

Matti Savolainen

# Laserseurainjärjestelmän kalibrointimenetelmät ja tarkkuuden tarkastelu kenttäolosuhteissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinööriytyö

10.11.2014

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Matti Savolainen Laserseurainjärjestelmän kenttäkalibrointi ja tarkkuuden tarkastelu kenttäolosuhteissa 59 sivua + 4 liitettä 10.11.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaaja	yliopettaja Vesa Rope
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Inspecta Tarkastus Oy:lle. Työn tarkoituksena oli tutustua Leica Ag:n valmistaman laserseurainjärjestelmän testaus- ja määrittysmenetelmiin. Lisäksi työssä tutkittiin erilaisten vertailureferenssien soveltuvuutta tarkkuuden määrittelyyn kenttäolosuhteissa.</p> <p>Työssä perehdytään laserseurainjärjestelmän eri komponentteihin, niiden toimintaperiaatteisiin sekä järjestelmässä ilmeneviin virhelähteisiin erilaisten käsikirjojen ja laitteisto-ohjeiden avulla. Järjestelmässä ilmeneviä mekaanisia virheitä voidaan korjata virhemallien avulla. Virhemallien testaus- ja määrittysmenetelmiä tutkittiin laitevalmistajan määrittelemien testimittausten avulla. Lisäksi työssä tutkittiin vertailureferenssien soveltuvuutta tarkkuuden määrittelyyn kenttäolosuhteissa. Vertailureferenssejä mitattiin ja vertailtiin kahdella eri mittausmetodilla. Tutkitut referenssit soveltuvat tarkkuuden määrittelyyn kenttäolosuhteissa.</p> <p>Insinöörityö toimii eräänlaisena ohjekirjana ja sisällysluettelona Inspecta Tarkastus Oy:n käytössä olevalle laserseuraimelle. Työtä voi soveltaa myös muihin laserseurainjärjestelmiin.</p>	
Avainsanat	laserseurain, käsilaserskanneri, mittakärki, koordinaattimittakone, kenttäkalibrointi

Author Title Number of Pages Date	Matti Savolainen Laser tracker system field calibration and accuracy consideration in field circumstances 59 pages + 4 appendices 10 November 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructor	Vesa Rope, Principal Lecturer
<p>The goal of this Bachelor's thesis was to explore the testing and analysis methods of a laser tracker system. In addition, the applicability and accuracy of various references was compared under field conditions.</p> <p>With the help of system manuals and hardware guides, the thesis studied the different components in the laser tracker system, and their operating principles, as well as considered of the various sources of error. Mechanical errors in a system can be corrected with error models and these were examined in the device with testing and analysis methods specified by the manufacturer. In addition, the suitability of comparison references for the definition of accuracy in field conditions was examined. Two separate measurement methods were used to measure and compare the different references. As a result of the examination, it can be stated that the references are suitable for the definition of accuracy under field conditions.</p> <p>This thesis functions as a table of contents for the audit manual of the laser tracker used by Inspecta Tarkastus Ltd. The work may also apply to other laser tracker systems.</p>	
Keywords	laser tracker, handheld laser scanner, probing device, coordinate measure machine, field calibration

## Sisälllys

1	Johdanto	1
2	Inspecta Oy	2
3	Tekniikka	2
3.1	Sensoryyksikkö	3
3.1.1	Kulma-anturit	4
3.1.2	Kotipesä	4
3.1.3	Fotosensori	4
3.1.4	Etäisyyden mittaus	5
3.1.5	Kaulustähys	5
3.1.6	Sensorin ohjainyksikkö	5
3.1.7	Sääasema	6
3.1.8	Tasain	6
3.1.9	Hakukamera	7
3.2	Tähykset	7
3.2.1	Kuutionurkka (CCR, Corner Cube Reflector)	8
3.2.2	TBR-tähys (TBR, Tooling Ball Reflector)	8
3.2.3	RFI-tähys (Reflectors for Fixed Installations)	9
3.2.4	CER-tähys (Cateye Reflector )	9
3.3	Leican T-sarjan tuotteet	9
3.3.1	Paikoituskamera (T-Cam)	9
3.3.2	Käsilaserskannerin ohjausyksikkö	10
3.3.3	Käsilaserskanneri (T-Scan)	11
3.3.4	Koskettava mittasensori (T-Probe)	11
3.4	Ohjelmat	12
3.4.1	emScon BUI	12
3.4.2	T-Scan Collect	13
3.4.3	Leica Axyz -ohjelma	14
3.4.4	Polyworks-ohjelma	14
4	Virhelähteet	16
4.1	Sensoryyksikön virheet	16
4.1.1	Vaaka-akselin kallistusvirhe, i	17
4.1.2	Peilin kallistusvirhe, c	17
4.1.3	Lasersäteen kallistusvirheet, $I_x$ ja $I_y$	17
4.1.4	Vaaka-akselin poikkeamavirhe, e	18

4.1.5	Peilin poikkeamavirhe, $f$	19
4.1.6	Lasersäteen poikkeama virheet, $O_x$ , $O_y$ , $O_{2x}$ ja $O_{2y}$	19
4.1.7	Pystykulman indeksivirhe, $j$	20
4.1.8	Vaaka- ja pystytason asentoanturin epäkeskisyys, $E_x$ ja $E_y$ , $K_x$ ja $K_y$	20
4.1.9	Interferometrisen etäisyydenmittauksen virhe	21
4.1.10	Absoluuttisen etäisyydenmittauksen virhe	21
4.2	Tähtysten virheet ja tähysvakion määrittäminen	22
4.3	Paikoituskameran virheet	22
4.3.1	Suuntausvirhe, $C_b$	22
4.3.2	Vaaka-akselin kallistusvirhe, $C_i$	23
4.3.3	Kollimaatiovirhe, $C_c$	23
4.3.4	Kallistuskulmavirhe, $C_r$	24
4.3.5	Indeksivirhe, $C_j$	24
4.3.6	Vaaka-akselin poikkeama, $CD$	25
4.3.7	Vaaka-akselin korkeuspoikkeama, $CH$	26
4.3.8	Projektiokeskuksen sijaintipoikkeama, $C_x$ , $C_y$ , $C_z$	26
4.4	Laserskannerin virheet	27
4.5	Mittasensorin virheet	27
5	Kenttätestit	27
5.1	Mittausolosuhteet	28
5.2	3D-kenttätestit	29
5.2.1	IFM-etäisyydenmittaus	29
5.2.2	3D-etäisyydenmittauksen testaus	30
5.2.3	Two face -testi	30
5.2.4	Ball bar -testi	31
5.2.5	ADM-etäisyydenmittaus	32
5.2.6	ADM-tähyspoikkeama	33
5.3	6DOF-kenttätestit	33
5.3.1	6DOF-etäisyydenmittauksen testaus	33
5.3.2	Mittakärjen tarkastus	34
5.3.3	Paikoitusledien tarkastus	35
5.3.4	Paikoituskameran geometrian testaus	35
5.3.5	Ohjatut tarkastukset	36
5.3.6	Käsilaserskannerin tarkastus	38
6	Kompensaatiot	38
6.1	3D-kompensaatiot	39
6.1.1	Ball bar -määrittäminen	39

6.1.2	Two face -määrittäminen	40
6.1.3	Kotipesän määrittäminen	41
6.1.4	ADM-etäisyydenmittauksen määrittäminen	42
6.1.5	ADM-tähysoikeus	42
6.1.6	Hakukameran poikkeaman määrittäminen	42
6.1.7	Osavirhemallinnus	43
6.2	6DOF-kompensatiot	43
6.3	T-sarjan tuotteiden kompensatiot	44
6.3.1	Mittakärjen määrittäminen	45
6.3.2	Käsilaserskannerin määrittäminen	45
7	Kenttäkalibrointi	48
7.1	Mittalatta	49
7.1.1	Laserskannaus	49
7.1.2	Mittakärki	50
7.2	Kalibrointipallo	50
7.2.1	Koskettava mittasensori	51
7.2.2	Käsilaserskanneri	52
7.3	Kalibrointipala	53
7.3.1	Laserskannaus	53
7.3.2	Koskettava mittasensori	55
8	Yhteenveto	56
9	Jälkisanat	57
	Lähteet	58
	Liitteet	
	Liite 1. 3D-määrittäksen tulokset	
	Liite 2. Kalibrointipalan kalibrointitodistus	
	Liite 3. Kalibrointipalan vertailu käsilaserskannerilla	
	Liite 4. Kalibrointipalan vertailu koskettavalla mittasensorilla	

## Lyhenteet

CMM	Coordinate measuring machine	Koordinaattimittauskone
ADM	Absolute distance meter	Absoluuttinen etäisyysmittari
IFM	Interferometer	Interferometri
PSD	Photo sensor detector	Valoisuuden tunnistin
6DOF	6 Degree of freedom	6-akselinen avaruus
SMR	Spherically Mounted Retro reflector	Pallotähys
TOF	Time of flight	Kulkuaika
CCR	Corner Cube Reflector	Kuutionurkka
TBR	Tooling Ball Reflector	Työkalutähys
PPM	Parts per Million	Miljoonasosa
LTC	Laser Tracker Controller	Laserseuraimen ohjain
TP	Tracker Processor	Seurain prosessori
AP	Application Processor	Ohjelmisto prosessori
emScon	Embedded System control	Ohjainohjelmisto
BUI	Build User Interface	Sisäänrakennettu käyttöliittymä
NURBS-model		Matemaattinen pintamalli

## 1 Johdanto

Tämä insinööri työ on tehty Inspecta Tarkastus Oy:lle. Inspecta Tarkastus Oy:n toimialoja ovat erinäiset vakaus-, valvonta- ja kalibrointitehtävät.

Työn tavoitteena oli tarkastella erilaisia testaus- ja määrittysmenetelmiä Inspecta Tarkastus Oy:n omistamalle laserseurainjärjestelmälle. Työssä pyrittiin lisäksi saamaan selville nopea menetelmä mittaustarkkuuden määrittämiselle kenttäolosuhteissa.

Työ koostuu kahdesta osiosta. Ensimmäisessä osiossa esitellään laserseurainjärjestelmä ja käydään lävitse erilaiset testaus- ja määrittysmenetelmät kirjallisuuslähteiden avulla. Toinen osio käsittelee erilaisia tarkkuuden määrittelytapoja kenttäolosuhteissa.

Laitteelle määritetään valmistajan toimesta mittaustarkkuus ja korjausparametrit. Käytäntö on osoittanut laitteen mittaustarkkuuden olevan parempi kuin valmistajan ilmoittama tarkkuus. Toisaalta, jos laitteen korjausarvot eivät ole oikein, laitteella ei päästä edes valmistajan määrittämiin tarkkuuksiin. Laitteiston säännöllisillä kalibroinneilla saadaan seurattua sen tarkkuutta ja stabiilisuutta. Kenttätesteillä ja -kalibroinneilla voidaan laitteiston tarkkuus määrittää vallitsevissa mittausolosuhteissa.

Konepajamittauksissa puhutaan mittausepävarmuudesta. Kuten on tunnettua, kaikki mittaukset sisältävät epävarmuutta. Mittausepävarmuus syntyy mittauskojeen, mittaajan, vallitsevan olosuhteen sekä satunnaisten virheiden seurauksena. Kun osataan hallinnoida edellä mainittuja virheitä, saadaan mittausepävarmuus pieneksi ja tätä kautta hyväksyttäväksi.

Insinööri työssä keskitytään hallitsemaan mittauskojeesta sekä osittain olosuhteista syntyviä virheitä.



## 2 Inspecta Oy

Inspecta Oy on Pohjois-Euroopan johtava tarkastus-, testaus-, sertifiointi-, konsultointi- ja koulutusalan palveluyritys. Toimintaa on seitsemässä maassa: Suomessa, Ruotsissa, Norjassa, Tanskassa, Latviassa, Virossa ja Liettuassa. Henkilöstöä on noin 1400 ja liikevaihtoa 174 M€ (2012).

Inspecta perustettiin 1975, jolloin Suomen valtio perusti Teknillisen tarkastuslaitoksen. Vuonna 1977 Ruotsiin perustettiin vastaavanlainen tarkastuslaitos; Statens Anläggningsprovning. Molemmat valtiot yksityistivät yhtiöt 1990-luvun lopulla ja Teknillisen tarkastuslaitoksesta tuli Inspecta Oy. Yritysostojen myötä Statens Anläggningsprovning liitettiin Inspecta Oy:n vuonna 2006.

Nykyään Inspecta Oy jakautuu maayhtiöihin, joilla on tytäryhtiöitä, kuten Inspecta Tarkastus Oy. [1]

## 3 Tekniikka

Laserseuraimen sensoryksikkö rakentuu laserinterferometristä, absoluuttietäisyysmittarista, kahdesta kulma-anturista sekä heijastinpeilistä. Mallista riippuen seuraimessa saattaa olla pelkkä laserinterferometri, absoluuttietäisyysmittari tai näiden yhdistelmä. Toimintaperiaatteeltaan se vastaa maanmittauksessa yleisesti käytettävää takymetriä. Mitattavalle pisteelle mitataan etäisyys- ja kulmahavainnot joiden avulla pisteelle lasketaan sen kolmiulotteiset koordinaatit trigonometrisesti. Menetelmää kutsutaan polaariseksi mittaukseksi. Toisin kuin takymetrissa, laserseuraimessa koordinaattien laskenta, mittaus ja ohjaus tapahtuvat aina erillisellä tietokoneella.

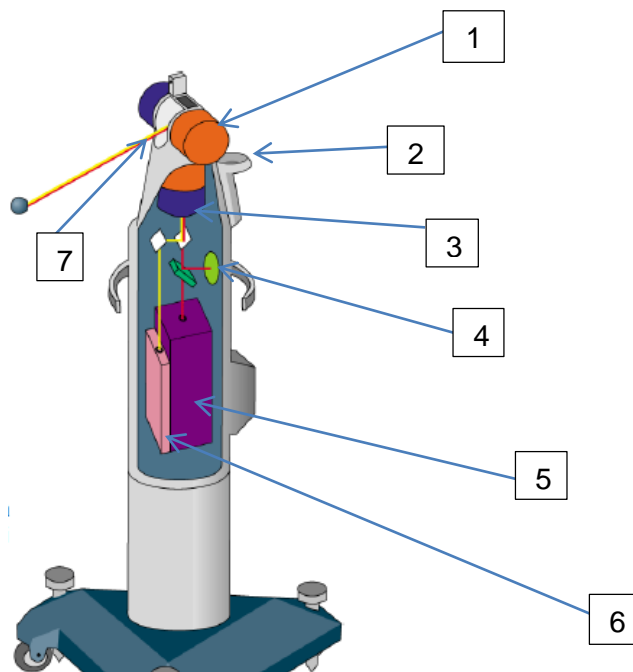
Laserseuraimia kutsutaan liikuteltaviksi koordinaattimittauskojeiksi (Portable CMM), koska niiden mittausalue vaihtelee mallista riippuen kahdestakymmenestä metrillä 160 metriin. Laserseuraimia käytetään auto-, ilmailu- ja konepajateollisuudessa. Tyypillisesti laserseuraimella päästään millimetrin kymmenesosasta millimetrin sadasosan tarkkuuteen. Ensimmäiset laserseuraimet tulivat markkinoille 1990-luvun alusta Leica Geosystems Ag:n valmistamina, ja tähän mennessä Leica on toimittanut niitä yli yksitoistatuhatta kappaletta. Muita laserseurainvalmistajia ovat Faro, API ja PI miCos. [3; 4; 5; 6.]

Inspecta Oy:n laserseurain LTD800 on Leica Geosystems Ag:n valmistama. Se koostuu sensoriosasta, ohjainyksiköstä (LT Controller) ja tietokoneesta (AP). Lisäksi siihen on liitettyä Nivel-tasainyksikkö ja hakukamera. Käytettäessä laitetta käsilaserskannerin tai koskettavan mittasensorin paikoitukseen, laitteeseen liitetään paikoituskamera (T-Cam) ja käsilaserskannerin ohjainyksikkö (scanner control). Sensorilla pystytään mittaamaan kolmetuhatta havaintoa sekunnissa. Havainnoista lasketaan keskiarvo. Keskiarvostetuista havainnoista voidaan tallentaa maksimissaan tuhat pistettä sekunnissa. [2; 7]

### 3.1 Sensoriyksikkö

Sensoriyksikkö havaitsee raakakulmat ja korjaamattoman etäisyyden. Havainnot siirtyvät ohjainyksikölle joka laskee havaintoihin korjaukset.

Sensoriyksikköön (Kuva 1) kuuluvat interferometri (5), absoluuttietäisyysmittari (6), seurainpää kulma-antureilla (1) ja tasavirtamoottoreilla (3), biakiaalinen fotosensori (PSD) (4), kotipesä (bird bath) (2) ja kaulustähys (collar reflector) (7). [7; 8; 9; 10.]



Kuva 1. Laserseuraimen sensoriyksikön komponentit [2]

### 3.1.1 Kulma-anturit

Sensoryyksikön seurainpäässä on kaksi kulma-anturia (Kuva 1) joiden resoluutioksi valmistaja ilmoittaa 0,14 kaarisekuntia. Liikkumattoman tähyksen mittaustarkkuudeksi luvataan valmistajan toimesta  $\pm 10 \mu\text{m}/\text{m}$ . Kulma-antureihin yhteydessä samalla akselilla on tasavirtamoottorit (Kuva 1), joiden tehtävänä on kääntää seurainpäätä.

### 3.1.2 Kotipesä

Kotipesä (Kuva 1 ja Kuva 2) (bird bath tai home point) on sensoryyksikön rungossa oleva magneettipidin, johon tähys asetetaan mittauksen alussa. Kotipesän sijainti sensoryyksikössä on tunnettu, joten sen avulla seurain pystyy määrittämään absoluuttisen etäisyydenmittauksen  $\pm 10$  mikrometrin tarkkuudella. Jokaiselle tähyksellä on oma tähysvakio, joten kotipesän sijainti tulee määrittää jokaiselle tähykselle erikseen.



Kuva 2. Kotipesä ja Nivel-tasain

### 3.1.3 Fotosensori

Fotosensorilla (Kuva 1) (PSD) on kaksi tehtävää. Se havainnoi tähyksestä takaisin heijastuvan säteen voimakkuutta, jonka avulla voidaan mitata tähyksen ja peilien puhtautta. Toinen fotosensorin tehtävä on korjata seurainpään asentoa tähyksen

liikkuessa. Fotosensori vertaa lähtevän ja takaisinheijastuvan säteen eroa sensorin pinnalla ja korjaa seurainpään kulmia siten, että säteiden sijainti ei poikkea (säde osuu tähyksen keskelle).

#### 3.1.4 Etäisyyden mittaus

Sensoryyksikössä on sisäänrakennettu laserinterferometri (Kuva 1) (IFM). Laserinterferometri on tarkka ja nopea etäisyyden mittauksessa. Interferometrin heikkous on sen kyky mitata vain suhteellista etäisyyttä. Mitattaessa absoluuttista etäisyyttä, interferometri tarvitsee aina referenssipituuden. Tätä varten sensoryyksikössä on kotipesä, jonka sijainti tunnetaan. Mittauksen alussa tähyys asetetaan kotipesään, jonka tunnetusta sijainnista interferometri alkaa mitata etäisyyden muutosta. Tähyksen ja sensorin välisen lasersäteen katketessa joudutaan tähyys asettamaan uudelleen kotipesään interferometrin uudelleen alustamista varten. Interferometrin lasersäde muodostaa sensorin kollimaatioakselin.

Sensoryyksikön absoluuttisella etäisyysmittarilla (Kuva 1) (ADM) paikataan laserinterferometrin edellisessä kappaleessa mainittua heikkoutta. Sen avulla voidaan mitata absoluuttinen etäisyys sensoryyksikön ja tähyksen välillä. Tällä etäisyydellä pystytään alustamaan interferometri ilman tähyksen asettamista kotipesään. Absoluuttisen etäisyysmittarin heikkous on sen hitaus etäisyyden mittauksessa. Esimerkiksi mitatessa tärisevää tähyistä pelkällä absoluuttisella etäisyyden mittauksella, aiheuttaa tähyksen liike etäisyyshavaintoon virhettä. Tämä ongelma pystytään taas hallinnoimaan interferometrin avulla.

#### 3.1.5 Kaulustähyys

Kaulustähyksen (7) (collar reflector) avulla tarkastetaan ja eliminoidaan seuraimen alustuksen yhteydessä lasersäteessä ilmenevät poikkeama virheet ( $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_{2x}$  ja  $O_{2y}$ ). Lisää lasersäteen poikkeamavirheestä on kerrottu luvussa 4.1.6.

#### 3.1.6 Sensorin ohjainyksikkö

Ohjainyksikön (LTC) (Kuva 3) tehtävänä on ohjata sensoryyksikköä sekä kerätä sensoryyksiköltä tulevaa tietoa. Ohjainyksikön ja sensoryyksikön välillä on kaksi kaapelia,

joista toisessa menee sensoriyksiköllä tarvittava ohjausjännite ja toisessa ohjaus- ja mittaustieto. Ohjainyksikkö sisältää erilaisia A/D- ja D/A-muuntimia tiedon muuntamiseen sekä seurainprossessorin (TP) että seurainpalvelimen (emScon). Seurainprossessorin tehtävänä on ohjata sensoria ja välittää tietoa seurainpalvelimelle tai Axyz-ohjelmalle.

Axyz-ohjelmisto on Leica Ag:n valmistama laskenta- ja analysointiohjelma, joka keskustelelee suoraan seurainprossessorin kanssa.



Kuva 3. Sensorin ohjainyksikkö [20]

### 3.1.7 Sääasema

Laserseurainjärjestelmään kuuluu olennaisena osana sääasema (Thommen HM30) jonka havaintojen avulla korjataan sensoriyksiköltä saatuja havaintoja. Sääasema mittaa yhdistelmäanturilla lämpötilaa, ilmanpainetta sekä ilman kosteutta. Lisäksi sääasemaan voidaan liittää materiaalilämpötilaa havaitseva anturi. Yhden celsius asteen muutos ilman lämpötilassa vastaa yhden miljoonasosan (ppm) ja neljän millibaarin paineen muutos ilmanpaineessa vastaa yhden miljoonasosan (ppm) muutosta. Kymmenen metrin mittausmatkalla yksi ppm tarkoittaa yhtä millimetrin sadasosaa.

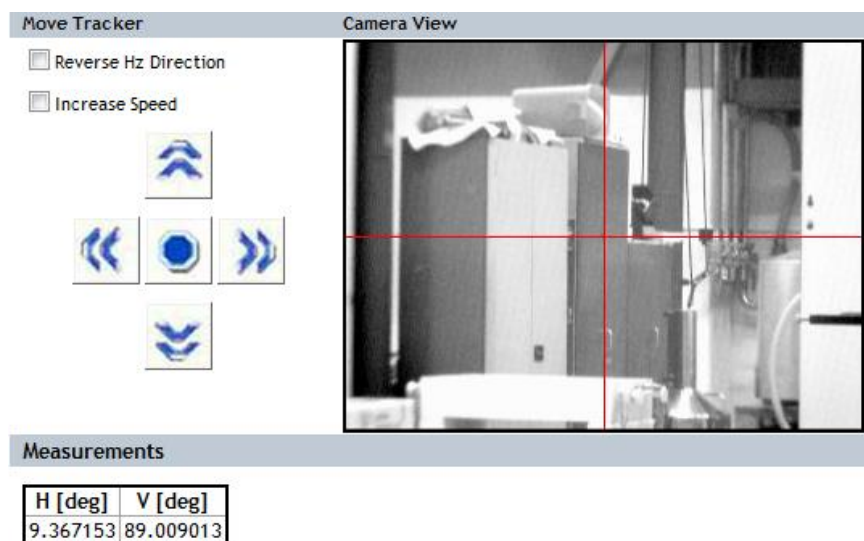
### 3.1.8 Tasain

Sensoriyksikköön voidaan liittää ulkoinen tasain (Nivel 230) (Kuva 2). Tasaimen avulla voidaan seurata sensoriyksikön stabiilisuutta sekä tasata sensoriyksikkö paikallisen

painovoimakentän mukaisesti. Lisäksi tasainta voidaan käyttää erillisen ohjelman avulla esimerkiksi pöydän tasomaisuuden määrittämiseen. Tasaimen tarkkuus on yksi kaarisekunti (0,005 mm/1000 mm). [16]

### 3.1.9 Hakukamera

Sensoryyksikön päälle voidaan asentaa koaksiaalinen hakukamera. Hakukameran avulla voidaan hoitaa seurainpään ohjaus. Lisäksi sillä voidaan mitata kohteita fotogrammetrisesti. Hakukamera lähettää jaksottaista infrapunasädettä, mikä helpottaa tähyksen havaitsemista kameran välittämästä kuvasta. (Kuva 4.)



