

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Мерење и управљање

Број индекса: 153/2012

Никола Д. Вербић

**Еталонирање нумерички управљане мерне
машине
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Петар Тодоровић -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА У КРАГУЈЕВЦУ

Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Предмет: Мерење и Управљање

ЗАВРШНИ РАД

са темом:

ЕТАЛОНИРАЊЕ НУМЕРИЧКИ УПРАВЉАНЕ МЕРНЕ МАШИНЕ

За кандидата: Никола Вербић, број индекса 153/2012.

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да објасни основне принципе функционисања, као и да ближе опише еталонирање нумерички управљане мерне машине.

Препоручена литература:

[1] Миодраг Лазић, Основи метрологије, Машински факултету Крагујевцу 1987.

[2] Видосав Мајсторовић, Јанко Ходолич, Нумерички управљане мерне машине, Факултет техничких наука, Нови Сад 1998.

Крагујевац, децембар 2015. год.

Ментор:

др Петар Тодоровић ван. проф.

Изјава о самосталној изради рада

Изјављујем да сам овај завршни рад урадио самостално, служећи се стеченим знањем и искустваом, као и наведеном литературом.

Име и презиме: Никола Вербић

Број индекса: 153/2012

Резиме

У овом раду је описан развој, експлоатација и одржавање нумерички управљаних мерних машина. Објашњене су појаве геометријских грешака и начин на који су превазиђене. Посебну пажњу заузима процес еталонирања НУММ-а. Практични део је извршен на мерној машини “DEA GLOBAL Performance”, у испостави компаније “HEXAGON METROLOGY“ на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Кључне речи: НУММ, мерење, метрологија, еталонирање

Abstract

This paper describes the development, operation and maintenance of numerically controlled measuring machines. The appearance of geometric errors and the way they have been overcome are also described. Special attention occupies the calibration process CMM's. The practical part is carried out on the measuring machine “DEA GLOBAL Performance”, the office of company “HEXAGON METROLOGY“ at the Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac.

Keywords: CMM, measuring, metrology, calibration

Садржај

Резиме.....	5
Abstract	5
1. Увод.....	8
2. Развој нумерички управљаних мерних машина.....	8
2.1. Софтвер НУММ	10
2.2 Носећа структура НУММ.....	11
2.2.1. Ваздушни лежајеви.....	11
2.2.2. Мерни системи код мерних машина.....	12
2.2.3. Линеарни сензори помераја	12
2.2.4. Мерни сензор	14
3. Експлоатација мерних машина.....	16
3.1. Тачност мерне машине	16
4.Геометријске грешке НУММ-а.....	17
4.1. Грешка ротације Rab	18
4.2. Грешка транслације Lab	19
4.3. Грешка квадратичности Qcd	20
5. Софтверска компензација геометријских грешака	21
6. Поступак одржавања и провере.....	22
6.1. Софтверски алат на мерној машини “DEA GLOBAL Performance”	23
6.2. Еталон мерни комад KOBA-step Gage Bar.....	24
7. Поступак еталонирања	24
7.1 Калибрација мерног пипка	25
7.2. Прво контролно мерење еталон мерног комада KOBA-step Gage Bar.....	26
7.3. Упоредивање резултата	27
7.4 Промена вредности у компензационој мапи	28
7.5. Поновно мерење и контрола одступања	29
8. Сертификат о извршеном еталонирању.....	30
9. Закључак	30
Литература	31
Прилог	32

1. Увод

Развој науке и технологије који доприноси усавршавању индустрије захтева и адекватан развој метода и техника контроле квалитета. Метрологија као посебна наука представља интер- и мулти-дисциплинарну научну област, посвећену проблематици развоја мера и метода мерења, као и обезбеђења и очувања одговарајућег нивоа квалитета. Развој метрологије је основна претпоставка метролошког обезбеђења производње, како у фази развоја нових програма и производа тако и анализе и обезбеђења квалитета постојећих технолошких решења.

Основни задаци метрологије су, развој опште теорије мерења, утврђивање јединица физичких величина и њихових система, разрада метода и средстава мерења, методологије обезбеђења неопходне тачности мерења, развој поузданих еталона мерења и поступака репродукције, коришћењем одговарајућих метода обезбеђења јединства мера и мерења и реализација низа других активности усмерених ка повећању тачности, поузданости и производности мерења усавршавању поступка мерења и сл.

Индустријским мерењима, у производним условима, формира се прва информација о свим активностима предузетим за добијање производа одговарајућег квалитета.

2. Развој нумерички управљаних мерних машина

Место и улога мерења и инспекције се мењала сагласно развоју и увођењу нових технологија у технолошке системе. На почетку индустријског развоја, задатак производње, односно контроле био је да се обезбеди функција производа, уз високе толеранције саставних делова. Након тога, успостављањем концепта серијске производње уведен је принцип замењивости делова, при чему је контрола добила нову улогу (серијност и повећање тачности). Најзад, развојем и увођењем нових обрадних система, повећана је тачност, комплексност и флексибилност обрађених делова. Улога контроле је овде била не само да идентификује геометријску тачност обрађеног дела већ и параметре за управљање обрадним процесом (подешавање алата, параметри режима резања, храпавост обрађене површине, и слично). Број параметара обраде и квалитета који улази у међусобну корелацију се повећава. Развој НУММ¹-а, односно сложенијих технолошких структура на бази ових система је успоставио и нове концепте и правила за мерење и инспекцију. Повећање комплексности и флексибилности, уз све оштрије захтеве у смислу тачности данас се огледају у развоју и примени концепта управљања квалитетом конформности у реалном времену. Нове тенденције у технолошким системима у погледу обрадних процеса, поставиле су и нове захтеве пред мерну технику. Примена конвенционалних метролошких система и процедура које их подржавају постала је ограничавајући фактор у смислу флексибилности и тачности мерења. Посебан проблем је био метролошка идентификација комплексних метролошких задатака, као што су, на пример, толеранције облика и положаја код кутијастих делова или делова са површинама слободног облика. Код ових примера, поред

¹ НУММ – Нумерички управљане мерне машине

метролошке идентификације облика, проблем је и повезивање метролошких база, што има директног утицаја на тачност добијених резултата. Овде се мисли на делове, који имају површине, које се подводе под енглески термин "free forms".



