18
Vaiheluväli y	2,79
Suurin virhe x	1,29
Suurin virhe y	-1,35
Suurin tilttien välinen ero x	0,67
Suurin tilttien välinen ero y	0,67

Taulukoiden 13-15 perusteella toisen robotin tulokset vastaavat aikaisempia mittauksia. 0° rotaatio on selvästi tarkin kahden muun rotaation ollessa huomattavasti epätarkempia. Tässä mittauksessa oli huomattavinta erityisesti suuri vaihteluväli -90° rotaation x-arvossa ja +90° rotaation y-arvossa, jotka kasvoivat yli kahteen millimetriin. Mittauspisteen sijainnilla ei ollut juurikaan merkitystä, 0° rotaatio oli tasaisesti yhtä tarkka kaikissa mittauspisteissä, kun taas kaksi muuta rotaatiota saavuttivat saman suuruusluokan virheen kaikissa mittauspisteissä.

## 7 ROBOTTI 3

Kolmaskin robotti oli malliltaan KUKA KR 10 R1100 Sixx ja sen robottiohjain oli KUKA KR 4 Compact. Se oli rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan täysin ensimmäisen ja toisen mittauksen robotteja vastaava, ja se oli valmiiksi tehdaskalibroitu kuten robotti 2. Robotille suoritettiin masterointi KUKAn omalla EMD-masterointilaitteistolla ennen mittauksia.

### 7.1 Mittaus

Robotti oli asiakkaalle toimitettava robotti, joten sille ehdittiin suorittaa vain LaserLAB-mittaus käsiajolla. Mittauksessa suoritettiin lisäksi ylimääräisiä toistettavuusmittauksia mittaamalla tulokset  $0^\circ$  tilissä aina  $-45^\circ$  ja  $+45^\circ$  tilittien jälkeen sekä siirryttäessä uuteen rotaatioon. Toistettavuuskokeita käytettiin LaserLABin toistotarkkuuden määrittämiseen, eikä niistä katsottu aiheutuvan muutoksia varsinaisiin mittaustuloksiin.

TAULUKKO 16. Robotti 3:n tarkkuusmittauksen  $0^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,23
Vaiheluväli y	0,71
Suurin virhe x	0,21
Suurin virhe y	0,43
Suurin tilttien välinen ero x	0,22
Suurin tilttien välinen ero y	0,53

TAULUKKO 17. Robotti 3:n tarkkuusmittauksen  $-90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,78
Vaiheluväli y	0,41
Suurin virhe x	0,95
Suurin virhe y	0,69
Suurin tilttien välinen ero x	0,65
Suurin tilttien välinen ero y	0,07

TAULUKKO 18. Robotti 3:n tarkkuusmittauksen  $+90^\circ$  rotaation tunnusluvut

	millimetriä
Vaihteluväli x	0,67
Vaiheluväli y	0,45
Suurin virhe x	0,97
Suurin virhe y	0,73
Suurin tilttien välinen ero x	0,60
Suurin tilttien välinen ero y	0,15

Mittaustuloksissa huomattavin ero oli rotaatioiden  $-90^\circ$  ja  $+90^\circ$  y-suuntien tilttien välisten maksimiarvojen erossa, jotka olivat koko mittaussarjan pienimpiä. Muuten tulokset olivat samansuuntaisia kuin robotin 1 mittauksista 2–4 saadut. Mittauspisteellä ei ollut huomioitavaa vaikutusta pisteeseen.

Toistotarkkuusmittauksen perusteella LaserLABin toistotarkkuus oli hyvä. Suurin ääripäiden ero toistotarkkuudessa oli 0,07 millimetriä, joka on alle valmistajan lupaamaan vähimmäistarkkuuden.

## 8 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tarkkuusmittausten mittaustekniikan perusteella oli jo etukäteen pääteltävissä, että mittauksen aloittaminen  $0^\circ$  rotaatiossa aiheuttaisi todennäköisesti virheen kasvun kahdessa muussa rotaatiossa, koska robotti joutuu tekemään yhden ylimääräisen liikkeen päästäkseen kyseisiin asentoihin.  $0^\circ$  rotaatiossa olikin kaikissa mittaustapauksissa vähintään virhettä.