Kuva 4. Hakukameran kuva sekä sensoripään ohjausvalikko

### 3.2 Tähykset

Laserseuraimen yhteydessä voidaan käyttää erilaisia tähyksiä. Yleisimmin käytetty tähyks on SMR eli pallon muotoinen tähyks. Näitä tähyksiä valmistetaan eri kokoluokissa, joista puoli tuumaa (0,5”) ja puolitoista tuumaa (1,5”) ovat yleisimmät. Pallotähykset voidaan varustaa kehyksellä, tai ne voivat olla iskunkestäviä. [17]

### 3.2.1 Kuutionurkka (CCR, Corner Cube Reflector)

Nimitys *kuutionurkka* tulee tähyksen rakenteesta. Tähyksen pallomainen kuori on harjattua terästä ja sen sisälle heijastinosaksi on sijoitettu kolme peilipintaa, joiden leikkauspiste on pallon keskipisteessä ja näin ne muodostavat kuution nurkan. Tähyks on ilmatäytteinen, joten absoluuttisessa etäisyydenmittauksessa ei tule refraktiosta johtuvaa etäisyyden korjausta. Kuutionurkan optisen keskipisteen sijainti on määritetty alle  $\pm 0,006$  millimetrin tarkkuudella. Kuoren muodon ja halkaisijan poikkeama on yleisesti muutama mikrometri. Kuutionurkka onkin tarkin laserseuraimen kanssa käytettävä tähyks.

Kuutionurkka voidaan varustaa kauluksella. Peilipintojen ympärille kierrettävällä kauluksella rajoitetaan mittauskulmaa ja varmistutaan säteen oikeasta keskistymisestä. Kauluksella lisättyä tähyistä kutsutaan nimellä RRR (Red Ring Reflector) (Kuva 5).

Kuutionurkasta on myös olemassa iskunkestävä versio (BRR, Break Resistant Reflector). Näiden optisen keskipisteen sijainti on hivenen heikempi kuin CCR/RRR-tähyksessä,  $\pm 0,010$  millimetriä.



Kuva 5. RRR-tähyks [20]

### 3.2.2 TBR-tähyks (TBR, Tooling Ball Reflector)

TBR-tähyks (Kuva 6) vastaa ulkomuodoltaan kuutionurkkaa. Sitä valmistetaan vain puolen tuuman (0,5") kokoluokassa. Heijastinosa on rakennettu lasiprismasta. Mitatessa absoluuttisia etäisyyksiä, väliaineen refraktiosta johtuva etäisyydenmittauksen virhe tulee korjata. Optisen keskipisteen sijainti on määritetty  $\pm 0,01$  millimetrin tarkkuudella. TBR-tähyks on tarkoitettu lähellä tapahtuviin työtehtäviin kuten asennusrunkojen (jigien) mittaukseen. Tähykseen voidaan liittää kaulus tai sitä voidaan käyttää ilman sitä.



Kuva 6. Kauluksella varustettu TBR-tähys [20]

### 3.2.3 RFI-tähys (Reflectors for Fixed Installations)

RFI-tähys on puolen tuuman (0,5") alumiinikuorinen pallotähys ja sen heijastinosa on valmistettu lasiprismasta. RFI-tähyksiä käytetään asennus- ja muodonmuutosmittauksissa. Yleensä tähys kiinnitetään mitattavaan kappaleeseen liimaamalla, mikä tekee siitä kertakäyttöisen.

### 3.2.4 CER-tähys (Cateye Reflector )

CER-tähys muistuttaa nimensä mukaisesti kissansilmää. Tähyksen halkaisija on seitsemänkymmentäviisi millimetriä, ja sen heijastinosa on valmistettu kahdesta erikokoisesta lasisesta puolipallosta, joista toisen pinta on hopeoitu. CER-tähyksen rakenne mahdollistaa laajan mittauskulman, ja se onkin tarkoitettu dynaamisen mittaukseen kuten robotti- tai työstökonemittaukseen.

## 3.3 Leican T-sarjan tuotteet

Laserseurainjärjestelmään on mahdollista liittää Leican T-sarjan tuotteita. Leican T-sarjan tuotteita ovat T-Probe, T-Scan, T-Mac ja T-Cam Reference Frame. Tässä insinööriyössä keskitytään T-Probe- ja T-Scan-tuotteisiin ja niiden esittelyyn.

### 3.3.1 Paikoituskamera (T-Cam)

Paikoituskameran tehtävänä on mitata kiertokulmat Leican T-sarjan tuotteille (T-Scan, T-Probe ja T-Mac). Paikoituskamera liitetään sensoryksikön päälle, sensoripään yläpuolella olevaan liittimeen (Kuva 7). Näin ollen paikoituskameralla ja



laserinterferometrilla on samansuuntaiset akselilinjat. Leican T-sarjan tuotteissa on infrapunaledejä, joiden sijainti tiedetään. Paikoituskamera vertaa ledeistä saatua kuvaa kameran sisäiseen kuvaan ja näin ollen pystyy laskemaan T-sarjan tuotteelle kiertokulmat. Paikoituskameran optiikka on zoomaava. Tämä estää etäisyydestä johtuvaa kuvan skaalantumista ja siitä johtuvaa paikoitusvirheen syntymistä. Zoomaamalla, paikoituskuva on aina samankokoinen. [15] Paikoituskameran virheitä on käsitelty luvussa 4.3.



Kuva 7. Paikoituskamera (T-Cam) liitettynä sensoriyksikköön

### 3.3.2 Käsilaserskannerin ohjausyksikkö

Käsilaserskannerin ohjausyksikön (scanner controller) tehtävänä on varastoida käsiskannerilta tulevaa tietoa. Samalla se kommunikoi sensorin ohjainyksikön (laser tracker controller) kanssa saaden käsiskannerilta saaduille havainnoille sijaintitiedon. Käsiskannerin raakahavaintojen ja sensorin ohjainyksiköstä saadun käsiskannerin

sijaintitiedon avulla lasketaan laserkeilatuille pisteille sijainnit kolmiulotteisessa avaruudessa. [13; 14.]

### 3.3.3 Käsilaserskanneri (T-Scan)

Laserseuraimeen on liitettävissä käsilaserskanneri (T-Scan) (Kuva 8). Käsiskannerin toiminta perustuu kolmiointimenetelmään. Kolmiointimenetelmässä lähtevän ja takaisinheijastuvan lasersäteen välistä kulma mitataan. Tiedettäessä lähtevän ja heijastuvan säteen korkeusero skannerin sisällä voidaan pisteen sijainti ratkaista. Käsiskannerin paikoitus hoidetaan sensorin ja siihen liitettävän paikoituskameran (T-Cam) (3.3.1) avulla. Inspecta Tarkastus Oy:n käytössä olevalla T-Scan 1:llä pystytään maksimissaan mittaamaan 7 000 pistettä sekunnissa. [12; 13; 14.]



Kuva 8. Leica T-Scan-käsilaserskanneri sekä sen teline

### 3.3.4 Koskettava mittasensori (T-Probe)

Laserseuraimeen on liitettävissä langaton koskettava mittasensori (T-Probe) (Kuva 9). Sensori voidaan varustaa erimuotoisilla ja eripituisilla mittauskärjillä. Rakennettu mittauskärki määritetään (6.3.1) määritystyökalun (ks. Kuva 31) avulla. Jokainen kärki on sarjanumeroitu, mikä mahdollistaa mittauskärjen rakenteen tallentamisen

mittasensorin muistiin. Mittauskärkien vaihtojen välissä määrittystä ei tarvitse tehdä uudelleen ellei rakennetta muuteta. Mittasensorin paikoitus tapahtuu samalla tavalla kuin käsilaserskannerissa, paikoituskameran (T-Cam) avulla. Koskettavalla mittasensorilla pystytään mittaamaan maksimissa tuhat pistettä sekunnissa. [13; 14]



Kuva 9. Koskettava mittasensori (T-Probe) varustettuna kolmen millimetrin mittakärjellä

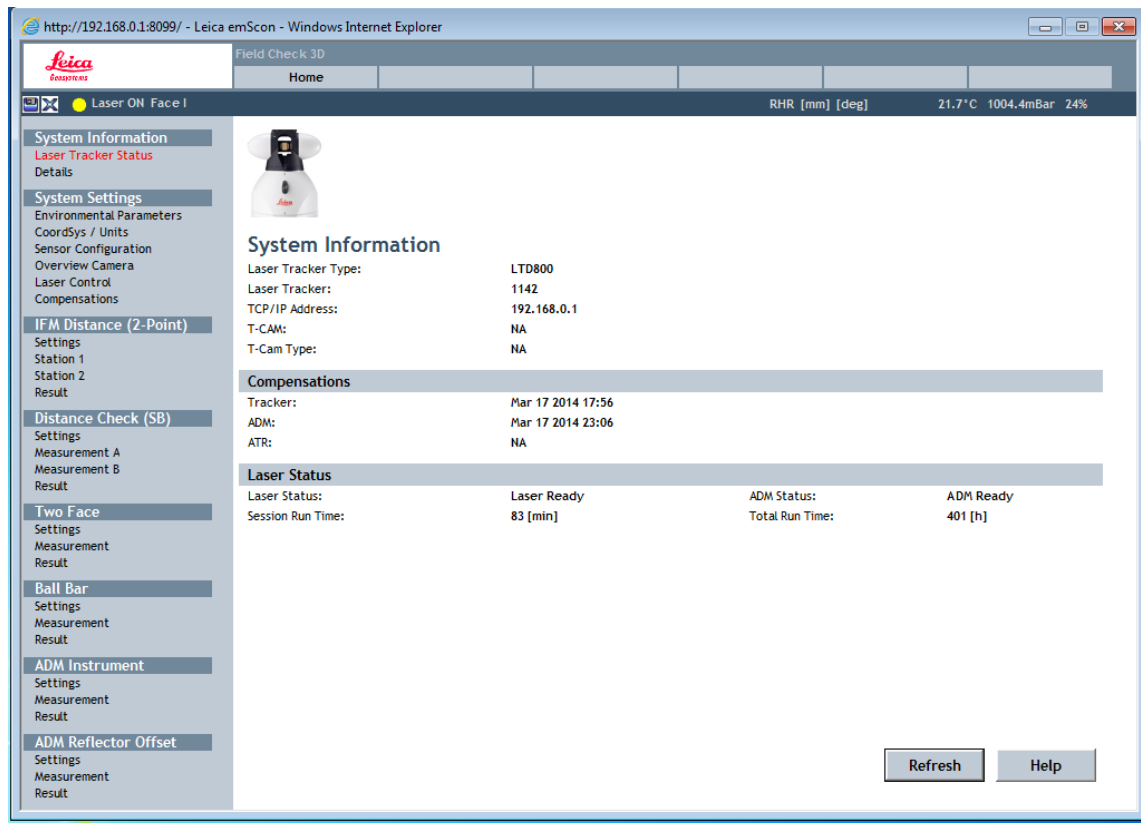
### 3.4 Ohjelmat

Laserseurainjärjestelmä koostuu sensorista sekä siihen liitettävistä lisäosista, ohjainyksiköstä ja järjestelmää ohjaavasta tietokoneesta. Toisin kuin takymetri, laserseurainjärjestelmä tarvitsee aina tietokoneen ohjaamiseen sekä koordinaattitiedon tallentamiseen. Inspecta Tarkastus Oy:llä on käytössä kolme eri ohjelmaa käyttötarkoituksesta riippuen laserseuraimen ohjaukseen sekä mittaustiedon käsittelyyn. Ohjelmavalmistajia ovat muun muassa Hexagon Metrology, New River Kinematics, Metrologic group, 3D Systems ja Innovmetric.

#### 3.4.1 emScon BUI

emScon on Leican valmistama ohjelma, joka toimii laserseuraimen ohjausyksikön sisällä. Sitä ohjataan Internetselaimen kautta. emScon sisältää sensorin ohjaus- testaus- ja kompensointitoiminnot. Lisäksi sillä voidaan mitata koordinaatteja sensoripään omassa koordinaatistossa. Havaitut koordinaatit tulostuvat mittausikkunaan ilman tallennusmahdollisuutta. emSconia voidaan käyttää monen eri ohjelman kautta.

Tällaisia ohjelmia voivat olla esimerkiksi Microsoft Excel ja Word tai Innovmetric:n Polyworks. Ohjelmointikielenä käytetään C++- tai C-kieltä. emScon-ohjelmat toimivat Leican vanhimmista LT300-sarjan laserseuraimista uusimpiin AT-901-sarjan laserseuraimiin. [9] Kuva 10 on esiteltyä emScon-ohjelman näkymä.



Kuva 10. emScon-ohjelman näkymä.

### 3.4.2 T-Scan Collect

T-Scan Collect on Leican valmistama ohjelma laserkeilaimen käyttöä varten. Ohjelmassa voidaan mitata pistepilveä T-Scan-käsiskannerilla ja pisteitä tähyspallolla ja T-Probe-mittasensorilla. Ohjelmasta on olemassa kaksi versiota: Collect ja Interface. Collect sisältää aineiston analyysiin tarkoitettut työkalut. Interface on tarkoitettu aliohjelmaksi muulle analysointiohjelmalle kuten Polyworksille. Laserkeilaimen kompensointi ja kalibrointi tapahtuvat T-Scan Collect -ohjelman kautta. [12]

### 3.4.3 Leica Axyz -ohjelma

Leican Axyz-ohjelmisto sisältää osittain samoja toimintoja kuin emScon. Sillä voidaan kenttättestata ja kompensoida laserseurainjärjestelmä. Toinen vaihtoehtoinen menetelmä on kompensoida järjestelmä emSconilla ja luoda korjausparametrit sisältävä tiedosto Axyz-ohjelmassa luettavaan muotoon.

Axyz-ohjelma kehitettiin 1990-luvun lopulla korvaamaan ManCat/TMS-ohjelma ja vastaamaan tarvetta, jossa mittajilla oli jokaiselle mittalaitteelle oma ohjelmisto. Ohjelma sisältää erilaisia moduuleita valinnaisesti takymetrille, teodoliitille ja laserseuraimelle. Sensorin ohjausyksikössä on oma liitäntä Axyz-ohjelmaa varten. Axyz-ohjelma kommunikoi sensorinyksikön kanssa oman ohjelmistorajapinnan kautta.

Ohjelma rakentuu Core-moduulin ympärille. Core-moduuliin tallentuu tieto, sieltä valitaan käytettävä mittalaite, määritellään parametrit sekä suoritetaan laskenta. Lisäksi Core-moduuliin kuuluu grafiikkaikkuna.

Axyz-ohjelmassa mittausaineisto on esitetty taulukkomuodossa. Jokaisen pisteen koordinaattien lisäksi taulukosta löytyy havaintoaika, vallitsevat sääolosuhteet sekä pistekohtaiset laatuparametrit. Välilehdiltä pääsee tutkimaan mittauksen raakahavaintoja. Axyz-ohjelmalla voidaan hoitaa useiden perusgeometrioiden muun muassa suoran, tason, ympyrän, pallon ja paraboloidin laskenta. Graafisessa ikkunassa voidaan vertailla havaintoja CAD-malliin. Ohjelma ei tue Leican T-sarjan tuotteita. Ohjelmasta on olemassa vain 16-bittinen versio, ja sen kehittäminen lopetettiin vuonna 2008. [2; 3; 10.]

### 3.4.4 Polyworks-ohjelma

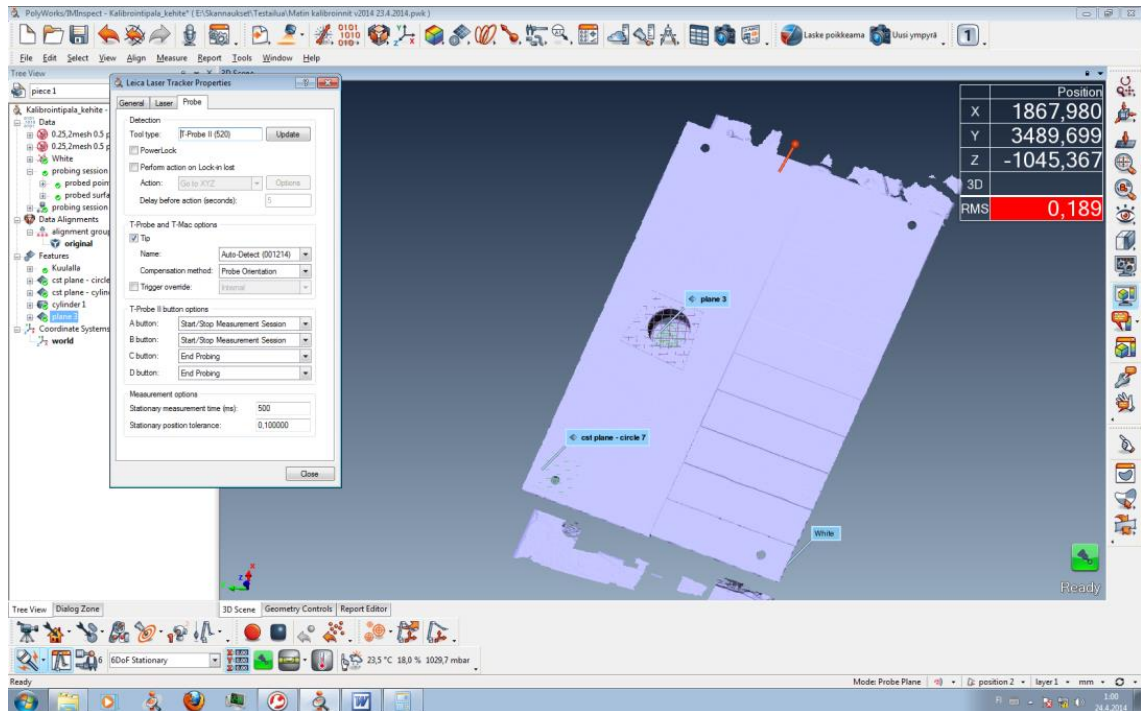
Polyworks on kanadalaisen InnovMetric Software Incin. valmistama mittausohjelmisto. Yritys on perustettu vuonna 1994, ja ohjelmiston ensimmäinen versio julkaistiin vuonna 1996. InnovMetricin valmistama Polyworks on tällä hetkellä käytetyin mittausohjelmisto ilmailu- ja autoteollisuudessa. Ohjelmisto tukee useiden valmistajien mittalaitteita. Polyworks jakautuu kolmeen eri versioon. Inspector-versio on tarkoitettu koordinaattien mittaamiseen ja niiden analysointiin. Toiminnalliselta ajatukseltaan se vastaa Axyz-ohjelmistoa. Modeller-versio on tarkoitettu käännettyä suunnittelua (reverse engineering) varten ja Survey-versio taas maalaserkeilainten aineiston käsittelyyn.

Inspector-versiossa voidaan käyttää pallotähystä, T-Probe-mittasensoria ja T-Scan-käsilaserskanneria. Modeller-versio on suunniteltu käytettäväksi yhdessä T-Scan-laserskannerin kanssa. Polyworks kommunikoi emScon-seurainpalvelimen kanssa Inspector-versiossa ja Modeller-versiossa T-Scan Collect Interfacen kanssa.

Inspector-versio on ensisijaisesti tarkoitettu mittaamiseen, jossa mitattavasta kappaleesta on olemassa CAD-malli. CAD-mallista poimitaan halutut geometriset muodot, poimituille muodoille määritetään sijainti- ja muototoleranssit ja mitataan. Mitatessa voidaan käyttää CCR-tähystä, T-Probe-mittasensoria tai T-Scan-laserskanneria.

Mittausaineisto esitetään ohjelmassa graafisesti ja puu-muodossa (Kuva 11). Mitattu aineisto muodostuu mittaussessioista. Session mitattu aineisto näkyy graafisesti pistepilvenä, muttei sillä ole varsinaista geometristä ominaisuustietoa. Valittaessa pisteet ja laskettaessa niistä geometrinen muoto ilmestyy se puurakenteeseen.

Modeller-versio sisältää IMAling-osion, jossa voidaan kerätä, rekisteröidä ja käsitellä pistepilveä. IMMerge-osiossa taas muodostetaan käsitellystä pistepilvestä 3D-kolmiopintamalleja. IMedit-osiossa kolmiopintamallia voidaan korjata, mallista voidaan muodostaa NURBS-pintoja, NURBS-malli tai luoda 2D-leikkauksia CAD-mallintamista varten. [18; 19]



Kuva 11. Polyworks-ohjelmiston Inspect-version näkymä.

## 4 Virhelähteet

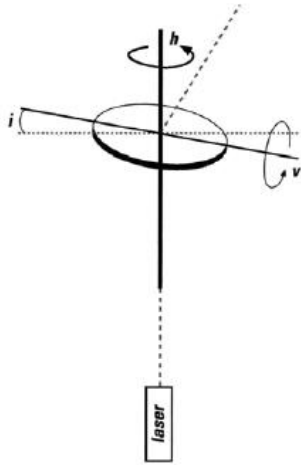
### 4.1 Sensoryyksikön virheet

Laserseurain on teknisesti monimutkainen laite, ja mekaniikasta johtuvia systemaattisia virhelähteitä on paljon. Mekaanisten virheiden poistaminen on hankalaa, joten niiden korjaaminen tapahtuu ohjelmallisesti. Sensoryyksikössä on kahdeksantoista tunnettua virheparametria. Virheparametrien määrä lisääntyy, kun sensoriin liitetään T-sarjan tuotteita.

Sensoryyksikön mekaanisista virheistä mallinnetaan virhemalli. Virhemallin toistotarkkuutta voidaan tarkastella kenttätesteillä. Sensorin mekaaniset virheet ovat esiteltyinä ja selostettuina seuraavissa kappaleissa. Paikoituskameran mekaaniset virheet esitellään ja selostetaan luvussa 4.3. [9]

#### 4.1.1 Vaaka-akselin kallistusvirhe, $i$

Vaaka-akselin tulisi olla kohtisuorassa pystyakseliin nähden.  $i$ -arvo on kulmapoikkeama kohtisuorasta ja kuvaa akselin kallistusvirhettä. (Kuva 12.)



Kuva 12. Vaaka-akselin kallistusvirhe  $i$  [9]

#### 4.1.2 Peilitason kallistusvirhe, $c$

Sensorin peilitason tulisi olla yhdensuuntainen vaaka-akseliin nähden.  $c$ -arvo on kulmapoikkeama edellä mainitusta tasosta ja kuvaa peilin kallistusvirhettä. (Kuva 13.)

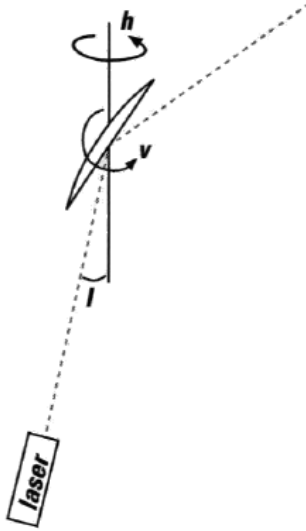


Kuva 13. Peilitason kallistusvirhe  $c$  [9]

#### 4.1.3 Lasersäteen kallistusvirheet, $l_x$ ja $l_y$

Lasersäteen tulisi olla yhdensuuntainen pystyakselin nähden.  $l_x$ - ja  $l_y$ -arvot ovat kulmapoikkeamia edellä mainitusta tasosta ja kuvaavat säteen kallistusvirheitä. (Kuva 14.)

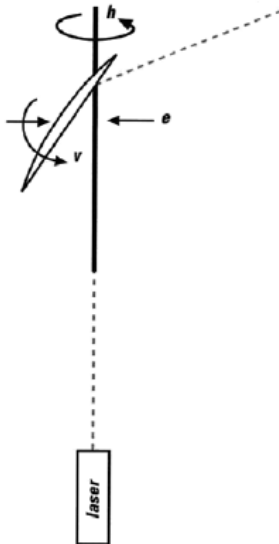




Kuva 14. Lasersäteen kallistusvirheet  $l_x$  ja  $l_y$  [9]

#### 4.1.4 Vaaka-akselin poikkeamavirhe, $e$

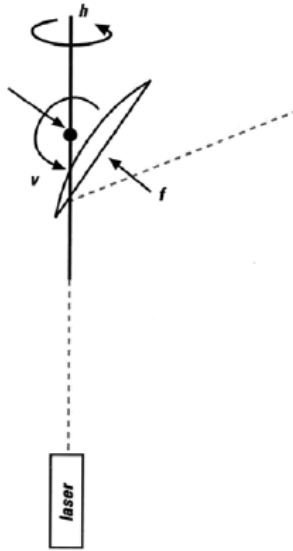
Vaaka-akselin tulisi leikata pystyakselin kanssa.  $e$ -arvo kuvaa akselin poikkeamavirhettä. (Kuva 15.)