Слика 1. Фотографија савремене нумерички управљане мерне машине

НУММ представља комплексне инжењерске производе, који имају сложену хардверску и софтверску структуру. Посматрајући их као целину, од њиховог настанка до сада, могу се дефинисати четири технолошка нивоа. Мерне машине са дигиталним показивачем позиције за сваку осу и ручним манипулисањем - кретањем мерног сензора, представљају први технолошки ниво. Основна карактеристика примене овог технолошког нивоа је мерење релативно комплексних делова у једном координатном систему мерења, уз ручну манипулацију целим процесом. Дигиталним показивачима позиције одређиване су линијске карактеристике квалитета (одступање дужина). Друга генерација мерних машина представља први технолошки ниво проширен са минималном хардверском подршком. Уводи се мерни процесор, помоћу кога се читавају положаји покретних елемената машине и врши основна обрада мерних резултата. На овај начин је повећана тачност и продуктивност добијања мерног протокола. Следећи, трећи генерацијски скок у овој технологији је био увођење погонских система за степене слободе носеће структуре. Управљачком јединицом је извршено управљање радом, на нивоу аутоматизације мерења и добијања мерног протокола. На овом технолошком нивоу је

коришћена аутономна софтверска подршка коју су развили сви произвођачи независно, углавном на бази хардверске логике. Основни принцип овог софтвера је успостављање везе између дефинисаних основних геометријских облика и различитих метролошких задатака за исте те облике. При томе, оператору стоји на располагању мени хардверских и софтверских функција за решавање различитих метролошких операција. Најзад, најновију генерацију мерних машина представљају савремене нумерички управљане мерне машине (слика 1.) на бази дистрибуираног управљања. Својом хардверском и софтверском структуром оне представљају флексибилне метролошке модуле, који омогућавају формирање сложених технолошких и/или метролошких структура. Аутоматизација мерења, манипулација мерним сензорима, мерним предметима, добијање различитих мерних протокола, подршка софтверских алата за CAD-CAM-CAE.

2.1. Софтвер НУММ

Паралелно са развојем НУММ-а, развијен је и софтвер за њихову подршку. Сви произвођачи НУММ развијали су аутономну софтверску подршку на бази основних мерних принципа. Софтвери који су развијени се могу класификовати у следеће групе: (1) мерење и инспекција толеранција дужина, углова, облика и положаја, (2) мерење и инспекција параметара карактеристика квалитета зупчаника, и (3) мерење и инспекција кривих линија и површина. Резултати мерења или инспекција у зависности од потребе корисника могу бити дати у: Декартовим (Картезијевим - x , y , z) координатама, поларним (p , q) координатама, цилиндричним (p , q , z) координатама, и сферним (p , q , y) координатама, у координатном систему мерења, који се односи на мерни предмет. Основни геометријски елементи које дефинишу сви софтвери за НУММ, помоћу којих се реализују различити метролошки задаци су: тачка, права, круг, раван, цилиндар, конус, сфера и торус. Сваки геометријски елемент се дефинише минималним и максималним бројем тачака, помоћу кога се, применом методе најмањих квадрата он одређује. Тако, на пример, за раван имамо: минимум 3 тачке и максимум неограничени број тачака. Помоћу ових основних геометријских облика можемо реализовати и следеће, нетипичне класе метролошких задатака: (1) компоновање сложених геометријских облика на основу основних, (2) пресеци геометријских облика и/или њихових карактеристика, и (3) растојање или најкраће растојање између геометријских облика и/или њихових карактеристика. Толеранције облика и положаја се такође дефинишу као релације основних геометријских елемената.

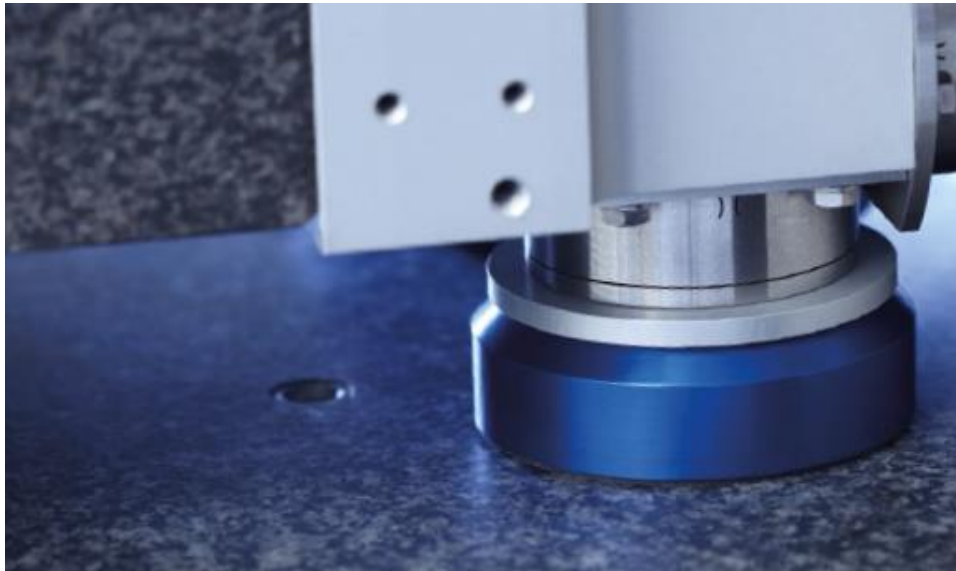
2.2. Носећа структура НУММ

Основни елемент НУММ-а било које генерације је носећа структура. Њена функција је: да затвори ток сила у систему НУММ-а при извођењу процеса мерења уз постизање прописане мерне несигурности, и да омогући тачно вођење покретних елемената носеће структуре.

НУММ се изводе у четири основне варијанте носеће структуре: конзолна вертикална, портална, конзолна-хоризонтална и мостна. Основни елементи наведених структура су: носач-портал, носач мерног сензора и мерни сто.

2.2.1. Ваздушни лежајеви

Ваздушни лежајеви (слика 2.) представљају битан елемент носеће структуре НУММ. Карактеристике ваздушних лежајева су посебно важне за прецизна транслаторна померања.



Слика 2. Фотографија савременог ваздушног лежаја

Ове карактеристике се односе на:

- мало трење - велика је брзина струје ваздуха у лежају, па је трење мало и без "stick-slip-a". Почетно трење је нула а оне се линеарно повећава са порастом брзине,
- тачност и поновљивост - за транслаторни ваздушни лежај, код кога се један елемент креће и други мирује (што је случај код НУММ-а), дебљина ваздушног јастука, односно грешка нормалности између лежаја и клизне површине се креће у граници до 0,005 mm на дужини од 300mm Поновљивост линеарне путање је 0,0025 mm и мања.
- мале вибрације и бука- с обзиром да нема трења котрљања или клизања између елемената лежаја и клизних површина, што практично значи да нема буке и вибрација.