Mittauslaitteita valmistettaessa tulisi pyrkiä mahdollisimman pieneen virheeseen. Xstress Robot –järjestelmässä käytettävien teollisuusrobottien toistotarkkuudeksi valmistaja lupaa  $\pm 0,03$  millimetriä. Robotin mittauksessa tekemät liikkeet, joissa työkalupiste pysyy paikallaan robotin orientaation muuttuessa eivät kuitenkaan ole täysin yhteneväisiä toistotarkkuuden kanssa, vaan määräävä tekijä on robotin absoluuttinen tarkkuus. Robottivalmistajat eivät tavallisesti ilmoita absoluuttista tarkkuutta, mutta nyrkkisääntönä absoluuttinen tarkkuus on noin 5-10-kertainen toistotarkkuuteen verrattuna.

Mittausteknisesti tuloksia voidaan pitää melko luotettavina robotin 1 tapauksessa, mutta toisen ja kolmannen robotin tulosten toistettavuutta ei voida arvioida, koska mittauksiin eri menetelmillä ei ollut aikaa. Erityisesti robotin 2 suuret virheet olisivat vaatineet mittauksia useammalla eri tavalla. Robotin 1 toisen, kolmannen ja neljännen mittauksen tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan erityisesti  $-90^\circ$  ja  $+90^\circ$  rotaatioissa. Kahdella toisistaan poikkeavalla menetelmällä tehdyt mittaukset ja niiden yhteneväiset tulokset parantavat mittausten luotettavuutta.

Tarkkuusmittaukset pyrittiin tekemään mahdollisimman samalla tavalla kuin röntgendiffraktiomittaukset. Tarkkuusmittauksissa ei voida kuitenkaan simuloida röntgendiffraktiomittauksessa tehtävää mittauskorkeuden niinkutsuttua touchdown-kalibrointia, jossa kollimaattori ajetaan kiinni mitattavaan kappaleeseen, jonka jälkeen kollimaattoria nostetaan kalibrointiaron verran ylöspäin. Stresstechin aikaisemmilla Mitsubishiin teollisuusrobotteihin perustuvilla Xstress-laitteistoilla mitattaessa touchdown-kalibroinnin suorittaminen jokaisessa rotaatiossa on parantanut mittaustarkkuutta. Orientaatiovirhettä voisi yrittää pienentää muuttamalla mittauspään rakennetta sellaiseksi, että kollimaattori olisi yhdensuuntainen robotin kuudennen

akselin kanssa, jolloin rotaation muuttamiseen tarvittaisiin vain yhden akselin kulman muutos.

Opinnäytetyön tulosten perusteella Stresstechillä aloitettiin uusi laserkohdistukseen perustuva tuotekehitysprojekti parantamaan röntgendiffraktiorobottien tarkkuutta.

## LÄHTEET

ABB. 2014. Operating manual – RobotStudio. Käyttöopas. Ruotsi: ABB.

Bajd, T., Mihelj, M., Lenarčič, J., Stanovnik, A. & Munih, M. 2010. Robotics. Saksa: Springer.

Cullity, B. 1978. Elements of X-ray Diffraction. 2nd Edition. Yhdysvallat: Addison-Wesley

Fitzpatrick, M., Fry, A., Holdway, P., Kandil, F., Shackleton, J. & Suominen, L. 2005. Measurement Good Practice Guide No. 52. Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction – Issue 2. Iso-Britannia: National Physical Laboratory.

Hägele, M., Nilsson, K. & Pires, N. 2008. Industrial Robotics. Teoksessa Siciliano, B. & Khatib, S. (toim.) Springer Handbook of Robotics. Saksa: Springer-Verlag, 963–986.

ISO 8373:2012. Robots and robotic devices – Vocabulary. 2012. International Organization for Standardization.

Jenkins, R. & Snyder, R. 1996. Introduction to X-ray Powder Diffractometry. Yhdysvallat: Wiley-Interscience.

Scheinman, J. & McCarthy, M. 2008. Mechanisms and Actuation. Teoksessa Siciliano, B. & Khatib, S. (toim.) Springer Handbook of Robotics. Saksa: Springer-Verlag, 67–86.