Kuva 15. Vaaka-akselin poikkeamavirhe  $e$  [9]

#### 4.1.5 Peilin poikkeamavirhe, $f$

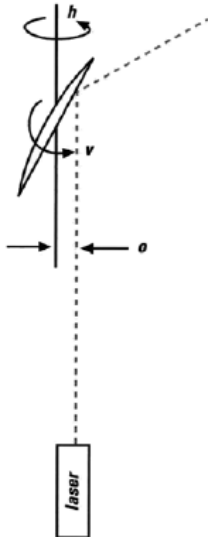
Peilitason tulisi sijaita vaaka- ja pystyakseleiden leikkauspisteessä.  $f$ -arvo kuvaa peilitason epäkeskisyyttä edellä mainitusta leikkauspisteestä. (Kuva 16.)



Kuva 16. Peilin poikkeamavirhe  $f$  [9]

#### 4.1.6 Lasersäteen poikkeama virheet, $O_x$ , $O_y$ , $O_{2x}$ ja $O_{2y}$

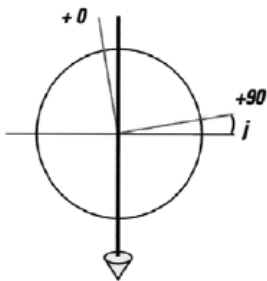
Lasersäteen tulisi olla samansuuntainen pystyakselin kanssa.  $O_x$ ,  $O_y$ ,  $O_{2x}$  ja  $O_{2y}$ -arvot kuvaavat lasersäteen poikkeama pystyakselin suunnasta. (Kuva 17.)



Kuva 17. Lasersäteen poikkeamavirheet  $O_x$  ja  $O_y$  [9]

#### 4.1.7 Pystykulman indeksivirhe, $j$

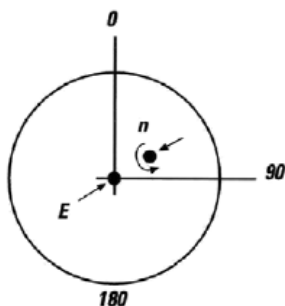
Lasersäteen osoittaessa vaakatasoon tulisi pystykulman kehälukeman olla tasan yhdeksänkymmentä astetta.  $j$ -arvo on pystykulman indeksivirhe, ja se kertoo poikkeaman pystykulman kulmalukemaan. (Kuva 18.)



Kuva 18. Pystykulman indeksivirhe  $j$  [9]

#### 4.1.8 Vaaka- ja pystytason asentoanturin epäkeskisyys, $E_x$ ja $E_y$ , $K_x$ ja $K_y$

Asentoanturin keskipisteen tulisi sijaita sen pyörähdyksakselilla.  $E_x$ -,  $E_y$ -,  $K_x$  ja  $K_y$ -arvot kuvaavat pyörähdyksakseliin nähden. (Kuva 19)



Kuva 19. Asentoanturin epäkeskisyysvirheet  $E_x$  ja  $E_y$  [9]

#### 4.1.9 Interferometrisen etäisyydenmittauksen virhe

Laserseuraimen etäisyydenmittaus perustuu laserinterferometriin. Interferometri pystyy mittaamaan nopeasti etäisyyttä ja sen muutosta. Ongelmia aiheuttaa mitatun etäisyyden olevan suhteellista muutosta etäisyydessä eikä todellista, absoluuttista etäisyyttä. Laserseuraimessa ongelma ratkaistaan sitomalla interferometrinen etäisyydenmittaus tunnettuun (kotipesä) paikkaan.

Laserseuraimen rungossa on kohta, jota kutsutaan kotipesäksi (eng. *bird bath*, *home point*). Nimi tulee sen muodosta, joka muistuttaa linnunpesää. Kotipesän ja sensoripään peilin välinen etäisyys tunnetaan tarkasti, jolloin mittaukset voidaan sitoa siihen. Toisin sanoen laserseuraimen etäisyydenmittauksen tarkkuus riippuu kotipesän määrittämisestä. Kotipesän sijainti voidaan määrittää käyttämällä kahden pisteen metodia tai käyttämällä mittalattaa. Kotipesän määrittästä selvitetään lisää luvussa 6.1.3. [7; 9; 10.]

#### 4.1.10 Absoluuttisen etäisyydenmittauksen virhe

Laserseuraimen etäisyydenmittaus perustuu laserinterferometriin. Niin kauan kuin interferometrinen säde pysyy katkeamattomana, pystytään mittaamaan absoluuttisia etäisyyksiä. Lasersäteen katketessa tulee tähyksellä asettaa kotipesään tai muuhun tunnettuun sijaintiin laserinterferometrisen etäisyydenmittauksen alustamista varten. Edellä mainitusta syystä johtuen on laserseuraimen lisätty absoluuttinen etäisyyssmittari.

Absoluuttietäisyyssmittarin avulla pystytään määrittämään tähykselle etäisyys laserseuraimesta ilman että tähyksellä asetettaisiin kotipesään. Absoluuttinen

etäisyydenmittaus perustuu valon kulkuajan mittaukseen (TOF), ja aikaa mittaukseen tarvitaan noin kaksi sekuntia. Tällä ajanjaksolla interferometri tarkkailee tähyksen paikalla pysymistä. Absoluuttisen etäisyysmittarin nollapiste ja interferometrisen etäisyydenmittauksen ja absoluuttisen etäisyysmittauksen välinen mittakaavakerroin määritetään interferometrin avulla. [7; 9; 10.]

#### 4.2 Tähyksen virheet ja tähyksivakion määrittäminen

Tähykset valmistetaan tarkkuustuotteina ja jokaiselle niistä määritetään tehtaalla tähyksivakio. Silti jokaisessa tähyksessä on rakenteesta ja heijastinmateriaalista johtuvaa virhettä. Lisäksi jokainen mittalaite sekä mittaa että keskittää hieman eri lailla tähykseen. Tästä johtuen jokaiselle tähykselle tulisi määrittää kyseisen laitteen kanssa oma tähyksivakio.

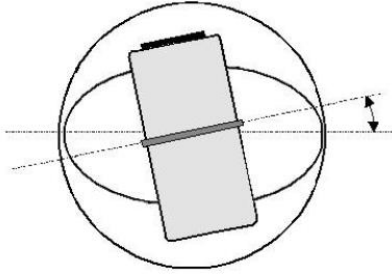
Muilla kuin ilmatäytteisillä tähyksillä on sisäinen väliaineesta johtuva etäisyyden mittaukseen vaikuttava vakio. Lasersäde taipuu tähyksen sisälle mennessä ja ulos tullessa. Tämä etäisyyden mittaukseen vaikuttava vakio tulee määrittää. [7; 9; 10.]

#### 4.3 Paikoituskameran virheet

Käytettäessä T-sarjan tuotteita laajennetaan laserseurainta asettamalla sensoriyksikön yläpuolelle paikoituskamera. Kamera painaa noin viisi kiloa. Tästä johtuen sensorin korjausparametrit tulee myös uudelleen määrittää. Paikoituskameran ja sensoriyksikön väliset kiertokulmat ja siirrot määritellään erillisellä määrittäytökalulla. Määritettäviä parametreja on kymmenen kappaletta. Kameran sisäisiä parametreja käyttäjä ei pysty itse määrittämään, mutta osa niiden tarkistuksista sisältyy kenttätestiin. [9; 15]

##### 4.3.1 Suuntausvirhe, $C_b$

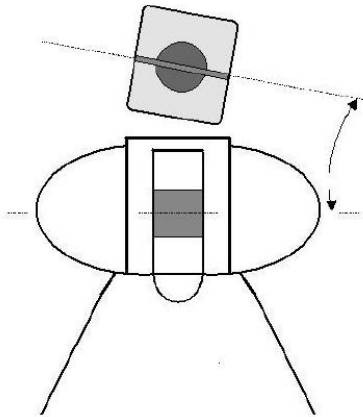
Paikoituskameran vaaka-akselin tulisi olla yhdensuuntainen sensoripään vaaka-akselin kanssa.  $C_b$ -arvo kuvaa yhdensuuntaisuuden poikkeamavirhettä ylhäältäpäin katsottuna. (Kuva 20.)



Kuva 20. Paikoituskameran suuntausvirhe  $C_b$  [15]

#### 4.3.2 Vaaka-akselin kallistusvirhe, $C_i$

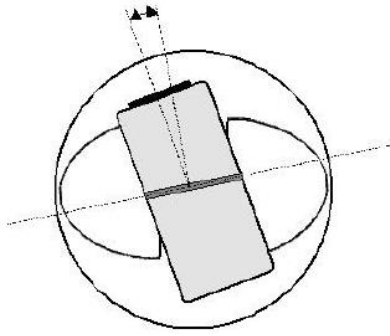
Paikoituskameran vaaka-akselin tulisi olla yhdensuuntainen sensoripään vaaka-akselin kanssa.  $C_i$ -arvo kuvaa kallistusvirhettä sivusta katsottuna. (Kuva 21.)



Kuva 21. Paikoituskameran vaaka-akselin kallistusvirhe  $C_i$  [15]

#### 4.3.3 Kollimaatiovirhe, $C_c$

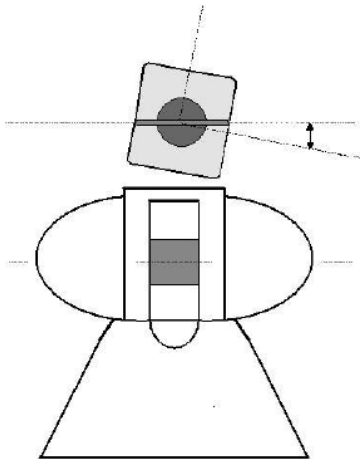
Paikoituskameran kuva-akselin tulisi olla yhdensuuntainen kameran vaaka-akselin kanssa.  $C_c$ -arvo kuvaa kulmavirhettä ylhäältäpäin katsottuna. (Kuva 22.)



Kuva 22. Kollimaatiovirhe  $C_c$  [15]

#### 4.3.4 Kallistuskulmavirhe, $C_r$

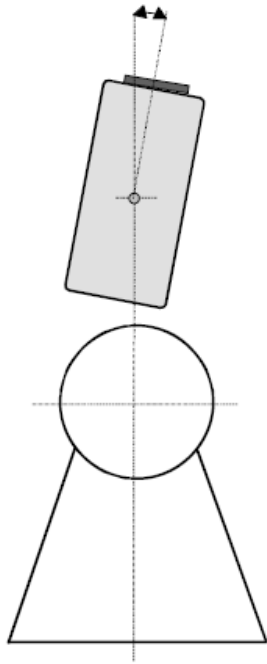
Paikoituskameran kuvan kiertyminen suhteessa vaaka-akseliin.  $C_r$ -arvo kuvaa kuvan kallistuskulmavirhettä sivusta katsottuna. (Kuva 23.)



Kuva 23. Kallistusvirhe  $C_r$  [15]

#### 4.3.5 Indeksivirhe, $C_j$

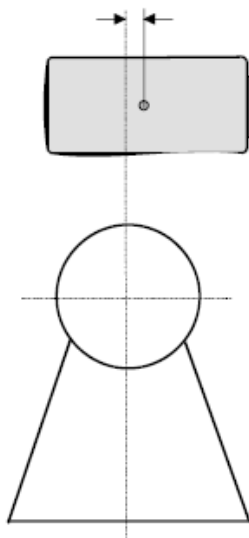
Paikoituskameran kulmalukuanturin nolla-arvon tulisi olla yhdensuuntainen sensorin pystyakselin kanssa.  $C_j$ -arvo kuvaa kulmavirhettä sivusta katsottuna. (Kuva 24.)



Kuva 24. Indeksivirhe  $C_j$  [15]

#### 4.3.6 Vaaka-akselin poikkeama, CD

Paikoituskameran vaaka-akselin tulisi sijaita sensorin pystyakselilla. CD-arvo kuvaa vaaka-akselin sijaintipoikkeamaa. (Kuva 25.)

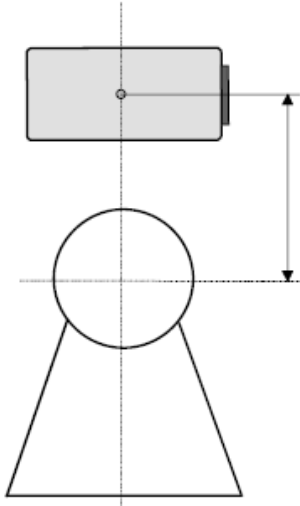


Kuva 25. Vaaka-akselin poikkeama CD [15]



#### 4.3.7 Vaaka-akselin korkeuspoikkeama, CH

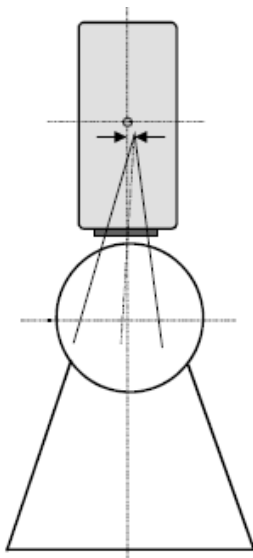
Paikotuskameran vaaka-akselin tulisi sijaita määritetyllä korkeudella sensoriyksikön peilin keskipisteestä. CH-arvo kuvaa vaaka-akselin korkeuspoikkeamaa. (Kuva 26.)



Kuva 26. Vaaka-akselin korkeuspoikkeama CH [15]

#### 4.3.8 Projektiokeskuksen sijaintipoikkeama, $C_x$ , $C_y$ , $C_z$

Paikotuskameran projektiokeskuksen tulisi sijaita sensoriyksikön pystyakselilla.  $C_x$ -,  $C_y$ -, ja  $C_z$ -arvot kuvaavat projektiokeskuksen siirto- ja kiertoarvoja. (Kuva 27.)



Kuva 27. Projektiokeskuksen sijaintipoikkeamat  $C_x$ ,  $C_y$ ,  $C_z$  [15]

#### 4.4 Laserskannerin virheet

Käsiskannerissa on sisäisiä ja ulkoisia virhelähteitä. Sisäiset virhelähteet ovat mekaanisia, kuten laserin lähettimen ja vastaanottimen virheet ja peilin sijainti. Osaa näistä sisäisistä virheistä voidaan minimoida, mutta ei poistaa. Yksi sisäistä virheistä on lasersäteessä oleva huojunta, jota voidaan minimoida kenttätesteillä.

Ulkoisia virhelähteitä ovat muun muassa skannerin paikoitusvirhe ja olosuhdetekijät. Näitä virheitä voidaan määrittää ja minimoida erilaisten kalibroitipalojen avulla. Käsiskannerin paikoitusvirheet määritetään jokaiselle skannerin tartuntasivulle (Face) erikseen. [12; 13]

#### 4.5 Mittasensorin virheet

Mittasensorin sisäiset virheet muodostuvat käytettävän mittauskärjen muotovirheestä, kärjen sijainnin suhteesta mittasensorin paikoituspisteeseen sekä kärjen pystysuoruudesta. Kärjen rakenne ja virheet määritetään määrittäjäkalun avulla. Ulkoisia virhelähteitä ovat muun muassa paikoitusvirhe, olosuhteet ja mitattavan pinnan pinnankarheus.

Mitattaessa mittasensorilla tulisi aina valita mahdollisimman lyhyt, mutta mahdollisimman suuri kärki virheiden minimoimiseksi. Lyhyellä kärjellä minimoidaan paikoitusvirhettä ja suurella kärjellä pinnankarheudesta syntyvää virhettä. [14]

### 5 Kenttätestit

Lasereurain on tarkka, nopea ja helppokäyttöinen mittauslaite suurten kappaleiden mittauksissa. Sen etuina ovat liikuteltavuus ja laaja mittausalue. Heikkoutena voidaan pitää ympäristöolosuhteiden suurta vaikutusta mittauksen laatuun. Suurin yksittäinen virhe mittaukseen syntyy nopeasta poikittaisesta ilmavirtauksesta sensorin ja tähyksen välillä, mikä tulisikin aina ottaa huomioon mittauksia tehtäessä. Muita virhelähteitä ovat kotipesän sijainnin määrittämisen virhe, mitattavien pisteiden välinen suuri kulma sekä olosuhdeanturin mittausepävarmuus. [3; 7; 9; 11.]

Kenttätesteillä seurataan laserseuraimen sensorin sisäisten korjausparametrien (kompensaatiot) toistotarkkuutta. Valmistaja suosittelee kenttätestien tekemistä seuraavasti:

- viikoittain, kuitenkin vähintään kerran kuudessa
- jokaisen suurta tarkkuutta vaativan työn yhteydessä
- jos laserseurainta on kuljetettu pitkiä matkoja
- jos mittausolosuhteet muuttuvat huomattavasti.

Väliä voidaan pidentää, jos parametreissa ei havaita poikkeamia. Havaittaessa kenttätesteissä sallitun toleranssin ylittäviä poikkeamia, tulee laitteen virhemäärittely tehdä uudelleen.

Kenttätesti on erinomainen tapa tarkastella laserseurainjärjestelmän tarkkuutta vallitsevissa olosuhteissa. Saatu tulos kertoo suoraan saavutettavan tarkkuuden. Testi jakautuu kahteen osioon riippuen käytetystä järjestelmäkokoontaan. Mitattaessa ainoastaan pallotähykseen ilman Leican T-sarjan tuotteita, käytetään kenttätestistä termiä 3D. Mitatessa T-sarjan tuotteilla käytetään testistä termiä 6DOF. [7; 8; 9.]

## 5.1 Mittausolosuhteet

Kenttätestit tulisi tehdä vallitsevissa olosuhteissa, jolloin nähdään laserseuraimella kulloinkin saavutettava tarkkuus sekä järjestelmän toimintakunto. Laserseurain on herkkä ilmavirralle ja tärinälle. Myös ulkoiset lämmönlähteet mittausalueen läheisyydessä vaikuttavat laserseuraimen tarkkuuteen. Sensorin ulkoisen lämpötilan tulee olla lähellä mittausympäristön lämpötilaa. Sensoryksikkö tarkkailee ja säätää sisäistä lämmönmuodostumista, koska se aiheuttaa muodonmuutosta sensorin lämmitessä. Lisäksi interferometrisessä mittauksessa käytettävän laserin toimintalämpötilan saavuttamiseen tarvitaan aikaa. Normaalisissa mittauksissa sensorin sisäisen lämpötilan tulisi lämmitä ja tasaantua kolmekymmentä minuuttia. Interferometri ilmaisee tilansa valo- ja äänimerkein. Tarkkoja mittauksia tehdessä valmistaja suosittelee neljän tunnin lämmitysaikaa.

Laserseuraimeen on liitetty sääasema, jonka avulla seurain korjaa reaaliajassa interferometrin ja absoluutietäisyysmittarin aallonpituuden kerrointa. Yhden asteen muutos lämpötilassa tai neljän millibaarin muutos ilmanpaineessa vaikuttaa mittaukseen yhden ppm verran. Laserseurain korjaa refraktiokerrointa puolen ppm:n välein. [7; 9]

## 5.2 3D-kenttätetit

3D-testeissä tarkastellaan sensoriyksikön korjausparametrien virheitä. Mitattavia parametreja on viisitoista kappaletta. Näiden lisäksi tarkastellaan etäisyydenmittausta interferometrisesti ja absoluuttisesti sekä tarkastellaan lasitäytteisten tähyksien väliaineesta johtuvaa etäisyysmittauksen vääristymää. [8; 9]

### 5.2.1 IFM-etäisyydenmittaus

Testi tehdään kahden pisteen metodilla. Testin tarkoituksena on tutkia kotipesän sijainnin määrittämisen tarkkuutta. Ensimmäisessä kojeasemassa sensoriyksikkö sijoitetaan kahden tähyksen väliselle suoralle, suoran kulkiessa sensoripään tasalla ja kulman ollessa mahdollisimman lähellä oikokulmaa, 180 astetta. Mittaus käynnistyy kotipesästä interferometrin alustuksella, jonka jälkeen mitataan molemmat pisteet ilman lasersäteen katkeamista. Toisessa kojeasemassa sensoriyksikkö sijoitetaan pisteiden muodostaman suoran jatkeelle ja mitataan pisteet interferometrin alustuksen jälkeen ilman säteen katkeamista. Testiin voidaan käyttää erillistä mittaushaarukkaa (Kuva 28) (IFM Distance Tool), jolloin testin tekeminen helpottuu, kun sensoriyksikön siirtämisen sijasta siirretään mittaushaarukkaa. Ensimmäisessä mittauksessa määritetään pisteiden välinen poikkeama ja toisessa mittauksessa lasketaan kotipesän etäisyys. Kotipesän määrittämisen epävarmuuden tulisi olla alle  $\pm 10$  mikrometriä.



Kuva 28. Interferometrisen etäisyydenmittauksen ja kotipesän sijainnin testaus mittaushaarukan avulla

### 5.2.2 3D-etäisyydenmittauksen testaus

Testissä käytetään kalibroitua invarista valmistettua mittalattaa (scale bar, SB). Mittalatan todellinen pituus ja lämpöpitenemiskerroin ovat tunnettuja sen kalibroinnin kautta. Latan materiaalilämpötila mitataan ja syötetään ohjelmaan. Ohjelma laskee kertoimen ja lämpötilan avulla korjauksen kalibroidulle pituudelle. Latan molemmissa päissä on paikat erikokoisille (0,5” ja 1,5”) pallotähyksille. Latta sijoitetaan noin puolentoista metrin päähän sensoriyksiköstä latan keskikohdan ollessa kohtisuorasti sensoriyksikköön nähden. Latan pituus mitataan ja verrataan kalibroituun arvoon. Mitattu pituus ei saisi poiketa yli  $\pm 25$  mikrometriä kalibroidusta arvosta. Mittalattaa käytetään myös T-sarjan tuotteiden testaamiseen.

### 5.2.3 Two face -testi

Laserseuraimen tulisi mitata kulmia oikein koko mittausalueella. Two face -testissä tarkastetaan sensoriyksikön kollimaatiovirheet. Mittaukset tähyksiin tehdään kojeen molemmissa asennoissa. Testi jakautuu kahteen osioon.

Ensimmäisessä osiossa mitataan kahteen tähykseen, jotka on sijoitettu sensoripään tasalle. Tähykset sijaitsevat noin neljänkymmenen senttimetrin ja noin seitsemän metrin päässä sensoriyksiköstä. Toisessa osiossa mitataan kolmeen tähykseen, jotka

sijaitsevat puolentoista metrin päässä sensoriyksiköstä neljäkymmenen asteen välein pystysuunnassa, siten että keskimäinen tähys on sensoripään tasalla. Ensimmäisen ja toisen osion tähysten tulee olla toisiinsa nähden yhdeksänkymmen asteen kulmassa vaakatasossa.

Asentojen välisen kulmavirheen tulee olla alle 0,0012 astetta.

#### 5.2.4 Ball bar -testi

Ball bar -testissä tarkastellaan laserseuraimen mittausgeometrian virheitä. Geometrian tarkasteluun sisältyy kulmavirheiden tarkastelu. Ball bar -testissä tähys sijoitetaan moottoroidun varren päähän. Varren pituus on tunnettu ja mitattavan ympyrän keskipiste on sijoitettu samalle korkeudelle sensoripään kanssa. Moottoroitu varsi mitataan kahdessa asennossa, kahdella eri etäisyydellä. Mittaustuloksista sovitettua ympyrää verrataan teoreettiseen ympyrään, joka saa poiketa yhden metrin etäisyydeltä mitattuna  $\pm 15$  mikrometriä ja kolmen metrin etäisyydeltä mitattuna  $\pm 45$  mikrometriä. (Kuva 29.)



Kuva 29. 6DOF Ball bar -testi käynnissä

### 5.2.5 ADM-etäisyydenmittaus

Testissä mitataan absoluuttietäisyydenmittarin poikkeamaa ja skaalausvirhettä. Mittauksessa referenssinä käytetään interferometriä. Mittausjärjestelyssä mitataan vähintään kaksi pistettä joista toinen on seuraimen lähellä noin puolen metrin päässä ja toinen mittausalueen reunalla, esimerkiksi Leica LTD800 -laserseuraimen tapauksessa neljäkymmenen metrin päässä. Pisteiden väliltä voidaan ottaa lisähavaintoja, jolloin pystytään tutkimaan poikkeamaa eri etäisyyksillä. Interferometrisen ja absoluuttisen etäisyydenmittauksen poikkeamat saavat olla koko mittausalueella  $\pm 25$  mikrometriä.