- дуг век - одсуство директног котрљања између напред наведених елемената елиминише хабање трењем, и то практично значи да је век трајања неограничен.
- одсуство загађености околине -ваздух којим се напајају лежајеви и који излази у околину је чист.

2.2.2. Мерни системи код мерних машина

Функција мерних система код НУММ је да једнозначно идентификују положај покретних елемената њене носеће структуре. Сваки степен слободе носеће структуре има сопствени мерни систем, а заједно повезани у једну целину, чине релативни мерни систем НУММ-а, зато што било која тачка у мерном простору машине може да представља координатни почетак машине.

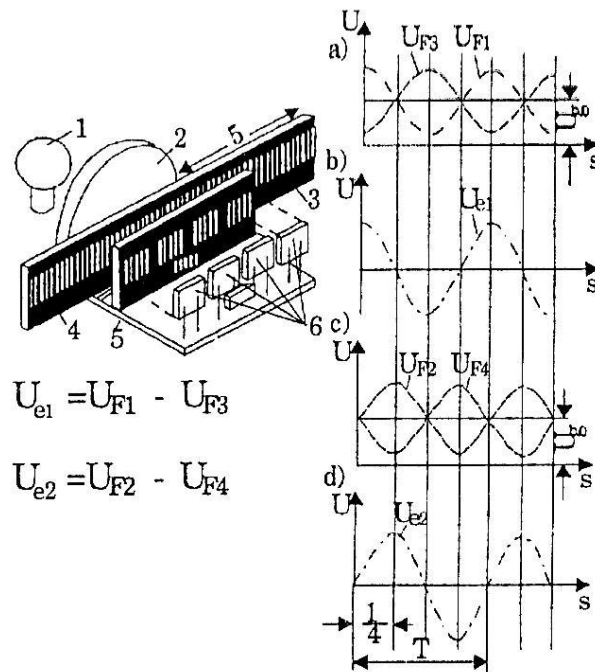
Извршене анализе показују да 30 до 50% укупне грешке мерне машине се односи на грешке мерног система. Ова чињеница јасно показује значај смањења грешака мерних система.Правило које овде важи, каже да резолуција примењеног мерног система треба да буде десет пута мања од декларисане мерне несигурности за линијску мерну несигурност.

Мерне машине имају и софтверску компензацију системске грешке (утицај температуре и мерна несигурност) мерних система. Међутим и ова компензација није сасвим тачна због нелинеарности процеса, који се одигравају у мерним системима, а до чије математичке зависности није могуће доћи. Зато се проблем линеаризује, па се при томе прави већа или мања систематска грешка. Конструкцијска решења мерних система треба да задовоље следеће захтеве: складан однос између габаритних димензија и масе елемената мерног система, што је могуће бољу изолацију претвараача мерних сигнала од негативних утицаја температуре и вибрација, ради њихове припреме за дигиталну конверзију.

2.2.3. Линеарни сензори помераја

Ради се о мерним летвама (индуктивним, оптичким мерним системима) које су изграђене на бази композитних материјала, и које имају врло мали коефицијент линеарног ширења, тако да су погодне за примену и у погонским условима.

Најзаступљенији у примени на мерним машинама је оптички мерни систем, чија је шема са основним принципом рада приказана (слика 3.).



Слика 3. Шема и принцип рада фотоелектричног (оптичког) мерног система

Саставни елементи овог система су: светлосни извор (1), објектив (2), непокретни лењир (3) са решеткама различите густине (4), покретни лењир са решеткама (5), фотоћелија (6). Ово је позициони мерни систем, код кога се генерисање електричних сигнала врши двоструким узастопним претварањем величина. Прво се, линијско померање покретног лењира (3) преводи у промену јачине светлости или промену светлосног флукса пре уласка у фотоћелију. Ово се постиже међусобним померањем лењира, чиме се циклично затварају и отварају пролази светлосном снопу, па се јачина светлости мења по синусном закону. Други претварач претвара промену јачине светлости у електричне сигнале помоћу фотоћелија (6), јер се оне наизменично осветљавају у ритму промене јачине светлости. Овако настали светлосни импулси претварају се, у фотоћелији, у пулсирајућу електричну струју, односно електричне сигнале. Прва и трећа фотоћелија генеришу електричне сигнале (а), који се суперпонирањем превode у резултујући сигнал (б). По истој аналогiji генеришу се сигнали (с) и резултујући сигнал (д) за фотоћелију 5 и 6. Резултујући сигнали (б) и (д) се фазно разликују за четвртину корака покретног-непокретног лењира овог мерног система.

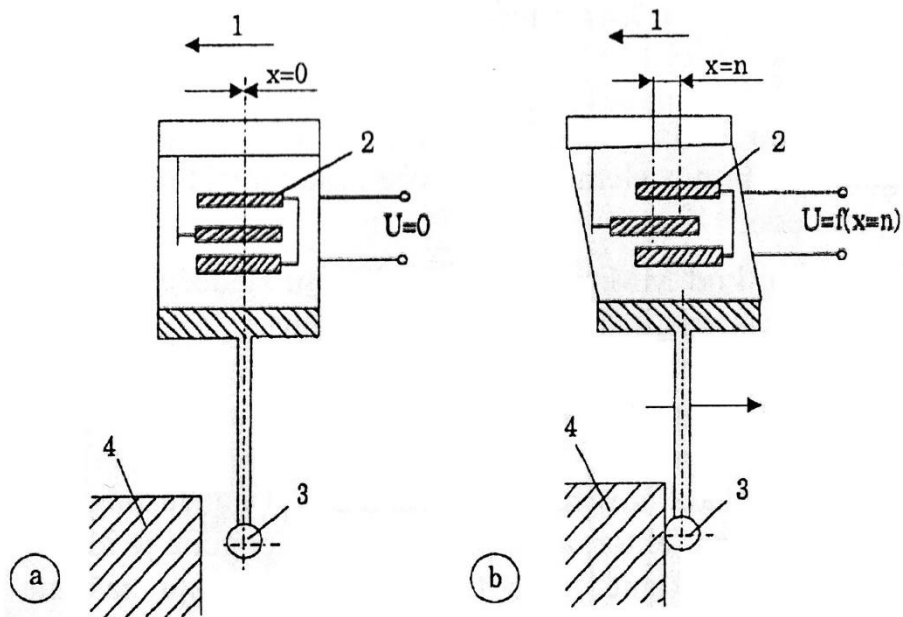
Смер кретања се утврђује на бази тога, која је фотоћелија прва осветљена. На истим принципима раде и фотоелектрични мерни системи за мерење угловних промена.