Siciliano, B. & Khatib, O. 2008. Springer Handbook of Robotics. Saksa: Springer-Verlag.

Säteilyn käyttö Stresstech Oy:ssa. 2013. Turvallisuusohje. Jyväskylä: Stresstech Oy.

Säteilyturvakeskus. Laserluokat. Verkkodokumentti. Luettu 2.2.2016.  
<http://www.stuk.fi/aiheet/laserit/laserluokat>

Waldron K. & Schiedeler J. 2008, Kinematics. Teoksessa Siciliano, B. & Khatib, S. (toim.) Springer Handbook of Robotics. Saksa: Springer-Verlag, 9–33.

Wiest AG. LaserLAB. 2009. Ohjekirja. Luettu 23.1.2016. [http://www.wiest-ag.com/system/files/kundendateien/02.10.14/LaserLAB\\_en.pdf](http://www.wiest-ag.com/system/files/kundendateien/02.10.14/LaserLAB_en.pdf)

Young, H. & Freedman, R. 2004. University Physics. 11<sup>th</sup> Edition. Yhdysvallat: Addison-Wesley

## LIITTEET

## Liite 1. Robotin 1 mittauspöytäkirjat

1 (3)

Robotti 1 mittaus 1													
Kalibrointi ja mittaukset 2015-09-14													
<b>Piste 1 = 635,0</b>		<b>0,0 rot 0</b>	-45	-30	30	45	<b>Piste 3 = 720,-270</b>		<b>rot 0</b>	-45	-30	30	45
	x		0,01	-0,05	-0,01	0,05		x		-0,01	0,1	0,06	0,01
	y		-0,19	-0,14	-0,22	-0,19		y		0,07	0,07	0,07	0
	z		0,08	0,08	-0,1	-0,09		z		0,01	0,02	-0,01	-0,13
		<b>0,0 rot -90</b>	-45	-30	30	45		<b>rot -90</b>					
	x		0,43	0,3	0,14	0,27		x		0,08	-0,07	-0,01	-0,03
	y		-0,51	-0,52	-0,46	-0,43		y		-0,73	-0,64	-0,47	-0,58
	z		-0,18	-0,16	-0,25	-0,12		z		-0,25	-0,22	-0,28	-0,32
		<b>0,0 rot 90</b>	-45	-30	30	45		<b>rot 90</b>					
	x		0,45	0,5	0,56	0,72		x		0,21	0,22	0,41	0,48
	y		-0,26	-0,2	-0,07	-0,02		y		-0,28	-0,28	-0,33	-0,38
	z		0,16	0,02	-0,48	-0,57		z		0,19	0,07	-0,4	-0,52
<b>Piste 2 = 550,-270</b>		<b>rot 0</b>	-45	-30	30	45	<b>Piste 5 = 550,270</b>		<b>rot 0</b>	-45	-30	30	45
	x		0,09	0,06	-0,04	-0,04		x		0,06	0,03	0,03	0,08
	y		-0,13	-0,03	-0,01	-0,04		y		-0,1	0	-0,02	0,08
	z		0,06	0,04	-0,05	-0,11		z		0,26	0,17	-0,09	-0,2
		<b>rot -90</b>						<b>rot -90</b>					
	x		0,23	0,08	0,09	0,1		x		0,08	0	0,07	0,06
	y		-0,7	-0,6	-0,57	-0,58		y		-0,22	-0,14	-0,1	-0,12
	z		-0,18	-0,19	-0,31	-0,29		z		-0,09	-0,1	-0,14	-0,23
		<b>rot 90</b>						<b>rot 90</b>					
	x		0,23	0,21	0,46	0,49		x		0,5	0,48	0,66	0,73
	y		-0,32	-0,3	-0,33	-0,32		y		-0,11	-0,1	0,08	0,13
	z		0,23	0,14	-0,28	-0,38		z		0,11	-0,08	-0,52	-0,68
<b>Piste 4 = 720,270</b>		<b>rot 0</b>	-45	-30	30	45							
	x		0,08	0,03	0,07	0,05							
	y		-0,08	-0,06	0	-0,08							
	z		0,17	0,17	-0,13	-0,23							
		<b>rot -90</b>											
	x		0,28	0,16	0,01	0,02							
	y		-0,42	-0,39	-0,38	-0,4							
	z		-0,19	-0,2	-0,17	-0,23							
		<b>rot 90</b>											
	x		0,51	0,59	0,83	0,86							
	y		-0,13	0	0,04	0,2							
	z		-0,08	-0,22	-0,72	-0,88							