### 5.2.6 ADM-tähyspoikkeama

TBR-, RFI- ja CER-tähyksissä on niiden rakenteesta johtuvaa tähyspoikkeamaa. Määritetyn poikkeaman oikeellisuutta testataan mittaamalla kaksi pistettä, joiden välinen etäisyys on noin puoli metriä. Etäisyys tähykseen mitataan interferometrillä ja absoluuttietäisyysmittarilla. Pisteiden välimatkan poikkeama tulee olla alle  $\pm 25$  mikrometriä.

## 5.3 6DOF-kenttätestit

6DOF-kenttätesteissä tarkastellaan luvuissa 4.1 ja 4.3 esiteltyjä sensoriyksikön ja kameran korjausparametrien ja niiden yhteistoiminnan virheitä. Kameran paino vaikuttaa sensoripäähän, joten 6DOF-testi sisältää sensorin osalta luvun 5.2 testit. Lisäksi testataan kameran paikoitusparametrit. 6DOF-testissä testataan lisäksi muut järjestelmään kytketyt Leican T-sarjan tuotteet soveltuvin osin.

### 5.3.1 6DOF-etäisyydenmittauksen testaus

6DOF-etäisyydenmittauksen testissä käytetään mittalattaa (scale bar, SB). Sensoriosan virheet tarkastellaan kuten 3D-testissä luvussa 5.2.2. T-Proben virheitä tarkasteltaessa latan molemmissa päissä olevat tähyspaikat mitataan käyttäen koskettavaa mittasensoria (3.3.4). Mittapisteen sijainti voidaan mitata kolmella eri menetelmällä:

- Yksittäisen pisteen mittauksella, jolloin mitattava piste sijaitsee kärjen keskipisteessä.
- Mittaamalla tähyspallon pinnalta pisteitä ja sovittamalla pallopinta. Mittapiste sijaitsee pallopinnan keskipisteessä.
- Mittaamalla tasolta pisteitä ja sovittamalla tasopinta. Mittapiste sijaitsee tason keskipisteessä.

6DOF-etäisyydenmittauksen testaus kuvaa hyvin koko järjestelmän tarkkuutta. Poikkeamien ollessa alle laitevalmistajan ilmoittaman tarkkuuden voidaan järjestelmän toimivuus todeta.

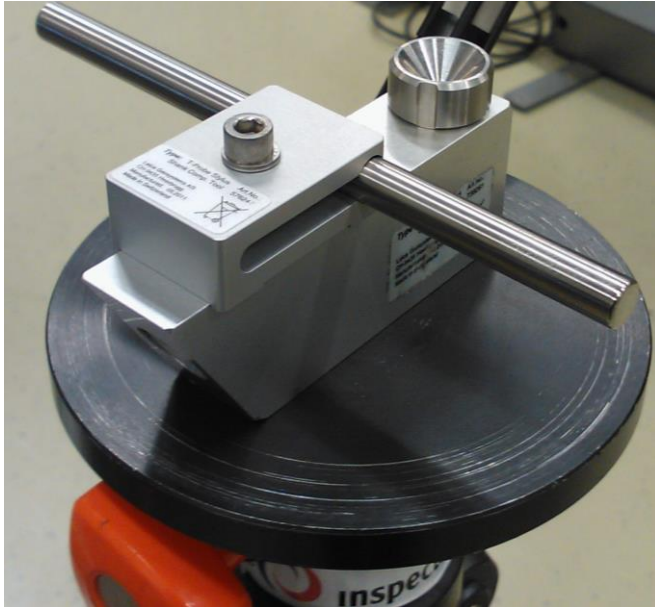


### 5.3.2 Mittakärjen tarkastus

T-Probe-mittasensorin mittakärjen virheet on määritelty kärjen rakentamisen yhteydessä. Mittakärjen geometriavirheiden testaamiseen käytetään samaa työkalua (stylus compensation tool) (Kuva 31) kuin kärjen rakenteen ja virheiden määrittelyyn. Testattaessa pallomaisia kärkiä kärki laitetaan työkalun kartionmalliseen uraan samalla taivuttaen ja kiertäen mittasensoria. Käytettäessä mittakärkenä sylinterinmuotoista tappia tarkastetaan sen suoruuks käyttäen sylinterityökalua (shank compensation tool) (Kuva 31). Tapin varrella kosketetaan työkalun runkoa, samalla kiertäen ja mitaten pisteitä. Toimenpide toistetaan kahdessa asennossa. Kärjen tarkastus tulee tehdä mittasensorin mittakärjen molemmissa kiinnityspisteissä (Kuva 30). Kärjen rakenne ja geometria ovat kunnossa poikkeaman jäädessä alle yhdeksänkymmeneen mikrometriin. [8; 9; 14.]



Kuva 30. T-Probe-mittasensorin mittakärjen kiinnityspisteet [14]



Kuva 31. Mittakärjen geometrian testaus- ja määrittävyökalu

### 5.3.3 Paikoitusledien tarkastus

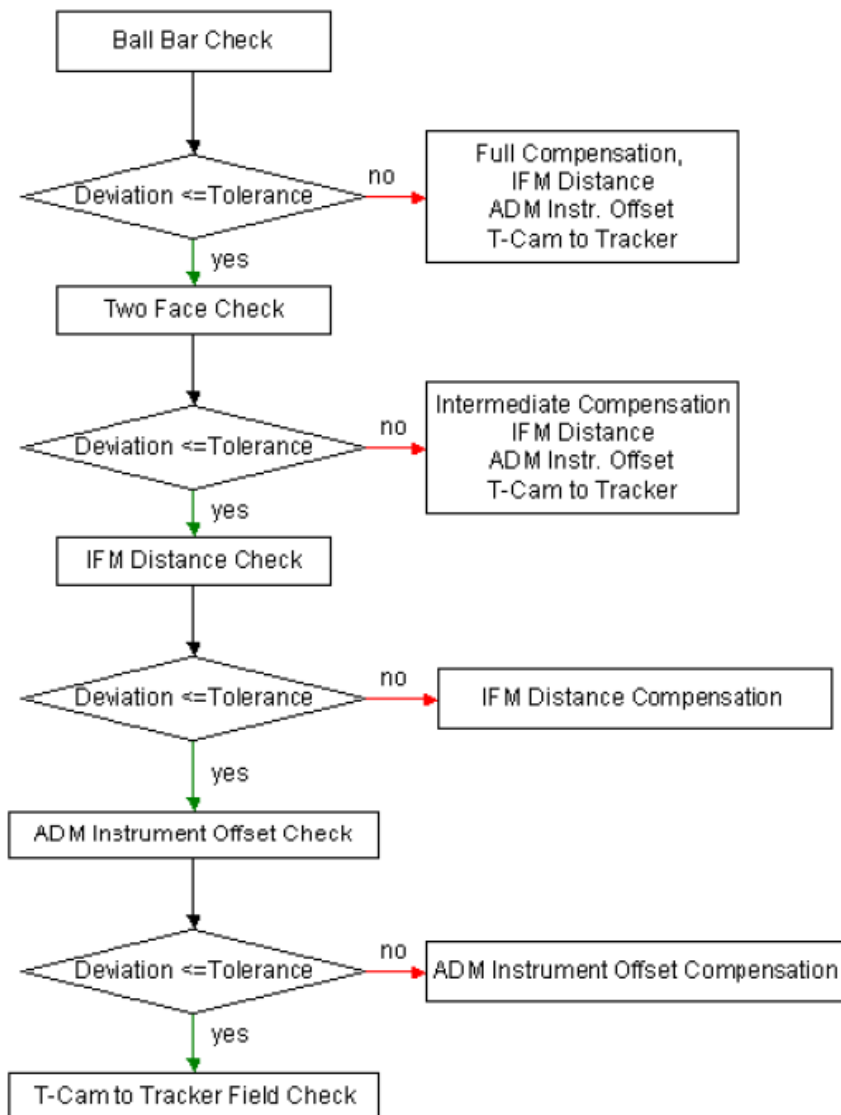
Koskettavan mittasensorin, käsilaserskannerin tai muun T-sarjan tuotteen sensoriosassa olevien paikoitusledien sijainti mitataan sijoittamalla sensori tukevalle ja liikkumattomalle alustalle. Paikoituskamera vertaa sensorin ledien sijaintia kameran sisäiseen referenssikuvaan. Sensorin paikoitusledien sijaintipoikkeaman tulee olla alle puoli mikrometriä.

### 5.3.4 Paikoituskameran geometrian testaus

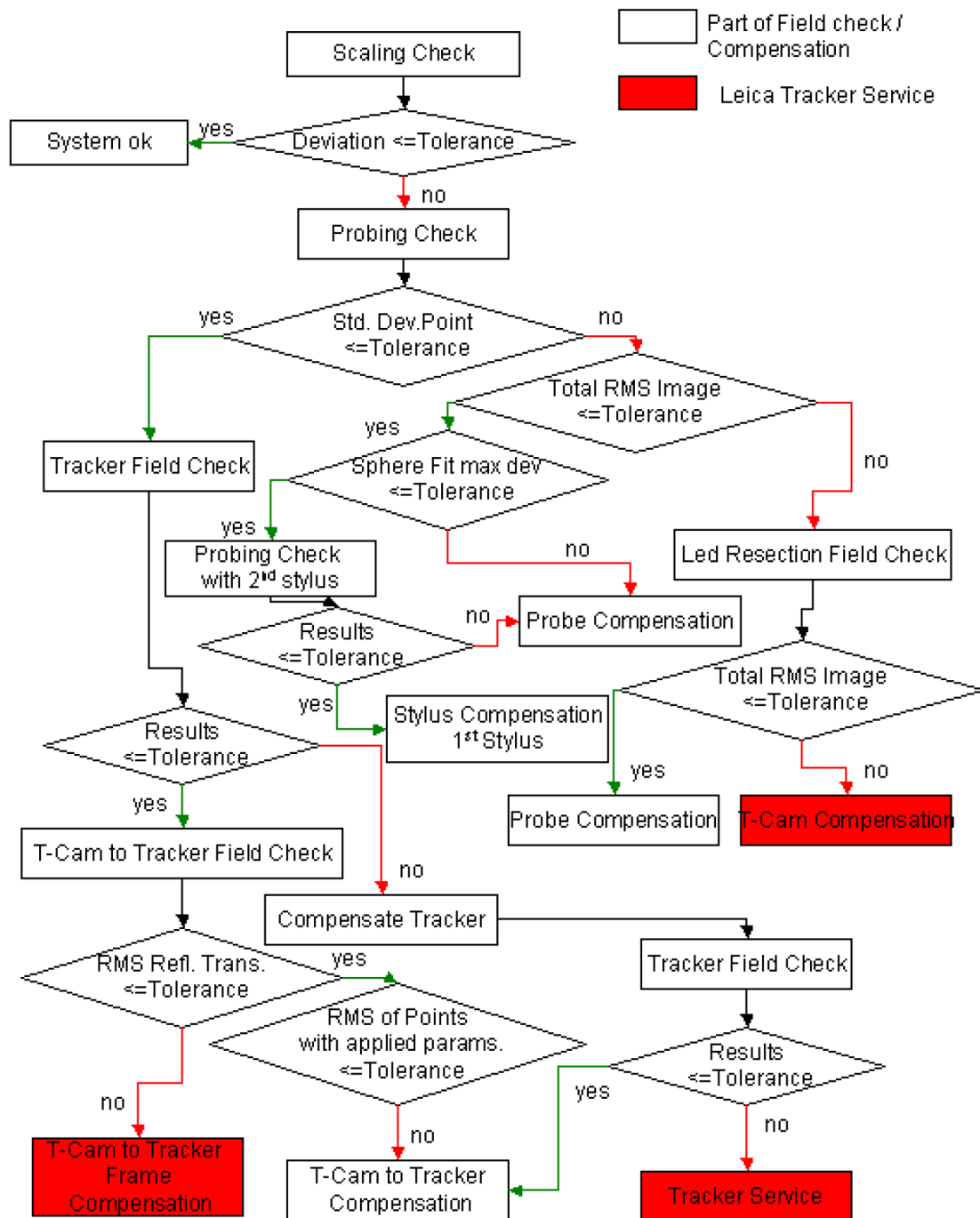
Paikoituskameran geometriset korjausarvot testataan käyttäen siihen tarkoitettua referenssialustaa (T-Cam compensation tool) sekä puolen tuuman (0.5") CCR- tai RRR-tähystä. Alustassa on kymmenen paikoitusledyä sekä viisi paikkaa tähykselle. Alusta sijoitetaan noin puolentoista metrin päähän sensoryksiköstä paikoituskameran kanssa samalle tasolle. Alustan paikoitusledit saavat virran kaapelilla laserseuraimen ohjausyksiköstä. Puolen tuuman (0.5") tähyksellä mitataan kaikki alustan tähyspaikat mittaussädettä katkaisematta. Ensimmäisen pisteen mittaus toistetaan, jotta alustan liikkumattomuus voidaan varmistaa. Paikoituskameran geometria on kunnossa, kun paikoitusledien sijaintipoikkeama on alle puoli mikrometriä ja eri tähyspaikkojen välisten kuvien välinen sijaintipoikkeama alle 15 mikrometriä.

### 5.3.5 Ohjatut tarkastukset

emScon-ohjelmisto sisältää ohjatun tarkastusohjelman 6DOF-testeille. Ohjelma etenee puurakenteessa, ja jonkin testin epäonnistuessa ohjelma ohjaa tekemään tarvittavan kenttäkalibroinnin. Kuva 32 on esitelty tarkastuksen rakenne 3D-kenttätestin (Tracker Field Test) osalta (5.2). Testi sisältyy 6DOF-testiin (Kuva 33). Punaisella merkityt kohdat voidaan kalibroida vain Leica Geosystems Ag:n valtuuttaman huollon toimesta.



Kuva 32. Ohjatun tarkastuksen rakenne 3D-testin osalta.



Kuva 33. Ohjatun tarkastuksen rakenne 6DOF-testin osalta.

### 5.3.6 Käsilaserskannerin tarkastus

T-Scan-käsilaserskannerin virheiden tarkastus tapahtuu T-Scan Collect -ohjelmalla. Tarkastelun voi myös tehdä Polyworks-ohjelmistolla. Tarkkuuden tarkastelu on geometrinen muotojen sovittamista ja vertaamista referenssiin. [12; 13]

T-Scan Collect -ohjelmassa on sisäänrakennettu testausmetodi, jossa tarkkuutta voidaan tarkastella mittaamalla tähystankoa, yksittäistä palloa tai tasoa. Tähystangossa on kaksi keraamista palloa tunnetun etäisyyden päässä toisistaan. Palloista mitataan käsiskannerilla pistepilvet, joihin sovitetaan pallopinnat. Sovitettujen pallojen keskipisteiden etäisyyttä verrataan kalibroituun referenssiarvoon. Yksittäisen pallon tapauksessa mitataan pistepilvi, johon sovitetaan pallopinta. Saatua pallopinnan halkaisijaa verrataan pallon halkaisijan kalibroituun referenssiarvoon. Tasotestissä mitataan kaksi tasopintaa, joihin sovitetaan tasot ja joiden välistä etäisyyttä verrataan kalibroituun referenssietäisyyteen.

## 6 Kompensaatiot

Havaittaessa kenttätesteissä sallittujen toleranssirajojen ylittäviä poikkeamia edellisiin kompensatioarvoihin, tulee laserseurainjärjestelmän virhemallit määrittää uudelleen. emScon- ja Axyz-ohjelmat sisältävät kompensatio-osion (compensations), jossa seuraimen mekaaniset virhelähteet voidaan mallintaa. 6DOF ja T-sarjan tuotteiden virhemallinnus voidaan tehdä vain emScon-ohjelmassa. Virhemallin avulla järjestelmän mekaaniset virheet kompensoidaan ohjelmallisesti. Tällöin päästään tilanteeseen, jossa laitteiston rakenteesta johtuva systemaattinen virhe jää riittävän pieneksi ja hyväksyttäväksi. Mittaustuloksen epävarmuuteen vaikuttavat muut seikat ovat määräävämmässä osassa. [8; 9]

Kompensaatiot jakautuvat kolmeen osaan. 3D-kompensaatioissa mallinnetaan vain sensoriyksikön virheitä. 6DOF-kompensaatio sisältää sekä sensoriyksikön että paikoituskameran virheiden mallinnuksen. Kolmanteen osioon kuuluu T-sarjan tuotteiden virheiden mallinnus. 3D- ja 6DOF-kompensaatioissa voidaan tehdä täydellinen virheiden mallinnus (Full Compensation) tai osavirhemallinnus (Intermediate). Osavirhemallinnus kattaa seuraimessa yleisimmin muuttuvat parametrit.

Täydellisessä virhemallinnuksessa laitteistolle määritetään luvun 4.1 ja/tai luvun 4.3 parametrit. Osavirhemallinnuksessa laitteistolle määritetään vain seuraavat parametrit:

- vaaka-akselin kallistusvirhe,  $i$  (4.1.1)
- peilin kallistusvirhe,  $c$  (4.1.2)
- pystyakselin indeksivirhe,  $j$  (4.1.7).

## 6.1 3D-kompensaatiot

3D-kompensoinnissa mallinnetaan sensoriyksikön geometrisiä virheitä ja määritetään niille korjausparametrit. Määritettäviä parametreja on viisitoista. Näiden lisäksi määritetään sensoriyksikön kotipesän sijainti (3.1.2, 4.1.9), absoluuttietäisyysmittarin nollapistevirhe ja skaalauskerroin (4.1.10). Määritysten aikana ilman lämpötilan ja paineen tulisi pysyä mahdollisimman vakiona. 3D-määrittelyn tuloksia on esitetty liitteessä 1.

### 6.1.1 Ball bar -määrittely

Ball bar -määrittelyssä tarkastellaan laserseuraimen mittausgeometrian virheitä dynaamisissa mittauksissa. Määrittelyn käytetään samaa moottoroitua tähytystankoa ja sen sijainnissa pätevät samat ehdot kuin ball bar -testissä (5.2.4).

Mittauksia tehdään kahdeksan kappaletta, 45 asteen jaotuksella sensoriyksikön ympäriltä. Ensimmäisessä vaiheessa mitataan yhden metrin päästä, yhdeksänkymmenen asteen jaolla. 45 asteen ja 225 asteen suunnat mitataan sensorin ykkösasennossa ja 135 asteen ja 315 asteen suunnat sensorin kakkosasennossa. Toisessa vaiheessa mittaukset suoritetaan kolmen metrin etäisyydeltä. Sensorin ykkösasennossa mitataan 90 asteen ja 270 asteen suunnat ja kakkosasennossa 360 asteen ja 180 asteen suunnat. Jokaisessa mittauksessa mitataan kolme täyttä kierrosta havaintoja. Jokaisesta kierroksesta mitataan sata havaintoa.

### 6.1.2 Two face -määrittäminen

Two face -määrittämisessä määritetään sensoripään kollimaatiovirhe. Määrittäminen jakautuu kolmeen osioon, joissa mitataan kaksikymmentäkahdeksan pistettä.

Ensimmäisessä osiossa mitataan kolmeen samalla suoralla olevaan pisteeseen. Kaksi ensimmäistä pistettä sijaitsevat neljäkymmenen senttimetrin päässä sensorista, sen etu- ja takapuolella. Kolmas piste taas sijaitsee vähintään seitsemän metrin päässä sensorista.

Toisessa osiossa mitataan kuusitoista pistettä vaakakehältä 22,5 asteen jaolla kahden metrin etäisyydeltä sensoriyksiköstä.

Kolmannessa osiossa mitataan yhdeksän pistettä (Kuva 34) pystyssä olevalta suoralta. Pistevälin tulee olla kymmenen astetta ja sallittu poikkeama on  $\pm 2$  astetta. Pisteiden ei tarvitse olla samalla etäisyydellä sensoriyksiköstä. Kaikissa osioissa mittaukset tehdään kahdessa asennossa. Ykkös- ja kakkosasetojen välisen kulmavirheen tulisi olla alle 0,0012 astetta.



Kuva 34. Two face -määrityksessä käytettäviä pallotähyspohjia pilariin kiinnitettynä

Ohjelma laskee jokaiselle määrittämiselle tuloksen. Tuloksen ollessa toleranssiarvoa suurempi pyytää ohjelma suorittamaan määrittämisuudelleen. Määrittämistuloksista voidaan tulostaa erittely, jossa niitä voidaan tarkastella yksityiskohtaisemmin.

### 6.1.3 Kotipesän määrittäminen

Kulmavirheiden määrittämisen jälkeen tehdään kotipesän sijainnin määrittäminen kahden pisteen menetelmällä kuten IFM-testissä (5.2.1). Määrittämistarkoituksena on määrittää interferometrille tunnettu referenssipituus.

Määrittäminen tulee toistaa, jotta voidaan varmistua tuloksen oikeellisuudesta. Määrittäminen tulee tehdä jokaiselle tähtäykselle erikseen.



#### 6.1.4 ADM-etäisyydenmittauksen määrittäminen

Määrittäminen tarkoituksena on absoluuttietäisyydenmittarin ja interferometrin välisen poikkeaman ja skaalausvirheen määrittäminen.

Määrittämisessä mitataan vähintään viisi pistettä, joista ensimmäinen on noin kolmen ja puolen metrin etäisyydellä sensorista. Seuraavat pisteet sijoitetaan neljän metrin väleihin. Viimeisen pisteen etäisyys sensorista tulee olla vähintään kaksikymmentä metriä tai maksimi mittausetäisyys (Leica LTD800, neljäkymmentä metriä).

Mitatuista havainnoista lasketaan etäisyydenmittausmenetelmien välinen poikkeama-arvo ja skaalauskerroin. Laskentatulosta hyväksytään, mikäli tulos alittaa laitevalmistajan määrittämän toleranssin.

#### 6.1.5 ADM-tähysoikeus

Muissa kuin ilmatäytteisissä tähyksissä on rakenteesta johtuvaa tähysoikeutta (luku 4.2 Tähyksen virheet). Tähysoikeus määritetään mittaamalla kolme pistettä samalta suoralta. Ensimmäinen piste sijoitetaan noin kolmen ja puolen metrin päähän sensoriyksiköstä. Seuraavat pisteet sijoitetaan puolen metrin väleihin. Pisteitä mitattaessa interferometrinen etäisyydenmittaus ei saa katketa. Havainnoista lasketaan tähysoikeus, joka hyväksytään, mikäli tulos alittaa laitevalmistajan määrittämän toleranssin.

#### 6.1.6 Hakukameran poikkeaman määrittäminen

Sensoriyksikön sensoripään yläpuolelle on saatavissa hakukamera (3.1.9). Hakukamera sijaitsee sensorin pystyakselilla. Hakukameran määrittämisessä määritetään pysty- ja vaakakulmapoikkeamat sensorin akselilinjoihin nähden.

Määrittämisessä mittausväli lukitaan kotipesässä tähykseen ja tähyksessä viedään työskentelyalueen ulkoreunalle sensoripään korkeudelle. Mitataan sijainti, jonka jälkeen sensorin peili kääntyy kameräkuvaa. Hakukameran kuvassa oleva ristikko keskitetään tähykseen ja mitataan pysty- ja vaakakulmat. Määrittäminen ilmoittaa kameran ja sensorin väliset kulmat.

Määrityksen tuloksena saadaan hakukameran ja laserseuraimen pysty- ja vaaka-akselin väliset kulmapoikkeamat. Määritys hyväksytään ja toistetaan tulosten oikeellisuuden todentamiseksi.

#### 6.1.7 Osavirhemallinnus

Laserseuraimen yleisimmin muuttuvista virheistä on mahdollista tehdä osavirhemallinnus. Osavirhemallinnuksessa määritetään seuraavat virheet:

- vaaka-akselin kallistusvirhe,  $i$  (4.1.1)
- peilin kallistusvirhe,  $c$  (4.1.2)
- pystyakselin indeksivirhe,  $j$  (4.1.7).

Osavirhemallinnus ja määritys tehdään kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa mitataan kolme tähyistä, jotka on sijoitettu kolmenkymmenen pystyasteen välein sensoripään tasolta keskimmäisen ollessa sensoripään tasalla. Tähykset mitataan kahdessa kojeasennossa. Toisessa osiossa seurain pyöräytetään 180 astetta pystyakselin ympäri ja suoritetaan havainnot samoihin tähyksiin uudestaan.