2.2.4. Мерни сензор

Мерни сензор представља један од најважнијих подсистема НУММ-а. Он је први елемент мерног ланца који генерише мерни сигнал сразмеран вредности мерне величине, односно детектованој сили. Он на бази мерне силе ствара сигнал и помоћу или без комуникационих каблова (у зависности од врсте сензора), шаље сигнал управљачкој јединици, односно рачунару а онда одатле погонском систему који на бази тог сигнала затвара серво-петљу регулатора у погонском систему. Улога мерног сензора је идентификација димензија (њиховог одступања) облика и положаја мерних предмета. Мерни сензор се може посматрати у ужем и ширем смислу. У ужем смислу речи сензор чине два основна дела: сензор и систем за прихватање мерног пипка. У Ширем смислу мерни сензор чине: сензор, мерни пипак, носач сензора и прикључак мерног сензора на мерну машину. Од правилног дефинисања мерног сензора тј, избора његових варијабилних компонената зависи реализација мерног циклуса, односно операције мерења.

Индуктивни сензор

Један од основних начина за генерисање мерног сигнала је примена индуктивног сензора. При контакту мерног пипка и мерног предмета активира се управљање које даље помера покретни елемент мерне машине по одговарајућој мерној оси све док се индуктивни мерни систем коресподентне осе не доведе у нулти положај. Након одређеног времена (нпр. 1 секунде) систем се налази у овом индуктивном положају у циљу пригушивања свих механичких кретања. Након тога следи преузимање мерних величина са мерног система од стране рачунара.

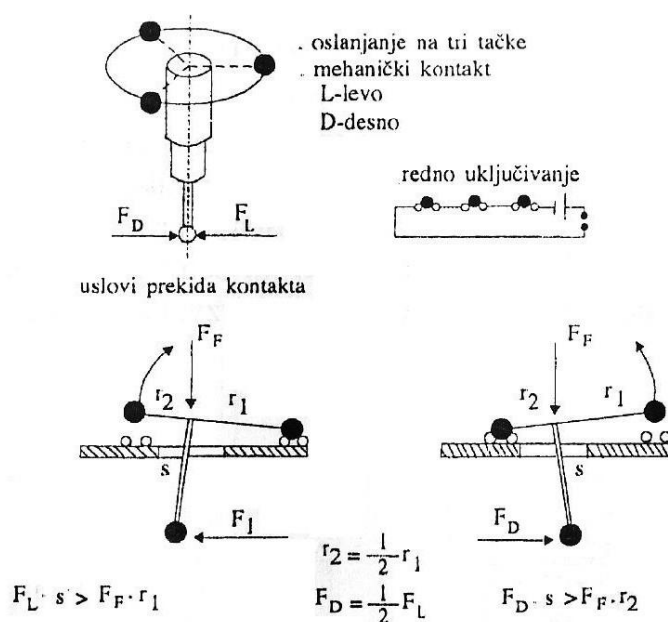


Слика 4. Принцип дејства индуктивног сензора у некој од оса универзалне мерне главе (1- смер кретања мерне главе; 2- индуктивни сензор; 3- мерни пипак; 4- мерни предмет)

Мерни сензор - индуктивни сензор (слика 4.) омогућује такозвано скенирање (енгл. scanning), односно континуално праћење контуре мерног предмета, слично копирном уређају. Када мерни пипак додирне мерни предмет, тада мерна машина следи контуру мерног предмета аналогно управљању помоћу копирног шаблона, пошто мерни сензор допушта кретање у потребним правцима. Ово је могуће обзиром да управљачки систем непрекидно делује на сезорске системе мерног сензора приморавајући их да заузимају нулте положаје. Индуктивни сензор није погодан за мерење померања, али је зато погодан за фино мерење силе. У комбинацији индуктивног мерног сензора и оптичког мерног система (мерање померања), добијају се веома добре перформансе. Ово је основни разлог што се ова комбинација јавља код свих модерних решења познатих светских произвођача.

Контактни сензор

Контактни сензор (слика 5.) при достизању одређеног скретања мерног пипка или унапред дефинисаном стању додира (нпр. одређена сила додира) производи одређени сигнал ("trigger" сигнал, сигнал окидања) за читавање позиције мерног система на осам мерне машине.



Слика 5. Основни принципи генерисања мерног сигнала код контактнoг мерног сензора

Основна функција овог мерног сензора је успостављање или прекидање електромоторне силе у одговарајућем струјном колу у тренутку додира мерног пипка са мерним предметом, чак и при силама додира мањим од 0,08 N.

3. Експлоатација мерних машина

Приликом набавке мерне машине односно њене испоруке, произвођач унапред упознаје купца о условима које би требало испунити за њен правилан рад. Потребно је обезбедити да се мерна машина на адекватан начин изолује од спољних утицаја. То обично подразумева посебан простор одвојен од извора потреса и вибрација. Пошто се утицај температуре сматра као један од главних узрочника грешака у мерењу, потребно је обезбедити да просторија предвиђена за мерење буде климатизована и на сталној температури од 20 степени са одступањем до 2 степена. Препоручљиво је да температура буде константна у свим деловима просторије, са што мање фактора који би то стање променили. Један од услова за правилну употребу је и хигијена, јер би прашина и друге нечистоће могле да доведу до неисправних података о мереном делу. Уље или честице метала могу довести до трајних оштећења клизајућих елемената. Приликом коришћења, и поред примењених мера изолације мерне машине долази до смањења тачности након неког периода.

3.1. Тачност мерне машине

Тачност је битни параметар НУММ-а. Он је релевантан за мерну машину као систем, али на његову вредност утичу:

Стабилност носеће структуре

Избором одговарајућег типа, према димензијама и облику мерних предмета, као и материјала, постиже се одговарајућа статичка крутост и динамичка стабилност носеће структуре. Посебни важни елементи структуре који имају доминантан утицај на овај параметар су: чворови и везе структуре, клизни спојеви и линеарност система.

Поновљивост

Ово је посебно важан параметар за НУММ, а он се односи на: носећу структуру, погонски систем, мерни систем и мерни сензор. Партикуларна поновљивост ових елемената даје укупну поновољивост мерне машине. Може се јавити двадесет и једна геометријска грешка, које се односе на: по три компоненте грешке трансације и ротације по оси, као и три компоненте грешке нормалности оса, Нове генерације НУММ-а имају уграђену софтверску корекцију неких од компоненти ових грешака.