2 (3)

Mittaukset 2015-12-04

Piste 1 = 635,0						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,11	-0,05	-0,01	0,07	0,03
y		-0,22	-0,11	-0,01	0,35	0,4
z		0,17	0,06	0	-0,18	-0,12
0,0 rot -90						
x		-0,31	-0,23	-0,23	-0,23	-0,41
y		-0,54	-0,46	-0,6	-0,48	-0,46
z		0,45	0,39	0,33	0,16	0,21
0,0 rot 90						
x		-0,27	-0,25	-0,22	-0,25	-0,25
y		0,85	0,77	0,72	0,63	0,63
z		0,39	0,25	0,08	-0,05	-0,09

Piste 3 = 720,-270						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,33	-0,22	-0,06	0,01	-0,02
y		0,06	-0,1	0,02	0,18	0,29
z		0,39	0,33	0,06	-0,02	-0,09
rot -90						
x		-0,41	-0,33	-0,32	-0,4	-0,36
y		-0,06	-0,05	-0,1	-0,1	-0,09
z		0,51	0,5	0,44	0,35	0,31
rot 90						
x		0,02	-0,01	-0,13	-0,11	-0,1
y		0,86	0,85	0,87	0,87	0,91
z		0,33	0,24	0,12	-0,04	-0,12

Piste 2 = 550,-270						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		0,35	0,23	-0,01	0,07	0,11
y		-0,12	-0,14	-0,08	0,17	0,27
z		0,3	0,25	0,01	-0,07	-0,16
rot -90						
x		-0,17	-0,18	-0,25	-0,34	-0,44
y		-0,04	-0,07	-0,03	-0,04	-0,02
z		0,4	0,4	0,27	0,18	0,23
rot 90						
x		0,26	0,23	0,25	0,12	0,17
y		1,03	0,99	0,97	1	1,03
z		0,32	0,16	0	-0,06	-0,12

Piste 5 = 550,270						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,04	-0,01	0,04	-0,1	-0,08
y		-0,08	-0,07	0,09	0,23	0,28
z		0,18	0,15	-0,02	0	-0,1
rot -90						
x		0,05	0,14	0,2	0,17	0,11
y		-0,99	-0,95	-0,85	-0,82	-0,81
z		0,41	0,32	0,21	0,09	0,03
rot 90						
x		-0,23	-0,18	-0,21	-0,15	-0,17
y		0,33	0,32	0,14	0,09	0,09
z		0,38	0,21	0,06	-0,02	-0,08

Piste 4 = 720,270						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,03	0,04	0,03	-0,01	-0,12
y		-0,1	-0,04	-0,02	0,3	0,28
z		0,25	0,14	0,02	-0,04	-0,09
rot -90						
x		-0,12	0,01	0,07	-0,03	-0,03
y		-0,67	-0,63	-0,54	-0,48	-0,46
z		0,54	0,46	0,3	0,24	0,1
rot 90						
x		-0,42	-0,41	-0,35	-0,47	-0,48
y		0,51	0,36	0,24	0,26	0,21
z		0,45	0,28	0,04	-0,07	-0,07

Robotin 1 kameramittaukset

Tulokset muokattu Laserlabin koordinaatiston mukaiseksi

Piste 2 (635, 0, 220)						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		0,11	-0,01	0,00	-0,03	-0,03
y		0,03	0,00	0,00	-0,01	0,06
rot -90						
x		0,26	0,14	0,15	0,13	0,13
y		-0,67	-0,69	-0,69	-0,71	-0,64
rot 90						
x		-0,24	-0,28	-0,29	-0,15	0,06
y		1,50	1,46	1,42	1,40	1,32