Havainnoista lasketaan tulokset. Toleranssin ylittävät tulokset esitetään listauksessa keltaisella tai punaisella värillä. Mikäli tulokset hyväksytään, lasketut korjausarvot tulevat voimaan.

#### 6.2 6DOF-kompensaatiot

6DOF-kompensaatiossa mallinnetaan ja määritetään paikoituskameran virhelähteitä. Paikoituskamera painaa noin viisi kiloa, jolloin sen paino vaikuttaa myös sensorin rakenteeseen. Tämän takia 6DOF-kompensaatio sisältää myös 3D-kompensaation (luku 6.1) määrityksen.

## Paikointuskameran geometrian määrittäminen

Paikointuskameran geometrisiä virhelähteitä on kymmenen kappaletta ja määritettäviä virheparametreja kaksitoista kappaletta. Virhelähteet on esitelty luvussa 4.3. Paikointuskameran virheiden määrittämiseen tarvitaan referenssialusta (T-Cam compensation tool) sekä puolen tuuman (0,5") CCR- tai RRR-tähys.

Määrittäminen koostuu kuudesta erillisestä mittauksesta jossa jokaisessa mitataan referenssialustassa sijaitsevat viisi tähystyspaikkaa. Samassa yhteydessä kamera havainnoi paikointusledien sijaintia tähystyspaikkaan nähden.

Ensimmäisessä kahdessa mittauksessa referenssialusta sijoitetaan puolentoista metrin päähän sensorista ja se nostetaan 1,06 metriä sensorin vaaka-akselin yläpuolelle. Toisessa mittauksessa etäisyys on sama kuin ensimmäisessä mittauksessa ja alusta lasketaan 0,68 metriä sensorin vaaka-akselin alapuolelle. Referenssialusta tulee sijaita  $\pm 50$  millimetrin tarkkuudella ohjeistetusta sijainnista. Ohjelma opastaa oikean sijainnin löytymisessä.

Mittaus suoritetaan jokaiseen tähystyspaikkaan siirtämällä tähystä mittausten välissä lasersädettä katkaisematta. Ensimmäinen mitatuista tähystyspaikoista mitataan uudelleen määrittämislopuksi alustan liikkeen kontrolloimiseksi. Seuraavissa neljässä mittauksessa alusta asetetaan 1.7, viiden, kuuden ja seitsemän metrin etäisyydelle sensorista ja yhdeksäntoista senttimetriä sensorin vaaka-akselin yläpuolelle.

Mittaushavainnoista lasketaan määrittämisparametrit. Mikäli tulokset ovat alle valmistajan määrittämän toleranssirajan ja tulokset hyväksytään, tulee uusi virhemalli voimaan.

### 6.3 T-sarjan tuotteiden kompensatiot

T-sarjan tuotteista T-Proben ja T-Macin kompensatiot voidaan määrittää emScon-ohjelmistossa. T-Scanin osalta määrittely tapahtuu T-Scan Collect -ohjelmistossa. T-Cam Reference Framen -virhemallit on määritetty laitevalmistajan toimesta, eikä käyttäjällä ole oikeuksia niiden määrittämiseen. [8; 9; 12; 14; 15.]

### 6.3.1 Mittakärjen määrittäminen

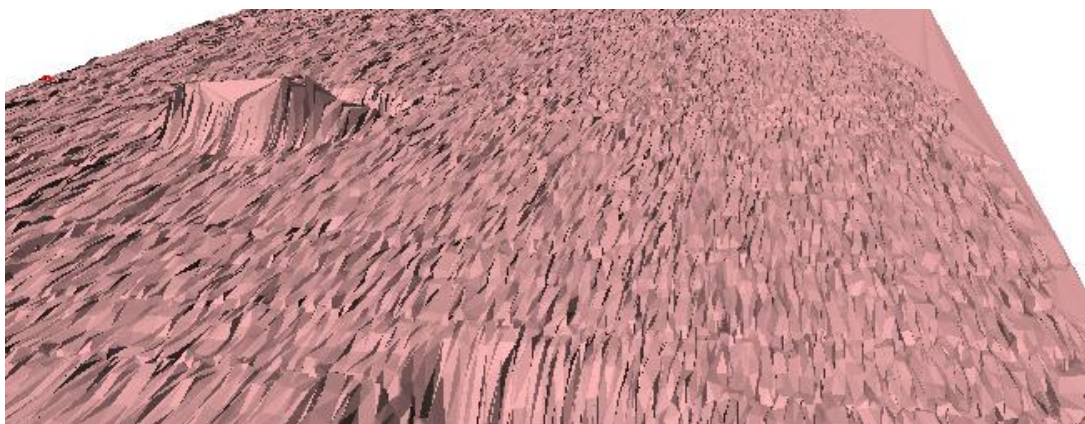
T-Probe-mittasensorin kärjen määrittely tehdään kärjen osalta aina mittakärjen rakennetta muutettaessa. Määrittelyssä havaitaan kärjen sijainnin suhdetta mittasensorissa sijaitsevaan tähykseen.

Mittakärjen määrittely tapahtuu kuten mittakärjen tarkastus (5.3.2). Kärjen määrittäminen tulee tehdä sensorin molemmissa kiinnityspisteissä. Määrittäminen hyväksytään ja toistetaan tulosten oikeellisuuden todentamiseksi.

### 6.3.2 Käsilaserskannerin määrittäminen

Laitevalmistaja suosittelee käsilaserskannerin virheiden määrittelyä aina ennen suurta tarkkuutta vaativan työn tekemistä, paikallisen tarkkuuden heikketessä tai jos pistepilvessä ilmenee kohinaa.

Kohinaa pistepilveen syntyy lämpötilan muuttuessa lyhyellä aikavälillä. Tämä näkyy tasomaisissa kohteissa aaltoiluna. (Kuva 35.) Paikallisen tarkkuuden heikkeneminen johtuu paikoitusgeometrian virheestä. Tämä voi johtua esimerkiksi sensorin osumisesta mitattavaan kappaleeseen. Virhe ilmenee skannauslinjojen välisenä sovitusräyhänä.



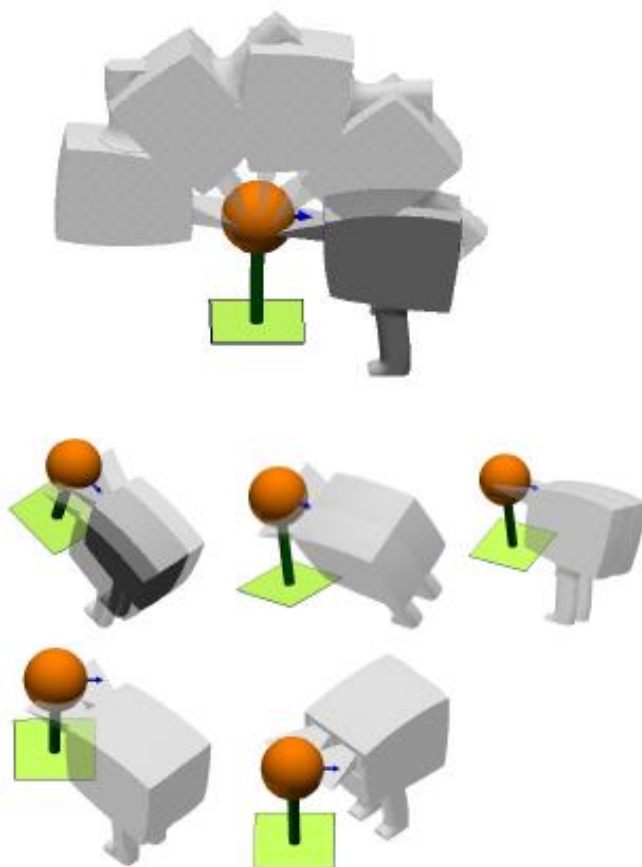
Kuva 35. Laserskannatuspinnassa ilmenevä kohina [19]

Laserskannerin laserin huojuntaa josta kohina johtuu, voidaan vähentää ohjelmallisesti. Huojunnan poisto aloitetaan asettamalla käsilaserskanneri telineeseen (ks. Kuva 8) (Horizontal Holder including Instant Temperature Compensation Kit), jossa oleva tasopinta on skannerin mitta-alueen keskellä ja kohtisuorasti sen mittaussäteeseen

nähdän. T-Scan Collect -ohjelmasta valitaan huojunnan poisto-ohjelma (Reduce Waviness). Ohjelma mittaa säteen huojuntaa ja minimoi sen vaikutusta. Ohjelma ilmoittaa lasersäteen keskihajonnan, maksimihajonnan ja keskipoikkeaman ennen ja jälkeen mittauksen. Huojunnan poisto voidaan todeta onnistuneeksi ja korjausarvot hyväksyä, kun uudet arvot ovat vanhoja arvoja pienemmät. Arvojen jäädessä vanhoja huonommaksi tulee mittaus uusia.

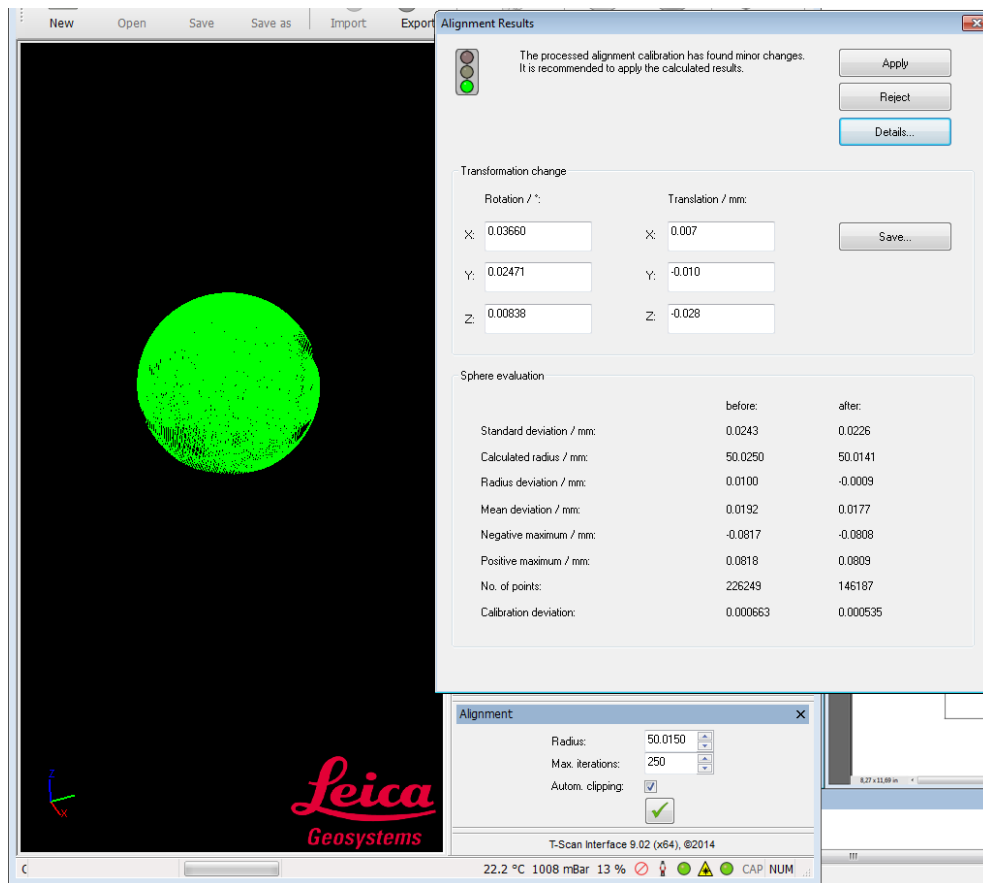
Paikoitusgeometrian määrittystä varten tarvitaan kalibrintipallo. Kalibrintipallo tulee olla kalibroitu sen todellisen halkaisijan todentamiseksi. Todellista mittausta tarvitaan referenssiksi määrittämittaukselle.

Määrittä tapahtuu mittaamalla pallopinnasta pistepilvi. Käsilaserskannerin jokaisen tartuntasivun (face) geometrinen määrittä tehdään erikseen. Oikealla, vasemmalla ja ylätartuntasivulla pallo mitataan viidestä eri pääkohdasta. Takatartunnasta mitattavia pääkohtia on neljä kappaletta. Jokainen pääkohta jakautuu yhteentoista alakohtaan. Mitattavat kohdat on esitetty Kuva 36.



Kuva 36. Käsilaserskannerin tartuntasivun määrittämisen alakohdat [12]

Pistepilven sovitus pallopintaan tehdään, kun kunkin tartuntasivun mittauskohdat on mitattu. Sovituksen tuloksista saadaan kiertokulmat, siirrot sekä sovitetun pallopinnan sovitusvirheet. Määrittämisen laatua havainnoidaan sovitustulosten lisäksi liikennevaloilla; vihreä valo on merkki onnistuneesta määrittämisestä. (Kuva 37.) Määrittämisen onnistuessa otetaan se käyttöön ko. tartuntasivulle ja ryhdytään määrittämään seuraavan tartuntasivun mittausgeometriaa.



Kuva 37. Käsilaserskannerin tartuntasivun määrittämisen tulokset

## 7 Kenttäkalibrointi

Kenttätestaus ja kenttäkalibrointi voidaan mieltää samaksi asiaksi ja tässäkin insinööriydessä ne sivuavat tosiaan kenttätesteissä ja -määrittämissä. Siitä huolimatta jaan ne kahdeksi eri aiheeksi. Miellän kenttätestauksen testaukseksi, jossa laitteeseen määritettyjen arvojen toistuvuutta tutkitaan kenttäolosuhteissa. Kenttäkalibroinnissa taas verrataan laboratoriossa kalibroittujen normaalien tai referenssien mittoja kentällä saatuihin tuloksiin. Näin nähdään järjestelmän todellinen tarkkuus vallitsevassa olosuhteissa.

Normaalit ovat yleensä arvokkaita ja alttiita vioittumiselle konepajaolosuhteissa. Näistä syistä johtuen suunnittelin ja koneistutin kappaleen, jonka voi viedä huonompiinkin konepajaolosuhteisiin. Kappale on lisäksi kalibroitu laboratoriossa, joten se toimii näin vertailunormaalina.

Vertailua suoritettiin kolmeen eri referenssinormaaliin. Mittalatta ja kalibrointipallo ovat tehdastekoisia referenssejä, jotka on kalibroitu Mittaustekniikan keskuksessa (Mikes). Kolmas referenssi on teettätetty kalibrointipala, joka on kalibroitu (liite 2) Inspecta Tarkastus Oy:n pituuskalibrointilaboratoriossa Raumalla.

Vertailun aikana mittaustilan ja kappaleiden lämpötilat vaihtelivat kahdenkymmenen yhden ja kahdenkymmenen kolmen celsiusasteen välillä. Kappaleiden kalibrointilämpötilan ja vertailun aikaisen lämpötilan ero ei ollut merkitsevä tässä vertailussa. Mittalatta on valmistettu invarista, kalibrointipallo on keraaminen ja kalibrointipala on valmistettu Alumecistä™. Kappaleiden mitat ja lämpöpiteneimiskertoimet ovat suhteellisen pieniä, joten niistä ei synny merkitseviä virheitä vertailuun.

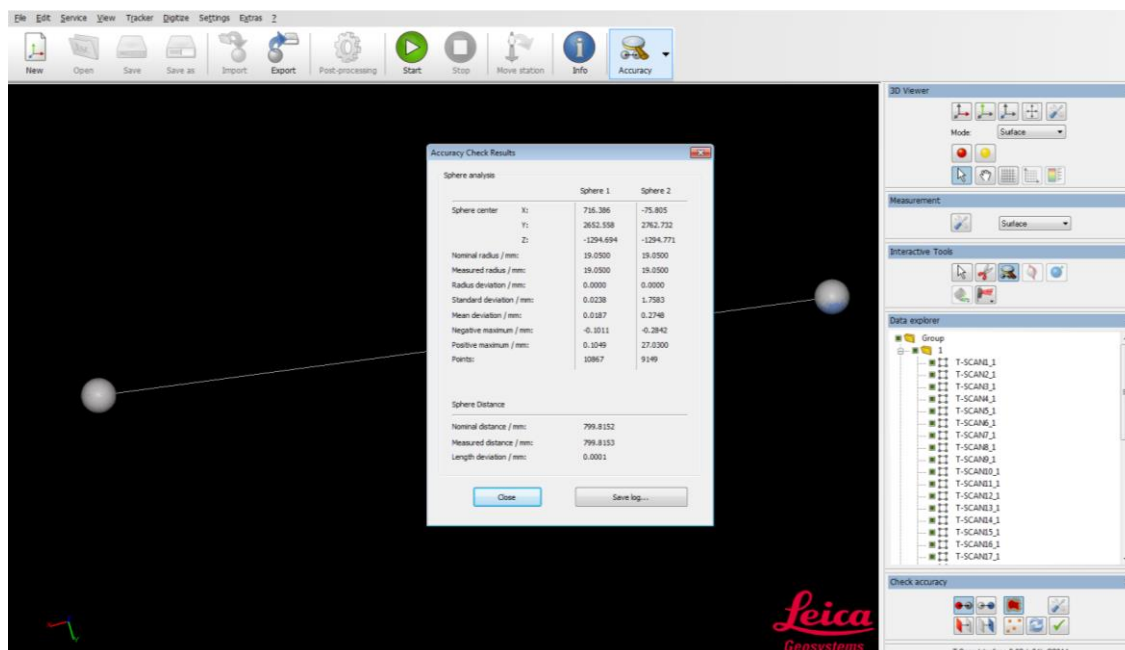
## 7.1 Mittalatta

Mittalatan vertailu tehtiin kahdella eri mittausmenetelmällä. Mittalatta on tarkoitettu seuraimen ja mittakärjen tarkkuuden tarkasteluun, joten sen soveltuvuudesta käsilaserkannerin tarkkuuden tarkasteluun ei ollut takeita.

### 7.1.1 Laserskannaus

Mittalatassa on paikat pallotähykselle. Pallotähyksen muoto ja halkaisija tunnetaan muutaman mikrometrin tarkkuudella. Kalibroinnissa skannataan pallotähyks latan molemmissa päissä ja sovitetaan skannattuihin pistepilviin pallopinnat. Sovitettujen pallopintojen keskipisteiden välistä etäisyyttä verrataan referenssiarvoon (Kuva 38). Etäisyystulos vaihteli kolmessa mittauksessa  $\pm 30$  mikrometrin verran latan referenssiarvosta. Saatua tulosta voidaan pitää hyväksyttävänä. Valmistaja määrittää laitteiston epävarmuudeksi  $\pm 60$  mikrometriä. Kalibrointimetodia voidaan pitää nopeana ja luotettavana tapana tarkastella laserskannerin tarkkuutta kenttäolosuhteissa.





Kuva 38. Käsilaserskannerin tarkkuuden tarkastelu mittalatan avulla

### 7.1.2 Mittakärki

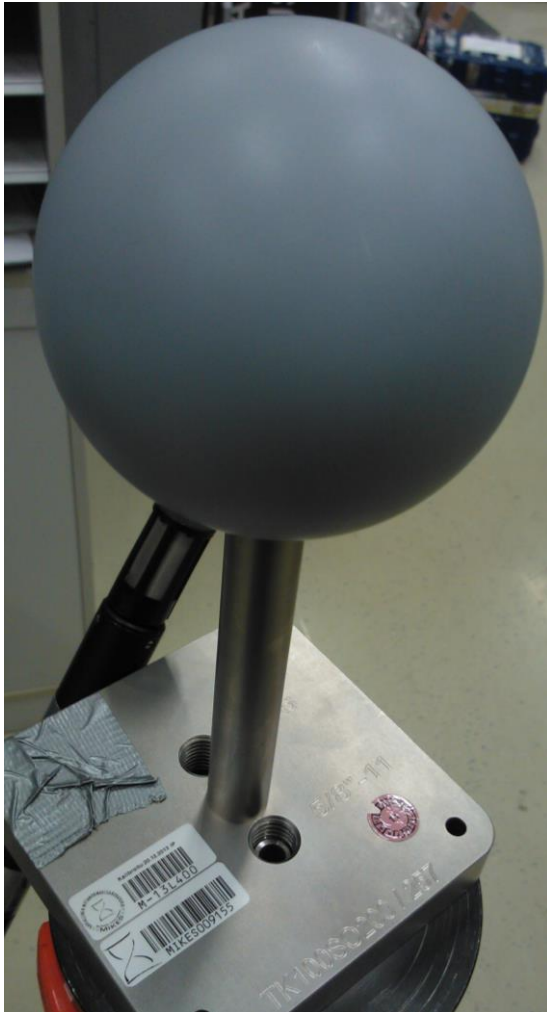
Mittakärkeä vertaillaessa käytettiin kuuden millimetrin halkaisijalla olevaa rubiinipalloa. Rubiinipallo sopii mittalatan tähyspaikkaan. Kalibroinnissa mittakärki sijoitetaan tähyspaikkoihin ja havaitaan sijainnit. Havainnoista lasketaan vektori, jota verrataan referenssipituuteen. Mittaus toistettiin kahdesti. Tuloksen maksimipoikkeama referenssipituudesta oli kaksikymmentäviisi mikrometriä. Kalibroinnin tulosta voidaan pitää hyväksyttävänä. Laitevalmistaja määrittää kyseiselle etäisyydelle laitteiston epävarmuudeksi  $\pm 30$  mikrometriä.

Tulosta voidaan parantaa käyttämällä mittakärkenä puolentoista tuuman (1,5") keraamista puolipalloa. Puolentoista tuuman (1,5") keraaminen puolipallo sopii paremmin mittalatan tähyspaikkaan. Toinen tulosta mahdollisesti vääristävä virhe syntyi kärjen kulumisesta johtuvasta välyksestä tähyspaikan ja kärjen välillä.

### 7.2 Kalibrointipallo

Kalibrointipallon vertailu tehtiin käyttäen koskettavaa mittasensoria ja käsilaserskanneria. Kalibrointipallo (Kuva 39) on tarkoitettu käsilaserskannerin

paikoitusvirheiden tarkasteluun (5.3.6) ja määrittelyyn (6.3.2). Kalibroinnin perusteella se soveltuu myös mittasensorin tarkkuuden tarkasteluun.



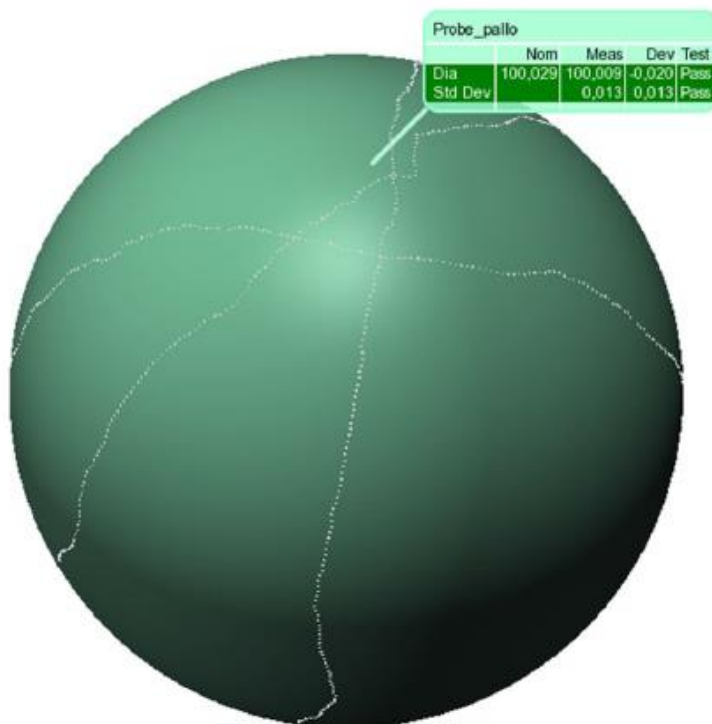
Kuva 39. Käsilaserskannerin paikoitusvirheiden tarkasteluun ja määrittelyyn tarkoitettu kalibrintipallo

### 7.2.1 Koskettava mittasensori

Mittasensorilla mitattaessa kalibrintipallon pinnalta mitataan yksittäisiä pisteitä tai skannataan pistepilveä (continuous time), joista sovitetaan pallopinta. Mitattujen pisteiden tulisi kattaa koko pallo mahdollisimman hyvin, jolloin pallon pinnassa olevat muotovirheet vaikuttavat mahdollisimman vähän sovitettavaan pallopintaan.