Мерни систем

Степени слободе мерне машине као и мерног сензора имају уграђене мерне системе који имају своју тачност и осетљивост.

Услови околине и температура

Вибрације и влажност су параметри који утићу на тачност, и којима се управља у одређеним границама, да би се постигла прописана тачност.

Мерни предмет

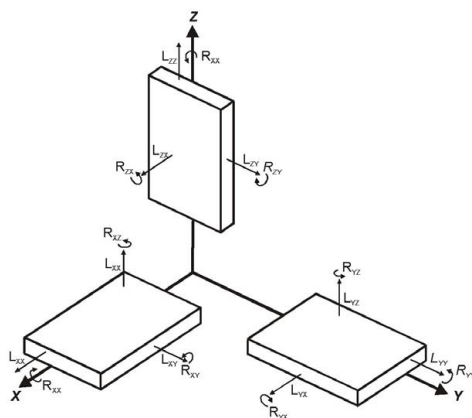
Температурска стабилизација и управљање температуром мерног предмета је такође утицајни параметар тачности.

4. Геометријске грешке НУММ-а

Чак и у најбоље могућим условима обраде, механички делови мерног уређаја имају геометријске несавршености које треба измерити и кориговати их у циљу оклањања њихових утицаја на резултате мерења. Ово поглавље садржи дефиницију геометријских грешака, кратко објашњење софтвера за исправљање геометријских грешака и осамнаест параметарских формула које чине математички модел методе компензације геометријских грешака.

Дефиниција геометријских грешака

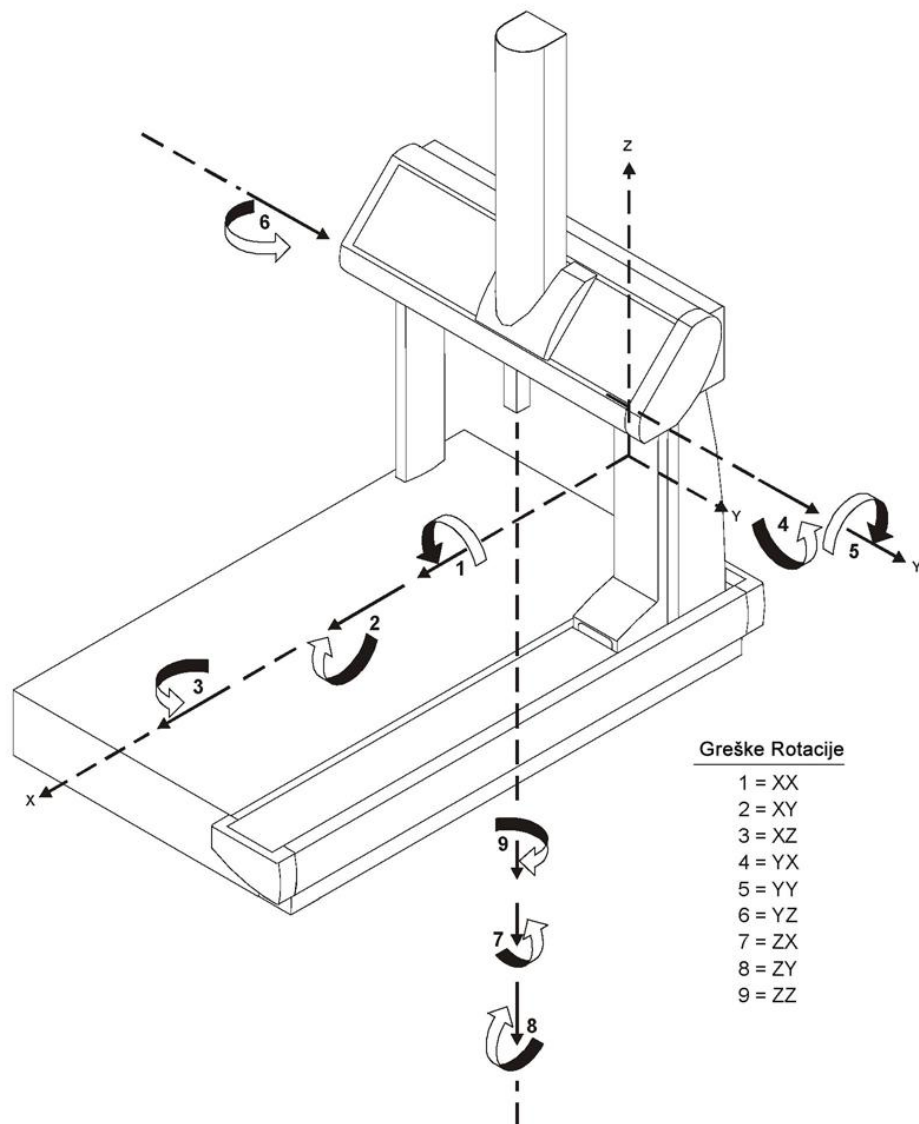
Мерна машина је систем сачињен од три носача који се линеарно крећу по вођицама. Са механичке тачке гледишта, овај систем се може представити као скуп од три крута тела која се крећу у линеарним правцима три ортогоналне осе које чине референтни Декартов координатни систем мерних машина (слика 6). У пракси, вођице носача нису потпуно равне или паралелне једна другој, тако да ове механичке несавршености, заједно са несавршеностима других врста, као што су несавршености погонског система, чине да сваки од носача има по шест степени слободе, три транслације и три ротације (према теорији механике, механичко тело има шест степени слободе: то може бити транслација дуж оса и ротација око оса Декартовог координатног система). Свака геометријска грешка је представљена функцијом чија вредност зависи искључиво од позиције постигнуте од стране одговарајућег кретања дуж оса.



Слика 6. Репрезентација мерне машине са три крута тела

4.1. Грешка ротације *Rab*

Грешка ротације је ротација носача око осе а (X, Y, Z) и око осе б (X, Y, Z) током његовог кретања дуж осе а. На пример, RXY показује ротацију главног носача коју врши око Y осе, док се креће дуж X осе.