Piste 4 = (720, 270, 220)						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		0,06	0,06	0,00	-0,01	0,04
y		-0,03	-0,01	0,00	-0,06	-0,03
rot -90						
x		0,08	0,01	-0,06	-0,18	-0,17
y		-0,93	-0,90	-0,82	-0,74	-0,72
rot 90						
x		0,10	0,03	0,06	0,36	0,60
y		0,28	0,33	0,17	0,18	0,17

Piste 2 (550, -270, 220)						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		0,14	0,00	0,00	-0,11	-0,13
y		0,14	0,00	0,00	-0,11	-0,13
rot -90						
x		0,14	0,03	0,03	0,01	0,10
y		-0,29	-0,26	-0,24	0,15	-0,26
rot 90						
x		-0,67	-0,74	-0,58	-0,49	-0,33
y		0,97	0,94	0,92	0,92	0,94

Piste 5 (550, 270, 220)						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		0,03	-0,03	0,00	-0,03	0,00
y		-0,01	-0,01	0,00	-0,03	-0,15
rot -90						
x		-0,17	-0,22	-0,29	-0,46	-0,51
y		-1,21	-1,17	-1,13	-1,07	-1,07
rot 90						
x		-0,13	-0,10	-0,14	0,00	0,15
y		0,22	0,17	0,07	0,11	0,07

Piste 3 (720, -270, 220)						
	rot 0	-45	-30	0	30	45
x		0,14	0,03	0,00	-0,06	-0,10
y		-0,11	-0,10	0,00	-0,11	-0,07
rot -90						
x		0,42	0,29	0,11	0,07	0,14
y		-0,32	-0,39	-0,36	-0,35	-0,36
rot 90						
x		-0,35	-0,43	-0,32	-0,19	-0,03
y		0,71	0,69	0,69	0,72	0,75

3 (3)

Robotti Xtronic+Wiest

Mittaus 4

Piste 1 = 635,0		0,0 rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,13	-0,01	0	0,11	0,02	
y		-0,21	-0,2	-0,02	0,5	0,76	
z		0,45	0,25	0	-0,19	0	
0,0 rot -90							
x		0,33	0,35	0,19	-0,02	-0,24	
y		-0,52	-0,46	-0,47	-0,46	-0,49	
z		0,55	0,41	0,24	0,19	0,23	
0,0 rot 90							
x		-0,24	-0,24	-0,08	0,1	0,16	
y		1,24	1,15	1,1	1	1,02	
z		0,55	0,4	0	-0,17	-0,17	

Piste 2 = 550,-270		rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,27	-0,12	-0,03	0,12	0,12	
y		0,2	-0,21	-0,04	0,34	0,58	
z		0,5	0,28	0,01	-0,18	-0,15	
rot -90							
x		0,44	0,42	0,3	0,01	-0,19	
y		-0,05	-0,09	-0,09	-0,08	-0,08	
z		0,46	0,31	0,2	0,12	0,14	
rot 90							
x		0,27	0,29	0,44	0,51	0,58	
y		1,43	1,39	1,37	1,38	1,37	
z		0,48	0,27	-0,05	-0,19	-0,22	

Piste 3 = 720,-270		rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,23	-0,14	-0,01	0,1	0,09	
y		-0,09	-0,23	-0,01	0,36	0,52	
z		0,47	0,29	-0,02	-0,19	-0,18	
rot -90							
x		0,22	0,28	0,18	-0,05	-0,16	
y		-0,1	-0,08	-0,21	-0,17	-0,11	
z		0,37	0,29	0,21	0,18	0,12	
rot 90							
x		0,11	0,08	0,14	0,24	0,31	
y		1,18	1,1	1,14	1,15	1,17	
z		0,42	0,15	-0,1	-0,3	-0,33	

Piste 4 = 720,270		rot 0	-45	-30	0	30	45
x		-0,09	-0,07	0,05	-0,06	-0,11	
y		-0,09	-0,08	0	0,34	0,57	
z		0,5	0,36	-0,05	-0,1	-0,12	
rot -90							
x		0,42	0,51	0,5	0,24	0,11	
y		-0,69	-0,68	-0,6	-0,52	-0,51	
z		0,65	0,53	0,26	0,11	0,19	
rot 90							
x		-0,45	-0,41	-0,28	-0,17	-0,17	
y		0,83	0,78	0,63	0,55	0,56	
z		0,58	0,41	0,05	-0,31	-0,31	