Kalibrintipallosta mitattiin kolme leikkausta (Kuva 40), joita käytettiin pallopinnan sovittamiseen. Sovitetun pallopinnan halkaisija poikkesi referenssin kalibroituun

halkaisijaan nähden 0,02 millimetriä, pallopinnan sovituksen hajonnan ollessa 0,013 millimetriä. Kyseinen menetelmä sopii hyvin kenttäkalibrointiin. Laittevalmistaja määrittää kyseiselle etäisyydelle pallon säteen mittaamisen epävarmuudeksi  $\pm 26$  mikrometriä.

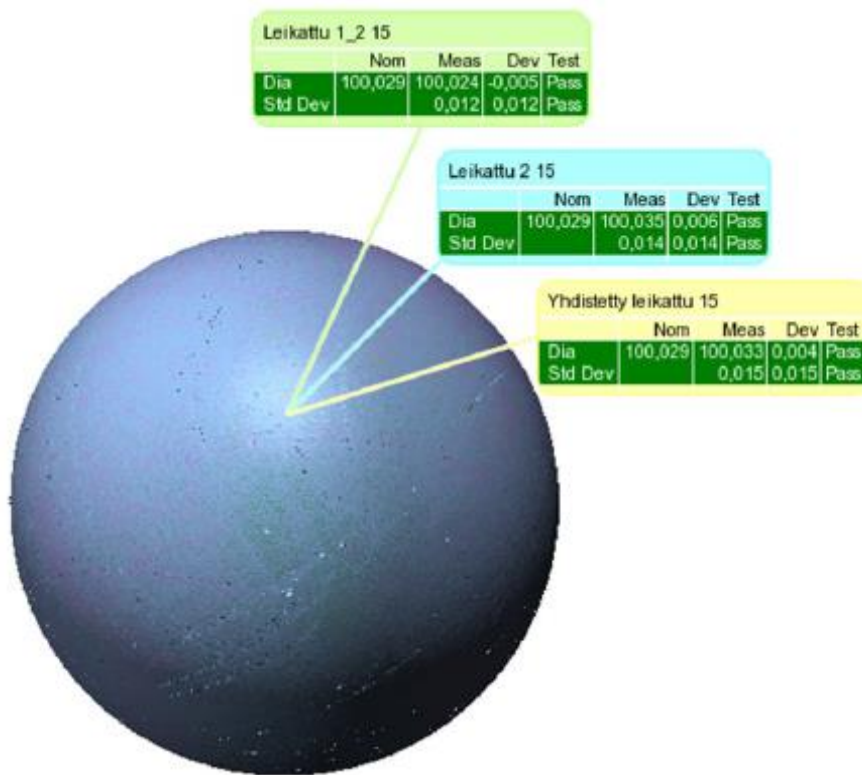


Kuva 40. Kalibrointipallon mittaus koskettavalla mittasensorilla

### 7.2.2 Käsilaserskanneri

Laserskannerilla mitatessa kalibrointipallon pinta skannataan ja siitä muodostetaan pistepilvi. Palloa tulisi skannata eri tartunnoilla (face), jolloin saadaan yhdistetty tarkkuus laserskannerille. Pistepilvestä tulee tarvittaessa poistaa kalibrointipallon varsi.

Kalibrointipallosta skannattiin kolme erillistä mittausta ja niiden välisiä eroja verrattiin toisiinsa nähden sekä referenssiin. Lisäksi kaksi skannausta sovitettiin (Kuva 41) yhteen ja niiden tulosta verrattiin referenssiin. Sovitettujen pallopintojen halkaisijan ero referenssipallon halkaisijaan vaihteli  $-0,005$  millimetristä  $+0,015$  millimetriin. Menetelmä soveltuu erittäin hyvin kenttäkalibrointiin.



Kuva 41. Kaksi skannausta ja niiden yhdistelmästä sovitetut pallopinnat

### 7.3 Kalibrointipala

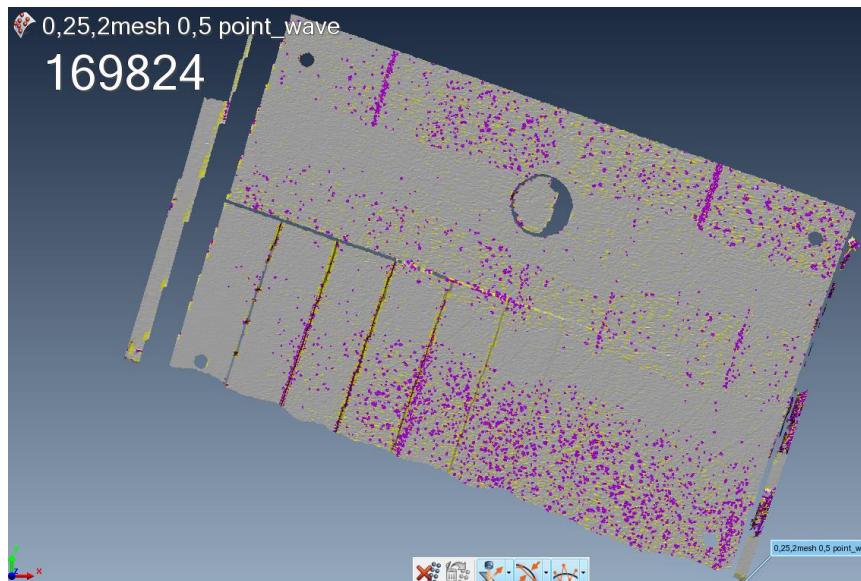
Kalibrointipalan vertailu tehtiin kahdella eri menetelmällä: laseskannaamalla ja koskettavalla mittasensorilla. Mittauksiin ja aineistojen vertailuihin käytettiin Polyworks-ohjelmistoa.

#### 7.3.1 Laserskannaus

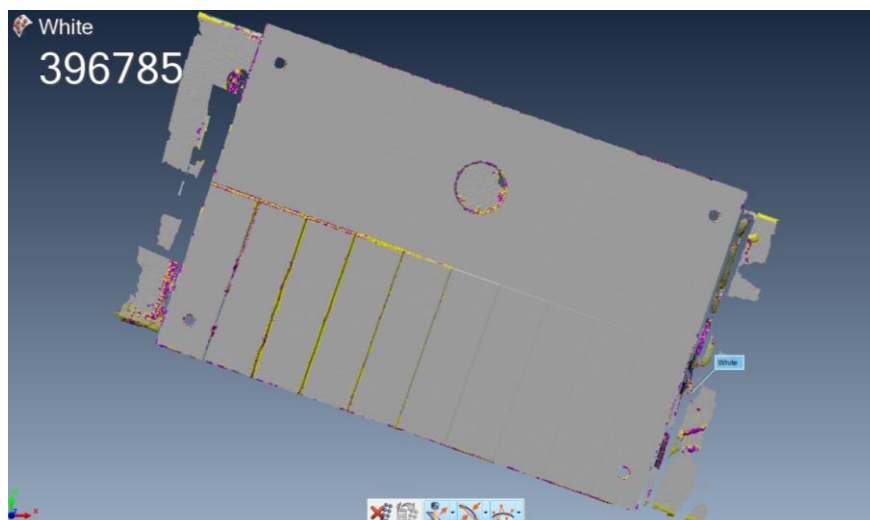
Kalibroinnin aluksi laserskannattiin kalibrointipalaa pinnoittamattomana ja kehitteellä pinnoitettuna. Tämä auttoi selvittämään kiiltävän pinnan vaikutuksen mittaustulokseen. Kappaleen pinnoittaminen kehitteellä saattaa kasvattaa pinnan paksuutta 0–0,1 millimetriä riippuen suihkutettavan kehitteen määrästä [5]. Toisaalta kiiltävästä pinnasta syntyy aineistoon kohinaa, joka heikentää pistepilven tarkkuutta. Polyworks-ohjelmaan on ohjelmoitu ominaisuus, jolla voi analysoida kiiltävän kappaleen pinnasta johtuvaa

kohinaa pistepilvessä. Kohina (Kuva 35 ja Kuva 42) ilmenee skannatun pinnan epätasaisuutena (vrt. appelsiinin kuori).

Kiiltävää kappaletta mitatessa lasersäteen kohina oli  $\pm 0,04$  millimetriä (Kuva 42). Pinnoittamalla kappaleen kohina saatiin minimoitua alle  $\pm 0,01$  millimetriin (Kuva 43). Kalibroinnissa käytettiin pinnoitettua pintaa. Vaikka pinnoitus kasvatti pinnan paksuutta, se jäi pienemmäksi kuin kohinasta syntyvä virhe.



Kuva 42. Kalibrointipalan pinnassa ilmenevä kohina ennen peittausta



Kuva 43. Kalibrointipalan skannattu pinta peittauksen jälkeen

Kehitteellä pinnoitetun pinnan vertailu aloitettiin laserskannaamalla kalibrintipala ja poistamalla pistepilvestä kappaleen reuna-alueet pois. Käsitellystä pistepilvestä rakennettiin kolmiopintamalli, joka sovitettiin referenssinä käytettyyn CAD-kuvaan. CAD-kuva ei kuvaa kappaleen todellista muotoa, mutta sitä voi käyttää kappaleen orientointiin ja vertailupisteiden ja tasojen luontiin.

Seuraavaksi kappaleeseen rakennettiin koordinaatisto samalla tavalla kuin se oli laboratoriokalibroinnissa tehty. Näin vertailupisteiden sijainnit ovat yhteneväisiä, ja tulokset ovat suoraan vertailukelpoisia.

Kappaleen kolmiomalliin määritettiin vertailupisteet. Ohjelma mittaa referenssitason ja kolmioverkon välistä etäisyyttä vertailupisteen kohdalla, ilmoittaen poikkeaman lukuarvona. Kenttäkalibroinnin ja laboratoriokalibroinnin tulosten ero vertailupisteiden kohdalla vaihteli maksimissaan  $\pm 0,04$  millimetriä. Liitteessä 3 on esitetty pistekohtaiset virheet sekä graafisesti että taulukkomuodossa. Muutaman pisteen kohdalla oli selvästi havaittavissa kappaleen pinnoituksesta johtuvaa paksuuden vaikutusta havaintoihin. Jätettäessä nämä pisteet huomioimatta ero referenssiin pienenee  $\pm 0,025$  millimetriin.

Tuloksen oikeellisuuteen vaikuttaa peittauksen paksuus ja vertailukoordinaatiston luomiseen käytettyjen pisteiden sijaintivirhe. Edellä mainitut seikat huomioon ottaen voidaan kalibrintipalaa käyttää käsilaserskannerin tarkkuuden tarkasteluun kenttäolosuhteissa.

### 7.3.2 Koskettava mittasensori

Koskettavalla mittasensorilla mitatessa peittausta ei tarvita. Kalibrintikappale mitattiin käyttäen mittakärkenä kuuden millimetrin rubiinipalloa. Mittausmetodina käytettiin jatkuvaa mittausta (continuous time), jolloin sensori tallentaa jatkuvasti määrätyin väliajoin mittapisteitä. Koko kappale mitattiin kuljettaen kärkeä pintaa pitkin, keskeyttäen mittaus siirryttäessä pinnalta toiselle. Mitattu aineisto kattoi suurimman osan vertailupisteistä.

Mittausaineisto sidottiin laserskannausaineiston tavoin kappaleen koordinaatistoon (luku 7.3.1). Mittasensorilla mitattujen pisteiden ero referenssiin oli 00-tason (liite 4, sivu 1) kohdalla maksimissaan  $\pm 0,019$  millimetriä. Portaiden (liite 4, sivu 1) osalla ero oli maksimissaan  $\pm 0,03$  millimetriä. Osa mitatuista portaiden mittapisteistä ei osunut

samoihin kohtiin referenssin vertailupisteiden kanssa, joten vertailu näiden osalta on puutteellinen, mikä johtaa tuloksen osittaiseen vääristymiseen. Mitatun aineiston vertailu on esitetty graafisesti ja taulukkomuodossa liitteellä 4.

## 8 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutustua laserseurainjärjestelmässä ilmeneviin virheisiin sekä niiden testaus- ja tarkastusmenetelmiin. Lisäksi tutkittiin erilaisia kenttäkalibroitimenetelmiä.

Kenttätestien ja määritysten osalta sain hyvän kokonaiskuvan niiden sisällöistä ja käytettävistä menetelmistä. Työtä tehdessä jouduin syventymään myös laserseurainjärjestelmän tekniikkaan rautatasolla. Vastausten saaminen teknisiin kysymyksiin laitevalmistajan taholta osoittautui välillä haastavaksi.

Testissä ja määrittämisessä voidaan käyttää samoja pisteitä. Jos koko järjestelmä (3D+6DOF) joudutaan testaamaan ja määrittämään, suosittelen tähyspaikkojen etukäteistä merkitsemistä. Tämä helpottaa ja nopeuttaa työtä huomattavasti. Lisäksi tulee huomioida tarvittava tilan tarve.

Kaikki tutkitut menetelmät soveltuvat hyvin kenttäkalibrointiin. Insinööriyön yhteydessä tehtyyn kalibrointipalan vertailutyöhön voidaan tulevaisuudessa liittää uusia mittauksia, ja näin ne ovat nopeasti vertailtavissa, kun referenssitiedosto on jo valmiiksi luotu. Referenssitiedostoa tulee muuttaa kun kalibrointipala uudelleen kalibroidaan laboratoriossa.

Työtä voi jatkaa tutkimalla erilaisten kappaleiden soveltuvuutta kenttäkalibrointiin. Teetätetty kalibrointipala ei ole optimaalinen käsilaserskannerin kanssa käytettäessä sen pinnassa esiintyvän kiillon vuoksi.

Tämä insinööriyö toimii eräänlaisena ohjekirjana ja sisällysluettelona Inspecta Tarkastus Oy:n käytössä olevalle laserseuraimelle. Työtä voi soveltaa myös muihin laserseurainjärjestelmiin.

## **9 Jälkisanat**

Kiitokset insinööriyöhön myötävaikuttaneille henkilöille; Lasse Tuuralalle, Tuomas Hietaselle, Ville Jussilalle, Vahur Joalalle, Inge Svenningsonille sekä ohjaavalle opettajalle Vesa Ropelle. Kiitos kuuluu myös kotijoukoille.



## Lähteet

- 1 Tietoa Inspectasta. 2014. Verkkodokumentti.  
<<http://www.inspecta.com/fi/Tietoa-Inspectasta/>> Luettu 20.3.2014
- 2 Olsson, Per Uno. Hexagon Metrology. 2004. LTD800. Powerpoint-esitys
- 3 Tuurala, Lasse. TMK Teollisuuden Mittaus- ja Kalibrintipalvelu Oy. Keskustelut 2012–2014
- 4 Joala, Vahur. Leica Geosystems. Keskustelut 2014
- 5 Suter, Niklaus. Hexagon Metrology. Keskustelu 8.4.2014
- 6 Riemensperger, Martin. Gottwald, Reinhard. Leica Aarau Ltd.1990. KERN SMART 310 – Leica ag’s Approach to High Precision Dynamic 3D Coordinate Determination. Verkkodokumentti.  
<<http://www.slac.stanford.edu/econf/C9009106/papers/012.PDF>> Luettu 23.3.2014
- 7 Leica Laser Tracker HW Guide. Leica Geosystems. 8.2005
- 8 emScon Training manual v3.0. Leica Geosystems. 5.2008
- 9 emScon v3.5 reference manual. Leica Geosystems. 10.2009
- 10 Leica Axyz Dictionary of 3D Metrology. Leica Geosystems. 12.1999
- 11 Kyle, Stephen. Robson, Stuart. Chapman, David. Cross, Paul. Oldfield, Simon. Iliffe, Jon. 2001. Best Practice for non-contacting CMMs. UCL.
- 12 Leica T-Scan Collect 9.0 Reference manual. Leica Geosystems. 2011
- 13 Leica T-Scan User manual 2.0. Leica Geosystems. 2009
- 14 Leica T-Scan HW Guide. Leica Geosystems. 2005
- 15 Leica T-Probe II HW Guide. Leica Geosystems. 2005
- 16 Leica T-Cam HW Guide. Leica Geosystems. 8.2005
- 17 Nivel230 Datasheet. Leica Geosystems. 3.2006

- 18 Leica Geosystems Metrology Products Catalog v1.1. 2013. Verkkodokumentti.  
<[http://metrology.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20Geosystems%20Metrology%20Products\\_catalog\\_en.pdf](http://metrology.leica-geosystems.com/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20Geosystems%20Metrology%20Products_catalog_en.pdf)> Luettu 1.3.2014
- 19 Innovmetric Corporate procedure. 2013. Verkkodokumentti.  
<[http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/pdf/brochures/InnovMetric\\_Corpo\\_Brochure.pdf](http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/pdf/brochures/InnovMetric_Corpo_Brochure.pdf)>Luettu 1.3.2014
- 20 Polyworks Reference Guide V2014. Innovmetric. 4.2014
- 21 Leica Geosystems, kuvapankki.

## 3D-määrittelyn tulokset



### Compensation 3D

#### Full Compensation Result for Tracker

##### Configuration

Tracker:	1142	Tracker type:	LTD800
Reflector:	CCR_7072		
Tracker compensation:	Aug 23 2011 12:16		
Start date:	Mar 17 2014 17:57	End date:	Mar 17 2014 20:42
Length/angle unit:	mm, deg	Environmental units:	°C, mBar, %
User:	Expert	Comment:	NA
Error / Warnings:	The near - far measurement setup is not sufficient.		

##### Settings

###### Measurement Settings

Measurement time:	5000 ms
Ball bar radius:	550.000000 mm
Number of revolutions:	3
Number of points per revolution:	100

###### Tolerances

Ref. meas. ecc. factor:	1.0
Blunder:	5.0 %

##### Environment

	Min.	Max.
Temperature [°C]	21.0	21.7
Pressure [mBar]	991.2	993.9
Humidity [%]	26	26

##### Quality

Variance factor	0.085146 (Tot. 0.700000)
-----------------	--------------------------



Compensation 3D

Full Compensation Parameters

Parameter	Active	New	Deviation
Ix [mm]	-0.002441	-0.006406	-0.003965
Iy [mm]	0.014843	0.028035	0.013192
Ox [mm]	0.000000	0.000000	0.000000
Oy [mm]	0.000000	0.000000	0.000000
E [mm]	0.002933	0.003842	0.000908
I [deg]	-0.002327	-0.002222	0.000105
F [mm]	-0.008347	-0.013240	-0.004892
C [deg]	-0.000237	-0.000573	-0.000338
J [deg]	-0.000877	-0.001057	-0.000180
Ex [mm]	-0.000953	-0.000032	0.000921
Ey [mm]	-0.002554	-0.002035	0.000520
Kx [mm]	0.000000	0.000000	0.000000
Ky [mm]	0.005214	-0.002942	-0.008158
O2x [mm]	0.001104	0.001181	0.000077
O2y [mm]	-0.004373	-0.005993	-0.001620



Compensation 3D

Two Face Measurements

ID	H [deg]	V [deg]	D [mm]	H error [deg]	V error [deg]
TF_NearFar_1	-181.459945	90.193099	580.478703	0.000084 (Tol: 0.003490)	0.000551 (Tol: 0.003490)
TF_NearFar_2	-2.448289	89.931235	339.282927	-0.000080 (Tol: 0.005971)	-0.000115 (Tol: 0.005971)
TF_NearFar_3	-0.585449	89.959384	10191.929585	-0.000315 (Tol: 0.000810)	-0.000090 (Tol: 0.000810)
TF_Horizontal_1	-81.574558	89.807373	1824.907755	-0.000012 (Tol: 0.001110)	-0.000152 (Tol: 0.001110)
TF_Horizontal_10	138.999772	90.205107	2050.088789	0.000023 (Tol: 0.000988)	-0.000275 (Tol: 0.000988)
TF_Horizontal_11	180.584994	90.128894	2048.795367	0.000011 (Tol: 0.000989)	-0.000197 (Tol: 0.000989)
TF_Horizontal_12	183.198394	90.085757	2010.789983	-0.000388 (Tol: 0.001007)	-0.000147 (Tol: 0.001007)
TF_Horizontal_13	-154.470904	90.073588	1970.398779	0.000215 (Tol: 0.001028)	0.000758 (Tol: 0.001028)
TF_Horizontal_14	-131.017874	90.128983	1898.549979	0.000159 (Tol: 0.001087)	-0.000051 (Tol: 0.001087)
TF_Horizontal_15	-108.804882	90.186288	1955.470327	-0.000038 (Tol: 0.001038)	0.000477 (Tol: 0.001038)
TF_Horizontal_16	-85.013898	90.158382	1993.143898	-0.000009 (Tol: 0.001018)	0.000158 (Tol: 0.001018)
TF_Horizontal_2	-40.848514	90.023948	1984.039893	-0.000001 (Tol: 0.001021)	0.000000 (Tol: 0.001021)
TF_Horizontal_3	-17.123354	89.988788	1957.178400	-0.000078 (Tol: 0.001035)	0.000002 (Tol: 0.001035)
TF_Horizontal_4	4.580007	89.958884	2021.882485	0.000285 (Tol: 0.001002)	0.000310 (Tol: 0.001002)
TF_Horizontal_5	27.890885	89.975801	2018.737594	0.000479 (Tol: 0.001003)	0.000178 (Tol: 0.001003)
TF_Horizontal_6	50.098882	90.012795	2049.906585	0.000287 (Tol: 0.000988)	-0.000180 (Tol: 0.000988)
TF_Horizontal_7	71.381990	90.101873	2021.445497	-0.000039 (Tol: 0.001002)	0.000311 (Tol: 0.001002)
TF_Horizontal_8	93.282389	90.198171	1940.724540	0.000014 (Tol: 0.001044)	-0.000003 (Tol: 0.001044)
TF_Horizontal_9	117.552833	90.287824	2028.339827	-0.000031 (Tol: 0.000999)	-0.000417 (Tol: 0.000999)
TF_Vertical_1	-90.519173	131.119318	1875.880277	0.000120 (Tol: 0.001080)	0.000093 (Tol: 0.001080)
TF_Vertical_2	-90.587804	120.810482	1845.380815	0.000078 (Tol: 0.001231)	-0.000134 (Tol: 0.001231)
TF_Vertical_3	-90.580345	110.538734	1508.845284	-0.000149 (Tol: 0.001343)	-0.000172 (Tol: 0.001343)
TF_Vertical_4	-90.498849	100.040127	1434.807201	-0.000008 (Tol: 0.001412)	0.000089 (Tol: 0.001412)
TF_Vertical_5	-90.124737	89.855082	1412.728344	-0.000133 (Tol: 0.001434)	-0.000121 (Tol: 0.001434)
TF_Vertical_6	-90.815810	79.125709	1439.071540	0.000081 (Tol: 0.001408)	-0.000231 (Tol: 0.001408)
TF_Vertical_7	-90.813824	68.802890	1513.251300	-0.000054 (Tol: 0.001339)	-0.000043 (Tol: 0.001339)
TF_Vertical_8	-90.358854	58.470048	1855.845224	0.000184 (Tol: 0.001223)	-0.000015 (Tol: 0.001223)
TF_Vertical_9	-90.377278	48.803354	1852.785431	0.000048 (Tol: 0.001093)	-0.000020 (Tol: 0.001093)

Ball Bar Measurements

ID	Face	Distance [mm]	Radius [mm]	RMS radial [mm]	RMS planar [mm]
BB_Near_1	I	944.525257	549.390887	0.003203 (Tol: 0.018789)	0.002127 (Tol: 0.008386)
BB_Near_2	I	979.443095	549.390101	0.002030 (Tol: 0.018802)	0.001745 (Tol: 0.008404)
BB_Near_3	II	978.838786	549.385476	0.002743 (Tol: 0.018801)	0.002020 (Tol: 0.008401)
BB_Near_4	II	937.000992	549.390888	0.002891 (Tol: 0.018788)	0.002180 (Tol: 0.008358)
BB_Far_1	I	2977.822832	549.403288	0.005405 (Tol: 0.023144)	0.001808 (Tol: 0.008785)
BB_Far_2	I	3075.411413	549.398884	0.008891 (Tol: 0.023818)	0.001892 (Tol: 0.008905)
BB_Far_3	II	2995.758989	549.409158	0.007477 (Tol: 0.023288)	0.001913 (Tol: 0.008807)
BB_Far_4	II	2969.778885	549.412847	0.009755 (Tol: 0.023088)	0.002224 (Tol: 0.008775)