Слика 7. Конвенција знака грешке ротације

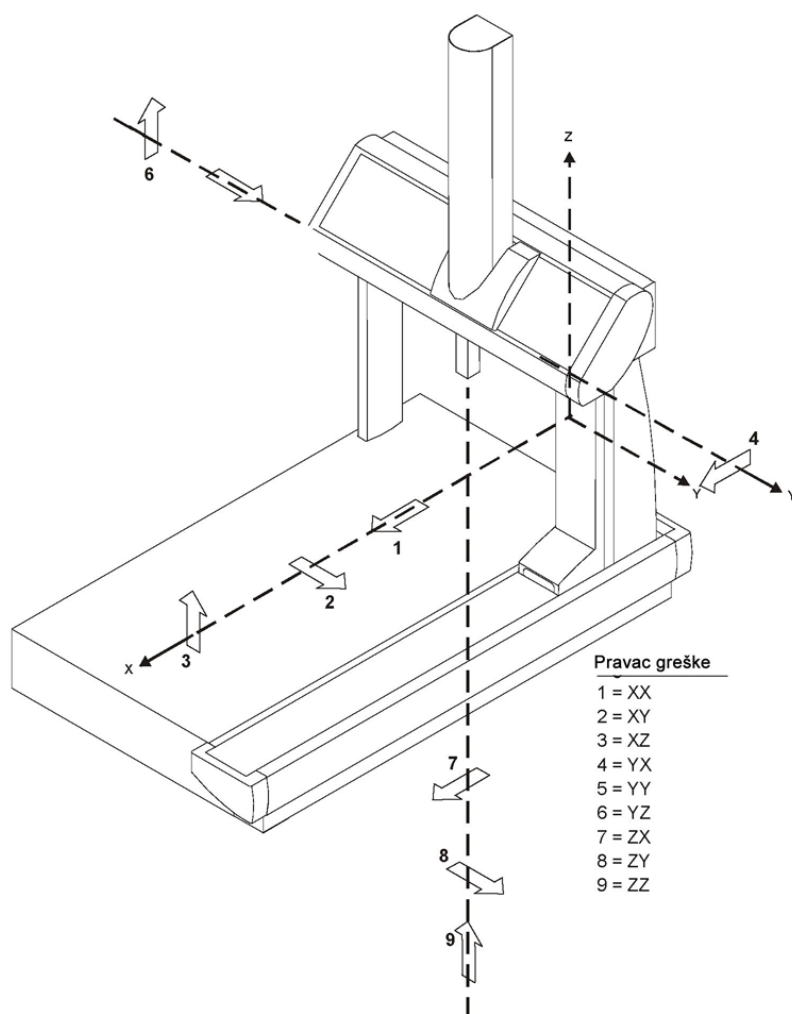
4.2. Грешка translације Lab

Грешка translације L_{ab} је translација носача у правцу а (X, Y, Z) и у правцу б (X, Y, Z) током његовог кретања дуж осе а. На пример L_{xy} показује translацију главног носача коју врши заједно са Y осом, док се креће дуж X осе.

Према њиховим главним узрочницима, грешке translације се могу поделити у две групе:

- Грешке правости вођица ($L_{mr} \text{ са } M \neq R$).
- Позиционирање или распон грешака ($L_{mr} \text{ са } M = R$).

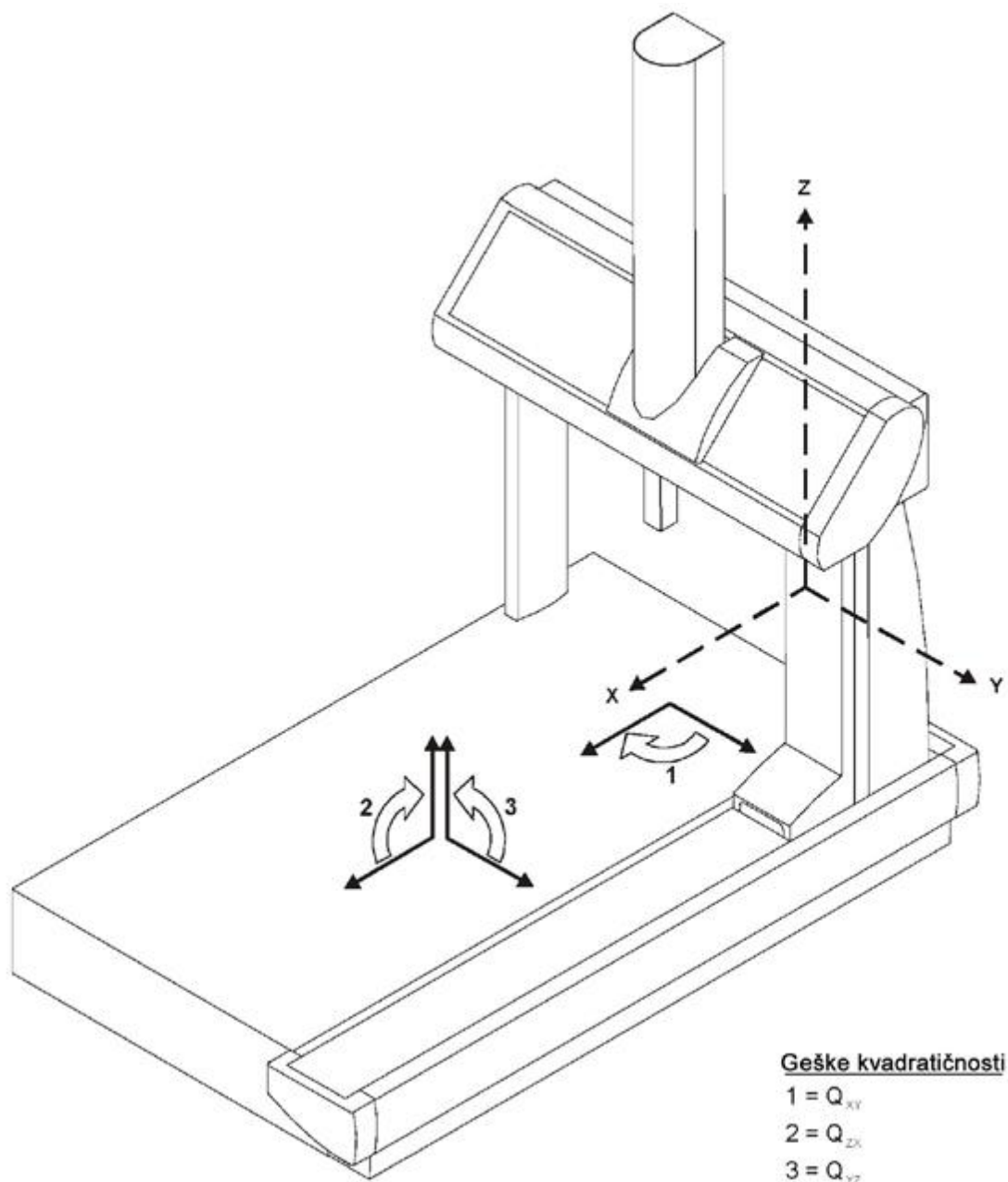
За сваку translацију L_{mr} , одговарајућа дво-димензионална стрелица, (слика 8.) означава да је translација мерног центра у правцу који је узет за позитиван ($P=X, Y$ или Z), без обзира на правац кретања носача M.