Piste 5 = 550,270		rot 0	-45	-30	0	30	45
x		0	0,01	0,04	-0,07	-0,12	
y		-0,29	-0,21	0,03	0,35	0,41	
z		0,47	0,28	-0,03	-0,14	-0,1	
rot -90							
x		0,67	0,76	0,67	0,42	0,29	
y		-1	-0,95	-0,92	-0,84	-0,82	
z		0,6	0,44	0,2	0,07	0,03	
rot 90							
x		-0,29	-0,29	-0,08	0,12	0,15	
y		0,68	0,64	0,53	0,46	0,4	
z		0,54	0,38	0,03	-0,23	-0,29	

## Liite 2. Robotin 2 mittauspöytäkirja

Robotti 2 mittaus						
<b>Piste 1 = 635,0</b>		<b>rot 0</b>	-45	-30	30	45
	x	0,26	0,11	-0,01	-0,02	
	y	0,19	0,15	-0,21	-0,26	
	z	0,15	0,09	0,03	0,08	
	<b>rot -90</b>					
	x	0,95	1,11	1,39	1,44	
	y	0,46	0,45	0,33	0,33	
	z	0,13	0,04	0,06	0,14	
	<b>rot 90</b>					
	x	0,11	0,16	0,57	0,7	
	y	-1,12	-1,19	-1,34	-1,35	
	z	0,58	0,04	0,17	0,14	
<b>Piste 2 = 550,-270</b>		<b>rot 0</b>				
	x	0,22	0,06	0,04	0,05	
	y	-0,04	0,05	-0,37	-0,41	
	z	0,17	0,13	0,09	0,12	
	<b>rot -90</b>					
	x	1,09	1,13	1,45	1,52	
	y	0,44	0,43	0,4	0,32	
	z	0	-0,07	0,01	0,12	
	<b>rot 90</b>					
	x	0,32	0,35	0,78	0,99	
	y	-1,14	-1,25	-1,4	-1,39	
	z	0,47	0,28	0	0,01	
<b>Piste 3 = 720,-270</b>		<b>rot 0</b>	-45	-30	30	45
	x	-0,12	-0,14	0,14	0,2	
	y	-0,04	0	0,03	0,13	
	z	0,14	0,05	0,08	0,09	
	<b>rot -90</b>					
	x	-0,7	-0,71	-0,82	-0,82	
	y	0,63	0,65	0,97	1,04	
	z	-0,14	-0,16	-0,14	-0,11	
	<b>rot 90</b>					
	x	0,84	0,83	0,73	0,63	
	y	0,73	0,76	1,25	1,4	
	z	0,38	0,22	-0,13	-0,15	
<b>Piste 4 = 720,270</b>		<b>rot 0</b>				
	x	-0,08	-0,07	0,06	0	
	y	0,25	0,14	-0,07	-0,14	
	z	0,17	0,1	0,06	0,17	
	<b>rot -90</b>					
	x	-0,25	-0,2	0,02	0,06	
	y	0,99	1,03	1,13	1,36	
	z	0,11	-0,04	-0,11	-0,09	
	<b>rot 90</b>					
	x	0,96	1	1,25	1,29	
	y	-0,16	-0,09	0,25	0,32	
	z	0,47	0,32	0,15	0,17	
<b>Piste 5 = 550,270</b>		<b>rot 0</b>				
	x	0,11	0,07	-0,03	0,07	
	y	0,28	0,2	-0,21	-0,19	
	z	0,24	0,16	0,11	0,11	
	<b>rot -90</b>					
	x	0,62	0,68	1,06	1,13	
	y	0,63	0,66	0,65	0,64	
	z	0,21	0,17	0,08	0,19	
	<b>rot 90</b>					
	x	0,3	0,36	0,85	0,89	
	y	-0,92	-0,92	-1,01	-0,92	
	z	1,12	0,41	0,28	0,31	