Inspecta Tarkastus Oy  
Kalibrointilaboratorio  
Hitsaajantie 2, 26820 Rauma

Matti Savolaisen testilevy  
26.08.2013  
Kari Rintala

Inspecta Tarkastus Oy, Matti Savolaisen testilevy

0,00-pinnan tasomaisuus

Tasomaisuus mitattu viidellä mittausinjalla

E-linja on 10 mm oikeasta reunasta ja A-linja 10 mm levyn keskeltä

Piste E0 on siis levyn oikeassa yläreunassa 10 mm reunolsta

Kirjainlinjojen etäisyys toisistaan on 20 mm

Jokaisella kirjaininjalla tulokset otettu 20 mm välein

Mittaus tulokset  $\mu\text{m:nä}$

	A	B	C	D	E
0	0	-3	-2	-3	0
20	-7	-11	-13	-13	-11
40	-16	-19	-22	-23	-23
60	-23	-26	-30	-32	-32
80	-30	-35	-38	-39	-41
100	-36	-40	-44	-46	-47
120	-39	-43	-47	-50	-51
140	-42	-46	reiä	-52	-51
160	-42	-45	-49	-50	-49
180	-41	-44	-46	-45	-46
200	-36	-39	-42	-40	-38
220	-31	-32	-34	-32	-27
240	-24	-25	-26	-23	-18
260	-13	-16	-16	-15	-8
280	-4	-9	-7	-7	0

Tasomaisuus 52  $\mu\text{m}$

Kalibrointivälineet

- Kivitaso Planolith 1167 nro 14

- Korkeudenmittauskone Trimos TVA-600 nro 11125 kirjall TVA-1/TVA-7

- Mittapalasarja Mitutoyo NO.516-938 nro 244566

Lämpötila:  $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$

Mittausepävarmuus:  $\pm 7 \mu\text{m}$ ;  $k = 2$

Inspecta Tarkastus Oy  
Kalibrointilaboratorio  
Hitsaajantie 2, 26820 Rauma

Matti Savolaisen testilievä  
26.08.2013  
Kari Rintala

Inspecta Tarkastus Oy, Matti Savolaisen testilievä

Portaiden tulokset on mitattu ed. tasomaisuustaulukon kolmen nurkkatuloksen ollessa 0 µm  
Mittauslinjat 5 mm portaan reunoista sekä keskeltä  
AD-piste on 10 mm leivyn vasemmasta reunasta  
Jokaisella kirjainlinjalla tulokset otettu 20 mm välein

Mittaustulokset mm:nä

Portaan 5,00 mitaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	
0	5,045	5,022	5,009	4,999	4,990	Minimi	4,988
10	5,041	5,021	5,009	4,997	4,989	Maksimi	5,045
20	5,037	5,021	5,007	4,996	4,988	Valiteltu	0,057

Portaan 3,00 mitaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	
0	3,031	3,014	2,999	2,990	2,983	Minimi	2,978
10	3,026	3,011	2,999	2,987	2,980	Maksimi	3,031
20	3,024	3,008	2,997	2,986	2,978	Valiteltu	0,053

Portaan 2,00 mitaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	
0	2,015	2,000	1,989	1,979	1,972	Minimi	1,969
10	2,011	1,999	1,987	1,976	1,970	Maksimi	2,015
20	2,009	1,997	1,986	1,978	1,969	Valiteltu	0,048

Portaan 1,00 mitaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	
0	1,004	0,991	0,979	0,970	0,963	Minimi	0,961
10	1,002	0,990	0,978	0,969	0,962	Maksimi	1,004
20	1,000	0,989	0,978	0,968	0,961	Valiteltu	0,043

Portaan 0,50 mitaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	
0	0,497	0,485	0,476	0,467	0,459	Minimi	0,457
10	0,498	0,485	0,475	0,465	0,459	Maksimi	0,498
20	0,497	0,485	0,475	0,465	0,457	Valiteltu	0,041

Portaan 0,20 mitaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	
0	0,213	0,197	0,185	0,175	0,167	Minimi	0,166
10	0,213	0,198	0,186	0,174	0,166	Maksimi	0,216
20	0,216	0,200	0,187	0,176	0,168	Valiteltu	0,050

Portaan 0,12 mitaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	
0	0,133	0,114	0,102	0,090	0,082	Minimi	0,082
10	0,136	0,117	0,105	0,093	0,085	Maksimi	0,140
20	0,140	0,123	0,108	0,096	0,088	Valiteltu	0,058



Inspecta Tarkastus Oy  
Kalibrointilaboratorio  
Hittsajantie 2, 26820 Rauma

Matti Savolaisen testilevy  
26.08.2013  
Kari Rintala

Inspecta Tarkastus Oy, Matti Savolaisen testilevy

Portaan 0,08 mittaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	0,072
0	0,100	0,078	0,065	0,053	0,045	Minimi	0,045
10	0,102	0,084	0,069	0,056	0,048	Maksimi	0,107
20	0,107	0,089	0,072	0,060	0,051	Vaihtelu	0,062

Portaan 0,05 mittaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	0,053
0	0,082	0,062	0,046	0,031	0,024	Minimi	0,024
10	0,087	0,065	0,051	0,036	0,027	Maksimi	0,091
20	0,091	0,069	0,056	0,041	0,030	Vaihtelu	0,067

Portaan 0,02 mittaustulokset mm:nä							
	A	B	C	D	E	Keskiarvo	0,040
0	0,074	0,050	0,032	0,016	0,006	Minimi	0,006
10	0,078	0,054	0,036	0,021	0,011	Maksimi	0,084
20	0,084	0,060	0,039	0,024	0,015	Vaihtelu	0,078

Kalibrointivälineet

- Kivitaso Planolith 1167 nro 14
- Korkeudenmittauskone Trimos TVA-600 nro 11125 kärkeä TVA-1/TVA-7
- Mittapalasarja Mitutoyo NO.516-938 nro 244566

Lämpötila: (20 ± 0,5) °C

Mittausepätavuus: ±10 µm; k = 2

### Kalibrointipalan vertailu käsilaserskannerilla

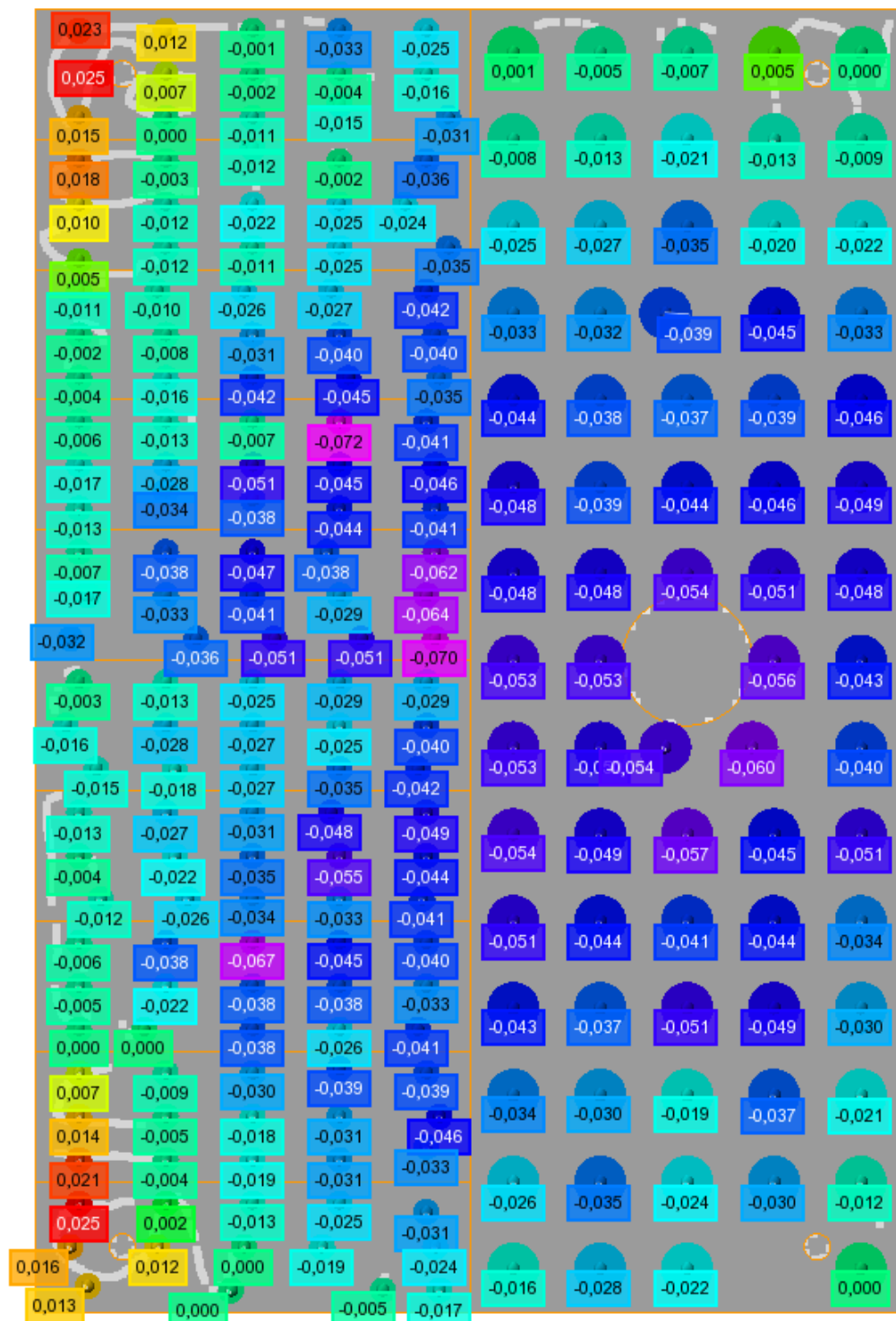


Comparison Point Table							
Units	Millimeters						
Coordinate System	coord sys 3						
Data Alignments	plane, axis, center point 1						
Linked Objects	kalbriointiacad.igs						
Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
0A	Surface Distance		-0,000	+0,600/-0,111	0,000	Pass	
0B	Surface Distance		0,004	+0,600/-0,111	0,004	Pass	
0C	Surface Distance		-0,002	+0,600/-0,111	-0,002	Pass	
0D	Surface Distance		-0,004	+0,600/-0,111	-0,004	Pass	
0E	Surface Distance		-0,000	+0,600/-0,111	0,000	Pass	
20A	Surface Distance		0,008	+0,600/-0,111	0,008	Pass	
20B	Surface Distance		-0,008	+0,600/-0,111	-0,008	Pass	
20C	Surface Distance		-0,018	+0,600/-0,111	-0,018	Pass	
20D	Surface Distance		-0,017	+0,600/-0,111	-0,017	Pass	
20E	Surface Distance		-0,022	+0,600/-0,111	-0,022	Pass	
40A	Surface Distance		-0,006	+0,600/-0,111	-0,006	Pass	
40B	Surface Distance		-0,021	+0,600/-0,111	-0,021	Pass	
40C	Surface Distance		-0,021	+0,600/-0,111	-0,021	Pass	
40D	Surface Distance		-0,025	+0,600/-0,111	-0,025	Pass	
40E	Surface Distance		-0,044	+0,600/-0,111	-0,044	Pass	
60A	Surface Distance		-0,016	+0,600/-0,111	-0,016	Pass	
60B	Surface Distance		-0,025	+0,600/-0,111	-0,025	Pass	
60C	Surface Distance		-0,039	+0,600/-0,111	-0,039	Pass	
60D	Surface Distance		-0,040	+0,600/-0,111	-0,040	Pass	
60E	Surface Distance		-0,039	+0,600/-0,111	-0,039	Pass	
80A	Surface Distance		-0,020	+0,600/-0,111	-0,020	Pass	
80B	Surface Distance		-0,040	+0,600/-0,111	-0,040	Pass	
80C	Surface Distance		-0,075	+0,600/-0,111	-0,075	Pass	
80D	Surface Distance		-0,062	+0,600/-0,111	-0,062	Pass	
80E	Surface Distance		-0,058	+0,600/-0,111	-0,058	Pass	
100A	Surface Distance		-0,019	+0,600/-0,111	-0,019	Pass	
100B	Surface Distance		-0,040	+0,600/-0,111	-0,040	Pass	
100C	Surface Distance		-0,061	+0,600/-0,111	-0,061	Pass	
100D	Surface Distance		-0,066	+0,600/-0,111	-0,066	Pass	
100E	Surface Distance		-0,065	+0,600/-0,111	-0,065	Pass	
120A	Surface Distance		-0,035	+0,600/-0,111	-0,035	Pass	
120B	Surface Distance		-0,051	+0,600/-0,111	-0,051	Pass	
120C	Surface Distance		-0,066	+0,600/-0,111	-0,066	Pass	
120D	Surface Distance		-0,070	+0,600/-0,111	-0,070	Pass	
120E	Surface Distance		-0,071	+0,600/-0,111	-0,071	Pass	
140A	Surface Distance		-0,038	+0,600/-0,111	-0,038	Pass	
140B	Surface Distance		-0,045	+0,600/-0,111	-0,045	Pass	
140D	Surface Distance		-0,062	+0,600/-0,111	-0,062	Pass	
140E	Surface Distance		-0,092	+0,600/-0,111	-0,092	Pass	
160A	Surface Distance		-0,044	+0,600/-0,111	-0,044	Pass	
160B	Surface Distance		-0,045	+0,600/-0,111	-0,045	Pass	
160C	Surface Distance		-0,049	+0,600/-0,111	-0,049	Pass	
160D	Surface Distance		-0,050	+0,600/-0,111	-0,050	Pass	
160E	Surface Distance		-0,064	+0,600/-0,111	-0,064	Pass	
180A	Surface Distance		-0,029	+0,600/-0,111	-0,029	Pass	
180B	Surface Distance		-0,035	+0,600/-0,111	-0,035	Pass	
180C	Surface Distance		-0,041	+0,600/-0,111	-0,041	Pass	
180D	Surface Distance		-0,049	+0,600/-0,111	-0,049	Pass	
180E	Surface Distance		-0,045	+0,600/-0,111	-0,045	Pass	
200A	Surface Distance		-0,014	+0,600/-0,111	-0,014	Pass	
200B	Surface Distance		-0,041	+0,600/-0,111	-0,041	Pass	
200C	Surface Distance		-0,026	+0,600/-0,111	-0,026	Pass	
200D	Surface Distance		-0,041	+0,600/-0,111	-0,041	Pass	
200E	Surface Distance		-0,034	+0,600/-0,111	-0,034	Pass	
220A	Surface Distance		-0,032	+0,600/-0,111	-0,032	Pass	
220B	Surface Distance		-0,013	+0,600/-0,111	-0,013	Pass	
220C	Surface Distance		-0,026	+0,600/-0,111	-0,026	Pass	
220D	Surface Distance		-0,039	+0,600/-0,111	-0,039	Pass	
220E	Surface Distance		-0,031	+0,600/-0,111	-0,031	Pass	
240A	Surface Distance		0,005	+0,600/-0,111	0,005	Pass	
240B	Surface Distance		-0,012	+0,600/-0,111	-0,012	Pass	
240C	Surface Distance		-0,013	+0,600/-0,111	-0,013	Pass	
240D	Surface Distance		-0,021	+0,600/-0,111	-0,021	Pass	
240E	Surface Distance		-0,023	+0,600/-0,111	-0,023	Pass	
260A	Surface Distance		0,007	+0,600/-0,111	0,007	Pass	
260B	Surface Distance		0,002	+0,600/-0,111	0,002	Pass	
260C	Surface Distance		-0,011	+0,600/-0,111	-0,011	Pass	
260D	Surface Distance		-0,012	+0,600/-0,111	-0,012	Pass	
260E	Surface Distance		-0,021	+0,600/-0,111	-0,021	Pass	
280A	Surface Distance		0,038	+0,600/-0,111	0,038	Pass	
280B	Surface Distance		0,012	+0,600/-0,111	0,012	Pass	
280C	Surface Distance		0,008	+0,600/-0,111	0,008	Pass	
280D	Surface Distance		0,005	+0,600/-0,111	0,005	Pass	
280E	Surface Distance		0,000	+0,600/-0,111	0,000	Pass	

Comparison Point Table							
Units	Millimeters						
Coordinate System	coord sys 3						
Data Alignments	plane, axis, center point 1						
Linked Objects	kalibrointiacad.igs						
Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
5B	Surface Distance		0,071	+0,146/-0,103	0,071	Pass	
5C	Surface Distance		0,045	+0,146/-0,103	0,045	Pass	
5D	Surface Distance		0,026	+0,146/-0,103	0,026	Pass	
5E	Surface Distance		0,016	+0,146/-0,103	0,016	Pass	
5A (2)	Surface Distance		0,070	+0,146/-0,103	0,070	Pass	
5B (2)	Surface Distance		0,067	+0,146/-0,103	0,067	Pass	
5C (2)	Surface Distance		0,041	+0,146/-0,103	0,041	Pass	
5D (2)	Surface Distance		0,026	+0,146/-0,103	0,026	Pass	
5E (2)	Surface Distance		0,008	+0,146/-0,103	0,008	Pass	
5A (3)	Surface Distance		0,073	+0,146/-0,103	0,073	Pass	
5B (3)	Surface Distance		0,070	+0,146/-0,103	0,070	Pass	
5C (3)	Surface Distance		0,042	+0,146/-0,103	0,042	Pass	
5D (3)	Surface Distance		0,024	+0,146/-0,103	0,024	Pass	
5E (3)	Surface Distance		0,012	+0,146/-0,103	0,012	Pass	
3A	Surface Distance		0,064	+0,146/-0,103	0,064	Pass	
3B	Surface Distance		0,055	+0,146/-0,103	0,055	Pass	
3C	Surface Distance		0,038	+0,146/-0,103	0,038	Pass	
3D	Surface Distance		0,018	+0,146/-0,103	0,018	Pass	
3E	Surface Distance		0,003	+0,146/-0,103	0,003	Pass	
3A (2)	Surface Distance		0,072	+0,146/-0,103	0,072	Pass	
3B (2)	Surface Distance		0,070	+0,146/-0,103	0,070	Pass	
3C (2)	Surface Distance		0,025	+0,146/-0,103	0,025	Pass	
3D (2)	Surface Distance		0,022	+0,146/-0,103	0,022	Pass	
3E (2)	Surface Distance		0,005	+0,146/-0,103	0,005	Pass	
3A (3)	Surface Distance		0,072	+0,146/-0,103	0,072	Pass	
3B (3)	Surface Distance		0,051	+0,146/-0,103	0,051	Pass	
3C (3)	Surface Distance		0,030	+0,146/-0,103	0,030	Pass	
3D (3)	Surface Distance		0,017	+0,146/-0,103	0,017	Pass	
3E (3)	Surface Distance		0,012	+0,146/-0,103	0,012	Pass	
2A	Surface Distance		0,031	+0,146/-0,103	0,031	Pass	
2B	Surface Distance		0,041	+0,146/-0,103	0,041	Pass	
2C	Surface Distance		0,021	+0,146/-0,103	0,021	Pass	
2D	Surface Distance		-0,000	+0,146/-0,103	0,000	Pass	
2E	Surface Distance		-0,018	+0,146/-0,103	-0,018	Pass	
2A (2)	Surface Distance		0,069	+0,146/-0,103	0,069	Pass	
2B (2)	Surface Distance		0,034	+0,146/-0,103	0,034	Pass	
2C (2)	Surface Distance		0,028	+0,146/-0,103	0,028	Pass	
2D (2)	Surface Distance		0,003	+0,146/-0,103	0,003	Pass	
2E (2)	Surface Distance		-0,016	+0,146/-0,103	-0,016	Pass	
2A (3)	Surface Distance		0,061	+0,146/-0,103	0,061	Pass	
2B (3)	Surface Distance		0,032	+0,146/-0,103	0,032	Pass	
2C (3)	Surface Distance		0,021	+0,146/-0,103	0,021	Pass	
2D (3)	Surface Distance		0,005	+0,146/-0,103	0,005	Pass	
2E (3)	Surface Distance		-0,006	+0,146/-0,103	-0,006	Pass	
1A	Surface Distance		0,055	+0,146/-0,103	0,055	Pass	
1B	Surface Distance		0,031	+0,146/-0,103	0,031	Pass	
1C	Surface Distance		0,016	+0,146/-0,103	0,016	Pass	
1D	Surface Distance		0,006	+0,146/-0,103	0,006	Pass	
1E	Surface Distance		-0,004	+0,146/-0,103	-0,004	Pass	
1A (2)	Surface Distance		0,062	+0,146/-0,103	0,062	Pass	
1B (2)	Surface Distance		0,032	+0,146/-0,103	0,032	Pass	
1C (2)	Surface Distance		0,018	+0,146/-0,103	0,018	Pass	
1D (2)	Surface Distance		-0,017	+0,146/-0,103	-0,017	Pass	
1E (2)	Surface Distance		-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass	
1A (3)	Surface Distance		0,068	+0,146/-0,103	0,068	Pass	
1B (3)	Surface Distance		0,038	+0,146/-0,103	0,038	Pass	
1C (3)	Surface Distance		0,009	+0,146/-0,103	0,009	Pass	
1D (3)	Surface Distance		-0,012	+0,146/-0,103	-0,012	Pass	
1E (3)	Surface Distance		-0,015	+0,146/-0,103	-0,015	Pass	
0.5A	Surface Distance		0,059	+0,146/-0,103	0,059	Pass	
0.5B	Surface Distance		0,024	+0,146/-0,103	0,024	Pass	
0.5C	Surface Distance		0,018	+0,146/-0,103	0,018	Pass	
0.5D	Surface Distance		-0,009	+0,146/-0,103	-0,009	Pass	
0.5E	Surface Distance		-0,022	+0,146/-0,103	-0,022	Pass	