Слика 8. Позитиван правац транслаторних грешака

4.3. Грешка квадратичности Qcd

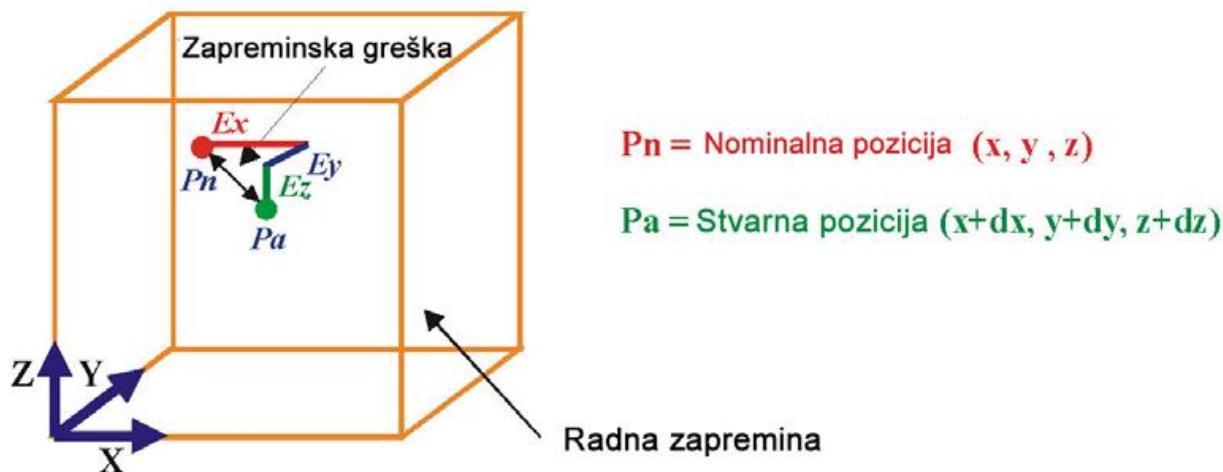
Две осе су под правим углом једна у односу на другу када су ортогоналне. Када су углови различити од 90 степени јавља се грешка квадратичности (ортогоналности). Квадратичне грешке не мењају путању мерне главе и немају утицај на статичке грешке позиционирања и мерење линеарних елемената усклађених са осама. Ефекат грешке квадратичности се разликује од ефеката грешака ротације и translације, три грешке квадратичности су Q_{xy} , Q_{yz} и Q_{zx} (на пример, Q_{xy} , је грешка по Y осе, у тренутку када X осу узима као референтну) које су такође узете у обзир (слика 9.).



Слика 9. Конвенција о знаку за квадратичне грешке

5. Софтверска компензација геометријских грешака

Када су носачи измештени од положаја мерног центра, тада имају номиналну позицију (X, Y, Z). Међутим, стварни положај мерног центра је ($X+E_x, Y+E_y, Z+E_z$) одређен са померањем проузрокованим геометријском грешком (слика 10.). На пример, у току контакта сензора мерног центра, где је центар рубинска сфера.



Слика 10. Графичка интерпретација геометријске грешке

Компезовање грешака посредством софтвера значи, елиминисати ефекат без стварних елиминација узрочника. Да би се ово извело, потребно је знати главни правац сваке геометријске грешке дуж одређене осе и имати приступ захтевима математичких функција, да би се израчунали нежељени помаци мерног центра дуж сваке осе, који су узроковани овом грешком.

Методe софтверске компензације геометријских грешака

Метода компензације геометријских грешака посредством софтвера, састоји се из три корака:

1. Планирање математичког модела геометријске грешке који може да изрази непожељне помаке мерног центра у функцији координата (X, Y, Z).
2. Развој мерне методе за одређивање коефицијента (такође параметар) присутног у моделу.
3. Развој софтвера који ће (помоћу постојећег модела геометријске грешке) омогућити контролу система са изједначавањем ефеката динамичких грешака.

Формула осамнаест параметара

Наредни систем једначина се односи на математички модел геометријских грешака за мерне машине са вертикалном руком. Изражено је нежељено померање E_x, E_y, E_z мерног центра дуж осе референтног система као функција њихових координата (X, Y, Z). Свака од три формуле, које описују модел, добијена је рачунањем алгебарске суме нежељених померања узрочника

помоћу геометријских ротација, translација и ортогоналних грешака (грешака квадратичности) дуж одговарајућих референтних оса.

$$E_x = L_{xx} + L_{yx} + L_{zx} - R_{xz} \cdot Y_s - (R_{xy} + R_{yy}) \cdot Z_s - (R_{xz} + R_{yz} - R_{zz}) \cdot T_x - (R_{xy} + R_{yy} + R_{zy}) \cdot T_z$$

$$E_y = L_{xy} + L_{yy} + L_{zy} - (R_{xx} + R_{yx}) \cdot Z_s + (R_{xz} + R_{yz} - R_{zz}) \cdot T_x - (R_{xx} + R_{yx} + R_{zx}) \cdot T_z$$

$$E_z = L_{xz} + L_{yz} + L_{zz} + R_{xx} \cdot Y_s + (R_{xy} + R_{yy} + R_{zy}) \cdot T_x + (R_{xx} + R_{yx} + R_{zx}) \cdot T_y$$

где су:

– E_x , E_y , E_z – нежељена померања мерног центра дуж одговарајућих координатних оса са гледишта на номиналну позицију узрочника геометријских грешака.