0.5A (2)	Surface Distance	0,049	+0,146/-0,103	0,049	Pass
0.5B (2)	Surface Distance	0,028	+0,146/-0,103	0,028	Pass
0.5C (2)	Surface Distance	0,014	+0,146/-0,103	0,014	Pass
0.5D (2)	Surface Distance	-0,010	+0,146/-0,103	-0,010	Pass
0.5E (2)	Surface Distance	-0,024	+0,146/-0,103	-0,024	Pass
0.5A (3)	Surface Distance	0,057	+0,146/-0,103	0,057	Pass
0.5B (3)	Surface Distance	0,033	+0,146/-0,103	0,033	Pass
0.5C (3)	Surface Distance	0,021	+0,146/-0,103	0,021	Pass
0.5D (3)	Surface Distance	0,007	+0,146/-0,103	0,007	Pass
0.5E (3)	Surface Distance	-0,023	+0,146/-0,103	-0,023	Pass
0.2A	Surface Distance	0,065	+0,146/-0,103	0,065	Pass
0.2B	Surface Distance	0,038	+0,146/-0,103	0,038	Pass
0.2C	Surface Distance	0,004	+0,146/-0,103	0,004	Pass
0.2D	Surface Distance	0,009	+0,146/-0,103	0,009	Pass
0.2E	Surface Distance	-0,004	+0,146/-0,103	-0,004	Pass
0.2A (2)	Surface Distance	0,051	+0,146/-0,103	0,051	Pass
0.2B (2)	Surface Distance	0,023	+0,146/-0,103	0,023	Pass
0.2C (2)	Surface Distance	-0,001	+0,146/-0,103	-0,001	Pass
0.2D (2)	Surface Distance	0,005	+0,146/-0,103	0,005	Pass
0.2E (2)	Surface Distance	-0,012	+0,146/-0,103	-0,012	Pass
0.2A (3)	Surface Distance	0,063	+0,146/-0,103	0,063	Pass
0.2B (3)	Surface Distance	0,040	+0,146/-0,103	0,040	Pass
0.2C (3)	Surface Distance	0,009	+0,146/-0,103	0,009	Pass
0.2D (3)	Surface Distance	-0,002	+0,146/-0,103	-0,002	Pass
0.2E (3)	Surface Distance	0,000	+0,146/-0,103	0,000	Pass
0.12A	Surface Distance	0,062	+0,146/-0,103	0,062	Pass
0.12B	Surface Distance	0,038	+0,146/-0,103	0,038	Pass
0.12C	Surface Distance	-0,003	+0,146/-0,103	-0,003	Pass
0.12D	Surface Distance	-0,014	+0,146/-0,103	-0,014	Pass
0.12E	Surface Distance	-0,023	+0,146/-0,103	-0,023	Pass
0.12A (2)	Surface Distance	0,078	+0,146/-0,103	0,078	Pass
0.12B (2)	Surface Distance	0,045	+0,146/-0,103	0,045	Pass
0.12C (2)	Surface Distance	0,014	+0,146/-0,103	0,014	Pass
0.12D (2)	Surface Distance	-0,008	+0,146/-0,103	-0,008	Pass
0.12E (2)	Surface Distance	-0,006	+0,146/-0,103	-0,006	Pass
0.12A (3)	Surface Distance	0,073	+0,146/-0,103	0,073	Pass
0.12B (3)	Surface Distance	0,037	+0,146/-0,103	0,037	Pass
0.12C (3)	Surface Distance	0,037	+0,146/-0,103	0,037	Pass
0.12D (3)	Surface Distance	0,001	+0,146/-0,103	0,001	Pass
0.12E (3)	Surface Distance	-0,002	+0,146/-0,103	-0,002	Pass
0.08A	Surface Distance	0,068	+0,146/-0,103	0,068	Pass
0.08B	Surface Distance	0,046	+0,146/-0,103	0,046	Pass
0.08C	Surface Distance	0,027	+0,146/-0,103	0,027	Pass
0.08D	Surface Distance	0,002	+0,146/-0,103	0,002	Pass
0.08E	Surface Distance	-0,005	+0,146/-0,103	-0,005	Pass
0.08A (2)	Surface Distance	0,063	+0,146/-0,103	0,063	Pass
0.08B (2)	Surface Distance	0,028	+0,146/-0,103	0,028	Pass
0.08C (2)	Surface Distance	0,012	+0,146/-0,103	0,012	Pass
0.08D (2)	Surface Distance	0,005	+0,146/-0,103	0,005	Pass
0.08E (2)	Surface Distance	-0,002	+0,146/-0,103	-0,002	Pass
0.08A (3)	Surface Distance	0,067	+0,146/-0,103	0,067	Pass
0.08B (3)	Surface Distance	0,037	+0,146/-0,103	0,037	Pass
0.08C (3)	Surface Distance	0,021	+0,146/-0,103	0,021	Pass
0.08D (3)	Surface Distance	0,006	+0,146/-0,103	0,006	Pass
0.08E (3)	Surface Distance	-0,010	+0,146/-0,103	-0,010	Pass
0.05A	Surface Distance	0,080	+0,146/-0,103	0,080	Pass
0.05B	Surface Distance	0,057	+0,146/-0,103	0,057	Pass
0.05C	Surface Distance	0,027	+0,146/-0,103	0,027	Pass
0.05D	Surface Distance	0,010	+0,146/-0,103	0,010	Pass
0.05E	Surface Distance	0,005	+0,146/-0,103	0,005	Pass
0.05A (2)	Surface Distance	0,093	+0,146/-0,103	0,093	Pass
0.05B (2)	Surface Distance	0,048	+0,146/-0,103	0,048	Pass
0.05C (2)	Surface Distance	0,036	+0,146/-0,103	0,036	Pass
0.05D (2)	Surface Distance	0,021	+0,146/-0,103	0,021	Pass
0.05E (2)	Surface Distance	0,006	+0,146/-0,103	0,006	Pass
0.05A (3)	Surface Distance	0,102	+0,146/-0,103	0,102	Pass
0.05B (3)	Surface Distance	0,067	+0,146/-0,103	0,067	Pass
0.05C (3)	Surface Distance	0,041	+0,146/-0,103	0,041	Pass
0.05D (3)	Surface Distance	0,025	+0,146/-0,103	0,025	Pass
0.05E (3)	Surface Distance	0,021	+0,146/-0,103	0,021	Pass
0.02A	Surface Distance	0,095	+0,146/-0,103	0,095	Pass
0.02B	Surface Distance	0,073	+0,146/-0,103	0,073	Pass
0.02C	Surface Distance	0,044	+0,146/-0,103	0,044	Pass
0.02D	Surface Distance	0,028	+0,146/-0,103	0,028	Pass
0.02E	Surface Distance	0,015	+0,146/-0,103	0,015	Pass
0.02A (2)	Surface Distance	0,109	+0,146/-0,103	0,109	Pass
0.02B (2)	Surface Distance	0,079	+0,146/-0,103	0,079	Pass
0.02C (2)	Surface Distance	0,049	+0,146/-0,103	0,049	Pass
0.02D (2)	Surface Distance	0,028	+0,146/-0,103	0,028	Pass
0.02E (2)	Surface Distance	0,023	+0,146/-0,103	0,023	Pass
0.02A (3)	Surface Distance	0,107	+0,146/-0,103	0,107	Pass
0.02B (3)	Surface Distance	0,076	+0,146/-0,103	0,076	Pass
0.02C (3)	Surface Distance	0,058	+0,146/-0,103	0,058	Pass
0.02D (3)	Surface Distance	0,055	+0,146/-0,103	0,055	Pass
0.02E (3)	Surface Distance	0,032	+0,146/-0,103	0,032	Pass

### Kalibrointipalan vertailu koskettavalla mittasensorilla



Comparison Point Table							
Units	Millimeters						
Coordinate System	coord sys 3						
Data Alignments	plane, axis, center point 2						
Linked Objects	kalbrointiacad.igs						
Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
0A	Surface Distance		0,001	+0,600/-0,111	0,001	Pass	
0B	Surface Distance		-0,005	+0,600/-0,111	-0,005	Pass	
0C	Surface Distance		-0,007	+0,600/-0,111	-0,007	Pass	
0D	Surface Distance		0,005	+0,600/-0,111	0,005	Pass	
0E	Surface Distance		-0,000	+0,600/-0,111	0,000	Pass	
20A	Surface Distance		-0,008	+0,600/-0,111	-0,008	Pass	
20B	Surface Distance		-0,013	+0,600/-0,111	-0,013	Pass	
20C	Surface Distance		-0,021	+0,600/-0,111	-0,021	Pass	
20D	Surface Distance		-0,013	+0,600/-0,111	-0,013	Pass	
20E	Surface Distance		-0,009	+0,600/-0,111	-0,009	Pass	
40A	Surface Distance		-0,025	+0,600/-0,111	-0,025	Pass	
40B	Surface Distance		-0,027	+0,600/-0,111	-0,027	Pass	
40C	Surface Distance		-0,035	+0,600/-0,111	-0,035	Pass	
40D	Surface Distance		-0,020	+0,600/-0,111	-0,020	Pass	
40E	Surface Distance		-0,022	+0,600/-0,111	-0,022	Pass	
60A	Surface Distance		-0,033	+0,600/-0,111	-0,033	Pass	
60B	Surface Distance		-0,032	+0,600/-0,111	-0,032	Pass	
60C	Surface Distance		-0,039	+0,600/-0,111	-0,039	Pass	
60D	Surface Distance		-0,045	+0,600/-0,111	-0,045	Pass	
60E	Surface Distance		-0,033	+0,600/-0,111	-0,033	Pass	
80A	Surface Distance		-0,044	+0,600/-0,111	-0,044	Pass	
80B	Surface Distance		-0,038	+0,600/-0,111	-0,038	Pass	
80C	Surface Distance		-0,037	+0,600/-0,111	-0,037	Pass	
80D	Surface Distance		-0,039	+0,600/-0,111	-0,039	Pass	
80E	Surface Distance		-0,046	+0,600/-0,111	-0,046	Pass	
100A	Surface Distance		-0,048	+0,600/-0,111	-0,048	Pass	
100B	Surface Distance		-0,039	+0,600/-0,111	-0,039	Pass	
100C	Surface Distance		-0,044	+0,600/-0,111	-0,044	Pass	
100D	Surface Distance		-0,046	+0,600/-0,111	-0,046	Pass	
100E	Surface Distance		-0,049	+0,600/-0,111	-0,049	Pass	
120A	Surface Distance		-0,048	+0,600/-0,111	-0,048	Pass	
120B	Surface Distance		-0,048	+0,600/-0,111	-0,048	Pass	
120C	Surface Distance		-0,054	+0,600/-0,111	-0,054	Pass	
120D	Surface Distance		-0,051	+0,600/-0,111	-0,051	Pass	
120E	Surface Distance		-0,048	+0,600/-0,111	-0,048	Pass	
140A	Surface Distance		-0,053	+0,600/-0,111	-0,053	Pass	
140B	Surface Distance		-0,053	+0,600/-0,111	-0,053	Pass	
140D	Surface Distance		-0,056	+0,600/-0,111	-0,056	Pass	
140E	Surface Distance		-0,043	+0,600/-0,111	-0,043	Pass	
160A	Surface Distance		-0,053	+0,600/-0,111	-0,053	Pass	
160B	Surface Distance		-0,050	+0,600/-0,111	-0,050	Pass	
160C	Surface Distance		-0,054	+0,600/-0,111	-0,054	Pass	
160D	Surface Distance		-0,060	+0,600/-0,111	-0,060	Pass	
160E	Surface Distance		-0,040	+0,600/-0,111	-0,040	Pass	
180A	Surface Distance		-0,054	+0,600/-0,111	-0,054	Pass	
180B	Surface Distance		-0,049	+0,600/-0,111	-0,049	Pass	
180C	Surface Distance		-0,057	+0,600/-0,111	-0,057	Pass	
180D	Surface Distance		-0,045	+0,600/-0,111	-0,045	Pass	
180E	Surface Distance		-0,051	+0,600/-0,111	-0,051	Pass	
200A	Surface Distance		-0,051	+0,600/-0,111	-0,051	Pass	
200B	Surface Distance		-0,044	+0,600/-0,111	-0,044	Pass	
200C	Surface Distance		-0,041	+0,600/-0,111	-0,041	Pass	
200D	Surface Distance		-0,044	+0,600/-0,111	-0,044	Pass	
200E	Surface Distance		-0,034	+0,600/-0,111	-0,034	Pass	
220A	Surface Distance		-0,043	+0,600/-0,111	-0,043	Pass	
220B	Surface Distance		-0,037	+0,600/-0,111	-0,037	Pass	
220C	Surface Distance		-0,051	+0,600/-0,111	-0,051	Pass	
220D	Surface Distance		-0,049	+0,600/-0,111	-0,049	Pass	
220E	Surface Distance		-0,030	+0,600/-0,111	-0,030	Pass	
240A	Surface Distance		-0,034	+0,600/-0,111	-0,034	Pass	
240B	Surface Distance		-0,030	+0,600/-0,111	-0,030	Pass	
240C	Surface Distance		-0,019	+0,600/-0,111	-0,019	Pass	
240D	Surface Distance		-0,037	+0,600/-0,111	-0,037	Pass	
240E	Surface Distance		-0,021	+0,600/-0,111	-0,021	Pass	
260A	Surface Distance		-0,026	+0,600/-0,111	-0,026	Pass	
260B	Surface Distance		-0,035	+0,600/-0,111	-0,035	Pass	
260C	Surface Distance		-0,024	+0,600/-0,111	-0,024	Pass	
260D	Surface Distance		-0,030	+0,600/-0,111	-0,030	Pass	
260E	Surface Distance		-0,012	+0,600/-0,111	-0,012	Pass	
280A	Surface Distance		-0,016	+0,600/-0,111	-0,016	Pass	
280B	Surface Distance		-0,028	+0,600/-0,111	-0,028	Pass	
280C	Surface Distance		-0,022	+0,600/-0,111	-0,022	Pass	
280E	Surface Distance		0,000	+0,600/-0,111	0,000	Pass	

Comparison Point Table							
Units	Millimeters						
Coordinate System	coord sys 3						
Data Alignments	plane, axis, center point 2						
Linked Objects	kalbrointiacad.igs						
Name	Control	Nom	Meas	Tol	Dev	Test	Out Tol
5A	Surface Distance		0,023	±1,000	0,023	Pass	
5B	Surface Distance		0,012	+0,146/-0,103	0,012	Pass	
5C	Surface Distance		-0,001	+0,146/-0,103	-0,001	Pass	
5D	Surface Distance		-0,033	+0,146/-0,103	-0,033	Pass	
5E	Surface Distance		-0,025	+0,146/-0,103	-0,025	Pass	
5A (2)	Surface Distance		0,025	+0,146/-0,103	0,025	Pass	
5B (2)	Surface Distance		0,007	+0,146/-0,103	0,007	Pass	
5C (2)	Surface Distance		-0,002	+0,146/-0,103	-0,002	Pass	
5D (2)	Surface Distance		-0,004	+0,146/-0,103	-0,004	Pass	
5E (2)	Surface Distance		-0,016	+0,146/-0,103	-0,016	Pass	
5A (3)	Surface Distance		0,015	+0,146/-0,103	0,015	Pass	
5B (3)	Surface Distance		0,000	+0,146/-0,103	0,000	Pass	
5C (3)	Surface Distance		-0,011	+0,146/-0,103	-0,011	Pass	
5D (3)	Surface Distance		-0,015	+0,146/-0,103	-0,015	Pass	
5E (3)	Surface Distance		-0,031	+0,146/-0,103	-0,031	Pass	
3A	Surface Distance		0,018	+0,146/-0,103	0,018	Pass	
3B	Surface Distance		-0,003	+0,146/-0,103	-0,003	Pass	
3C	Surface Distance		-0,012	+0,146/-0,103	-0,012	Pass	
3D	Surface Distance		-0,002	+0,146/-0,103	-0,002	Pass	
3E	Surface Distance		-0,036	+0,146/-0,103	-0,036	Pass	
3A (2)	Surface Distance		0,010	+0,146/-0,103	0,010	Pass	
3B (2)	Surface Distance		-0,012	+0,146/-0,103	-0,012	Pass	
3C (2)	Surface Distance		-0,022	+0,146/-0,103	-0,022	Pass	
3D (2)	Surface Distance		-0,025	+0,146/-0,103	-0,025	Pass	
3E (2)	Surface Distance		-0,024	+0,146/-0,103	-0,024	Pass	
3A (3)	Surface Distance		0,005	+0,146/-0,103	0,005	Pass	
3B (3)	Surface Distance		-0,012	+0,146/-0,103	-0,012	Pass	
3C (3)	Surface Distance		-0,011	+0,146/-0,103	-0,011	Pass	
3D (3)	Surface Distance		-0,025	+0,146/-0,103	-0,025	Pass	
3E (3)	Surface Distance		-0,035	+0,146/-0,103	-0,035	Pass	
2A	Surface Distance		-0,011	+0,146/-0,103	-0,011	Pass	
2B	Surface Distance		-0,010	+0,146/-0,103	-0,010	Pass	
2C	Surface Distance		-0,026	+0,146/-0,103	-0,026	Pass	
2D	Surface Distance		-0,027	+0,146/-0,103	-0,027	Pass	
2E	Surface Distance		-0,042	+0,146/-0,103	-0,042	Pass	
2A (2)	Surface Distance		-0,002	+0,146/-0,103	-0,002	Pass	
2B (2)	Surface Distance		-0,008	+0,146/-0,103	-0,008	Pass	
2C (2)	Surface Distance		-0,031	+0,146/-0,103	-0,031	Pass	
2D (2)	Surface Distance		-0,040	+0,146/-0,103	-0,040	Pass	
2E (2)	Surface Distance		-0,040	+0,146/-0,103	-0,040	Pass	
2A (3)	Surface Distance		-0,004	+0,146/-0,103	-0,004	Pass	
2B (3)	Surface Distance		-0,016	+0,146/-0,103	-0,016	Pass	
2C (3)	Surface Distance		-0,042	+0,146/-0,103	-0,042	Pass	
2D (3)	Surface Distance		-0,045	+0,146/-0,103	-0,045	Pass	
2E (3)	Surface Distance		-0,035	+0,146/-0,103	-0,035	Pass	
1A	Surface Distance		-0,006	+0,146/-0,103	-0,006	Pass	
1B	Surface Distance		-0,013	+0,146/-0,103	-0,013	Pass	
1C	Surface Distance		-0,007	+0,146/-0,103	-0,007	Pass	
1D	Surface Distance		-0,072	+0,146/-0,103	-0,072	Pass	
1E	Surface Distance		-0,041	+0,146/-0,103	-0,041	Pass	
1A (2)	Surface Distance		-0,017	+0,146/-0,103	-0,017	Pass	
1B (2)	Surface Distance		-0,028	+0,146/-0,103	-0,028	Pass	
1C (2)	Surface Distance		-0,051	+0,146/-0,103	-0,051	Pass	
1D (2)	Surface Distance		-0,045	+0,146/-0,103	-0,045	Pass	
1E (2)	Surface Distance		-0,046	+0,146/-0,103	-0,046	Pass	
1A (3)	Surface Distance		-0,013	+0,146/-0,103	-0,013	Pass	
1B (3)	Surface Distance		-0,034	+0,146/-0,103	-0,034	Pass	
1C (3)	Surface Distance		-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass	
1D (3)	Surface Distance		-0,044	+0,146/-0,103	-0,044	Pass	
1E (3)	Surface Distance		-0,041	+0,146/-0,103	-0,041	Pass	
0.5A	Surface Distance		-0,007	+0,146/-0,103	-0,007	Pass	
0.5B	Surface Distance		-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass	
0.5C	Surface Distance		-0,047	+0,146/-0,103	-0,047	Pass	
0.5D	Surface Distance		-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass	
0.5E	Surface Distance		-0,062	+0,146/-0,103	-0,062	Pass	
0.5A (2)	Surface Distance		-0,017	+0,146/-0,103	-0,017	Pass	
0.5B (2)	Surface Distance		-0,033	+0,146/-0,103	-0,033	Pass	
0.5C (2)	Surface Distance		-0,041	+0,146/-0,103	-0,041	Pass	
0.5D (2)	Surface Distance		-0,029	+0,146/-0,103	-0,029	Pass	
0.5E (2)	Surface Distance		-0,064	+0,146/-0,103	-0,064	Pass	
0.5A (3)	Surface Distance		-0,032	+0,146/-0,103	-0,032	Pass	
0.5B (3)	Surface Distance		-0,036	+0,146/-0,103	-0,036	Pass	
0.5C (3)	Surface Distance		-0,051	+0,146/-0,103	-0,051	Pass	
0.5D (3)	Surface Distance		-0,051	+0,146/-0,103	-0,051	Pass	



0.5E (3)	Surface Distance	-0,070	+0,146/-0,103	-0,070	Pass
0.2A	Surface Distance	-0,003	+0,146/-0,103	-0,003	Pass
0.2B	Surface Distance	-0,013	+0,146/-0,103	-0,013	Pass
0.2C	Surface Distance	-0,025	+0,146/-0,103	-0,025	Pass
0.2D	Surface Distance	-0,029	+0,146/-0,103	-0,029	Pass
0.2E	Surface Distance	-0,029	+0,146/-0,103	-0,029	Pass
0.2A (2)	Surface Distance	-0,016	+0,146/-0,103	-0,016	Pass
0.2B (2)	Surface Distance	-0,028	+0,146/-0,103	-0,028	Pass
0.2C (2)	Surface Distance	-0,027	+0,146/-0,103	-0,027	Pass
0.2D (2)	Surface Distance	-0,025	+0,146/-0,103	-0,025	Pass
0.2E (2)	Surface Distance	-0,040	+0,146/-0,103	-0,040	Pass
0.2A (3)	Surface Distance	-0,015	+0,146/-0,103	-0,015	Pass
0.2B (3)	Surface Distance	-0,018	+0,146/-0,103	-0,018	Pass
0.2C (3)	Surface Distance	-0,027	+0,146/-0,103	-0,027	Pass
0.2D (3)	Surface Distance	-0,035	+0,146/-0,103	-0,035	Pass
0.2E (3)	Surface Distance	-0,042	+0,146/-0,103	-0,042	Pass
0.12A	Surface Distance	-0,013	+0,146/-0,103	-0,013	Pass
0.12B	Surface Distance	-0,027	+0,146/-0,103	-0,027	Pass
0.12C	Surface Distance	-0,031	+0,146/-0,103	-0,031	Pass
0.12D	Surface Distance	-0,048	+0,146/-0,103	-0,048	Pass
0.12E	Surface Distance	-0,049	+0,146/-0,103	-0,049	Pass
0.12A (2)	Surface Distance	-0,004	+0,146/-0,103	-0,004	Pass
0.12B (2)	Surface Distance	-0,022	+0,146/-0,103	-0,022	Pass
0.12C (2)	Surface Distance	-0,035	+0,146/-0,103	-0,035	Pass
0.12D (2)	Surface Distance	-0,055	+0,146/-0,103	-0,055	Pass
0.12E (2)	Surface Distance	-0,044	+0,146/-0,103	-0,044	Pass
0.12A (3)	Surface Distance	-0,012	+0,146/-0,103	-0,012	Pass
0.12B (3)	Surface Distance	-0,026	+0,146/-0,103	-0,026	Pass
0.12C (3)	Surface Distance	-0,034	+0,146/-0,103	-0,034	Pass
0.12D (3)	Surface Distance	-0,033	+0,146/-0,103	-0,033	Pass
0.12E (3)	Surface Distance	-0,041	+0,146/-0,103	-0,041	Pass
0.08A	Surface Distance	-0,006	+0,146/-0,103	-0,006	Pass
0.08B	Surface Distance	-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass
0.08C	Surface Distance	-0,067	+0,146/-0,103	-0,067	Pass
0.08D	Surface Distance	-0,045	+0,146/-0,103	-0,045	Pass
0.08E	Surface Distance	-0,040	+0,146/-0,103	-0,040	Pass
0.08A (2)	Surface Distance	-0,005	+0,146/-0,103	-0,005	Pass
0.08B (2)	Surface Distance	-0,022	+0,146/-0,103	-0,022	Pass
0.08C (2)	Surface Distance	-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass
0.08D (2)	Surface Distance	-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass
0.08E (2)	Surface Distance	-0,033	+0,146/-0,103	-0,033	Pass
0.08A (3)	Surface Distance	0,000	+0,146/-0,103	0,000	Pass
0.08B (3)	Surface Distance	0,000	+0,146/-0,103	0,000	Pass
0.08C (3)	Surface Distance	-0,038	+0,146/-0,103	-0,038	Pass
0.08D (3)	Surface Distance	-0,026	+0,146/-0,103	-0,026	Pass
0.08E (3)	Surface Distance	-0,041	+0,146/-0,103	-0,041	Pass
0.05A	Surface Distance	0,007	+0,146/-0,103	0,007	Pass
0.05B	Surface Distance	-0,009	+0,146/-0,103	-0,009	Pass
0.05C	Surface Distance	-0,030	+0,146/-0,103	-0,030	Pass
0.05D	Surface Distance	-0,039	+0,146/-0,103	-0,039	Pass
0.05E	Surface Distance	-0,039	+0,146/-0,103	-0,039	Pass
0.05A (2)	Surface Distance	0,014	+0,146/-0,103	0,014	Pass
0.05B (2)	Surface Distance	-0,005	+0,146/-0,103	-0,005	Pass
0.05C (2)	Surface Distance	-0,018	+0,146/-0,103	-0,018	Pass
0.05D (2)	Surface Distance	-0,031	+0,146/-0,103	-0,031	Pass
0.05E (2)	Surface Distance	-0,046	+0,146/-0,103	-0,046	Pass
0.05A (3)	Surface Distance	0,021	+0,146/-0,103	0,021	Pass
0.05B (3)	Surface Distance	-0,004	+0,146/-0,103	-0,004	Pass
0.05C (3)	Surface Distance	-0,019	+0,146/-0,103	-0,019	Pass
0.05D (3)	Surface Distance	-0,031	+0,146/-0,103	-0,031	Pass
0.05E (3)	Surface Distance	-0,033	+0,146/-0,103	-0,033	Pass
0.02A	Surface Distance	0,025	+0,146/-0,103	0,025	Pass
0.02B	Surface Distance	0,002	+0,146/-0,103	0,002	Pass
0.02C	Surface Distance	-0,013	+0,146/-0,103	-0,013	Pass
0.02D	Surface Distance	-0,025	+0,146/-0,103	-0,025	Pass
0.02E	Surface Distance	-0,031	+0,146/-0,103	-0,031	Pass
0.02A (2)	Surface Distance	0,016	+0,146/-0,103	0,016	Pass
0.02B (2)	Surface Distance	0,012	+0,146/-0,103	0,012	Pass
0.02C (2)	Surface Distance	-0,000	+0,146/-0,103	0,000	Pass
0.02D (2)	Surface Distance	-0,019	+0,146/-0,103	-0,019	Pass
0.02E (2)	Surface Distance	-0,024	+0,146/-0,103	-0,024	Pass
0.02A (3)	Surface Distance	0,013	+0,146/-0,103	0,013	Pass
0.02C (3)	Surface Distance	-0,000	+0,146/-0,103	0,000	Pass
0.02D (3)	Surface Distance	-0,005	+0,146/-0,103	-0,005	Pass
0.02E (3)	Surface Distance	-0,017	+0,146/-0,103	-0,017	Pass