– X , Y , Z – координате мерног центра у односу на координатни почетак оса. Координате мерног центра су изражене као $X = X_s + T_x$, $Y = Y_s + T_y$, $Z = Z_s + T_z$ где су:

– X_s , Y_s , Z_s – координате центра на ивици руке,

– T_x , T_y , T_z – сензори нормално постављени у односу на ивицу руке

Померање E_a мерног центра пролази дуж осе а када се номинална позиција $P(X, Y, Z)$ добија додавањем померања дуж осе а које је проузроковано геометријском грешком. У свакој формули E_a , су померања изазвана трансляторним грешкама дуж осе а која су једнака вредностима самих грешака, док је, за израчунавање померања изазваног ротационом грешком, потребно помножити грешку ротације са одговарајућим ефективном руком. Ако су грешке квадратичности узете у обзир, формула 18 параметара мора да се прошири на следећи начин:

$$R_{xy} = R_{xy} + Q_{zx}$$

$$R_{zx} = R_{zx} + Q_{yz}$$

$$R_{xz} = R_{xz} - Q_{xy}$$

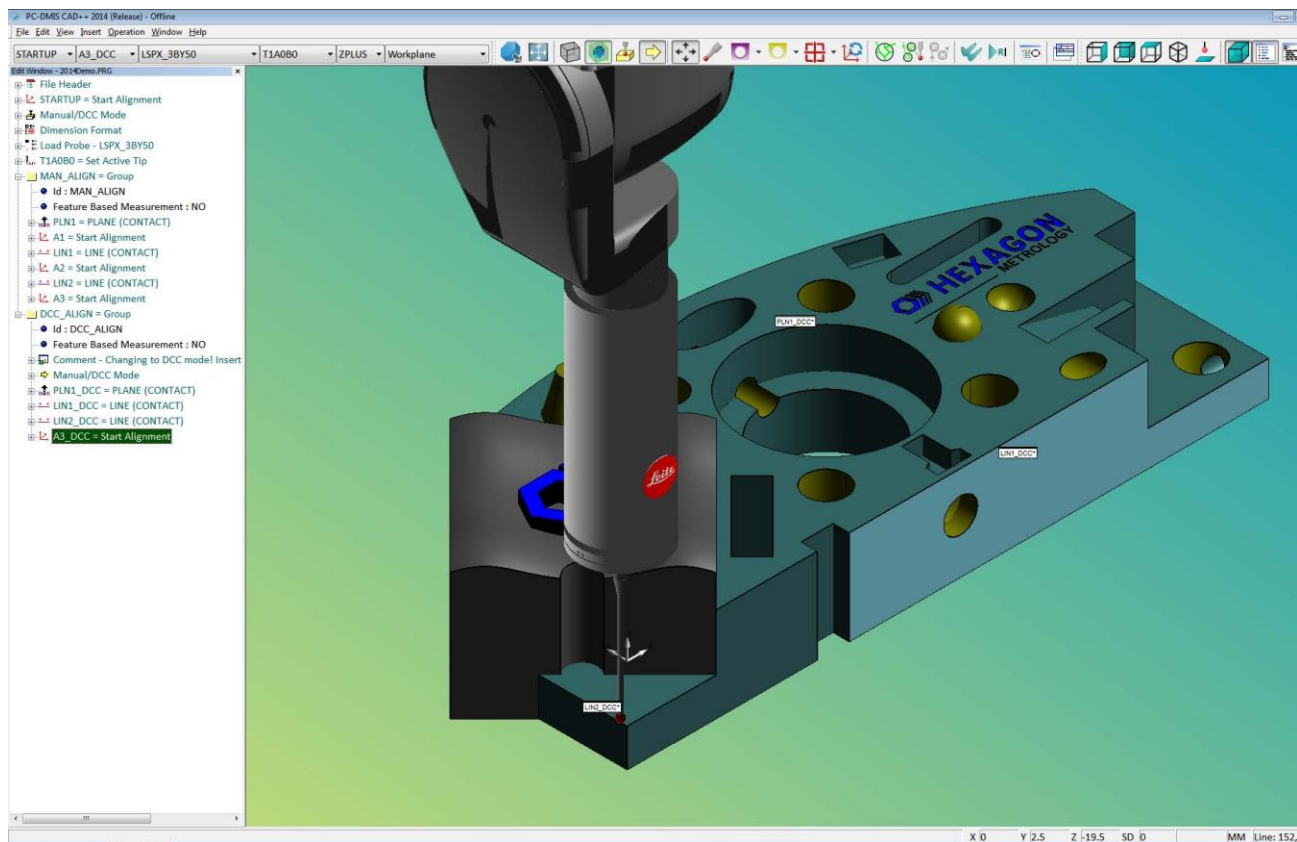
6. Поступак одржавања и провере

Као предуслов за поуздано коришћење ове врсте мерне опреме је и редовно одржавање. Да би један овако сложен систем био прецизан и тачан у прописаним границама, потребно је да се изврши еталонирање. Најчешће се препоручује да мерна опрема буде проверена периодично једном годишње, или када мерна машина мења место. Надзор, еталонирање и сертификацију врше овлашћени представници произвођача односно лабораторије.

Као пример овде је објашњен поступак извршен на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу на мерној машини марке “DEA GLOBAL Performance”.

6.1. Софтверски алат на мерној машини “DEA GLOBAL Performance”

PC-DMIS (енгл. Dimensional Measuring Interface Specification) представља софтверски алат развијен од стране мултинационалне компаније HEXAGON за повезивање CAD система и мерних уређаја за мерење димензија, као што су: HUMM, мерне руке, мерни микроскопи, оптички мерни уређаји.



Слика 11. Радно окружење софтвера PC-DMIS

Данас овај програм подразумева мноштво могућности везаних за мерне машине и њихово коришћење. Прилагођен је да буде компатибилан са већином контролера које користе нумерички управљане мерне машине. Омогућује да корисник врши увоз CAD модела потребних за мерење. Кориснички интерфејс (слика 11.) је организован за једноставну употребу односно проверу геометријских и димензијских карактеристика мереног елемента. Такође, обезбеђује подршку за поступке тродимензионалног скенирања и обраде података. Софтверски алат овог типа има значајну улогу у области контроле квалитета.

У метрологији еталони за проверу имају једну од најважнијих улога за примену светских стандарда по питању квалитета. Представљају један од основних начина су за проверу тачности координатних мерних машина које примењују механичке, односно контактне сензоре. Коришћењем еталона познатих димензија уз подршку софтвера који спроводи процес провере и обраде података долази се до поуздане верификације тачности испитиване мерне машине.

6.2. Еталон мерни комад КОВА-step Gage Bar

КОВА-step Gage Bar (слика12.) – представља еталон односно референтни физички модел на основу кога се може одредити мерна несигурност координатних мерних машина.

Како би се обезбедила адекватна следивост потребно је да еталон буде проверен од стране акредитоване лабораторије. За еталон Коба, препоручени интервал за екстерно еталонирање је две године.

Израђена је употребом челика стабилизованог процесом старења како би се постигла димензијска постојаност. Састоји се из профилисаног дела који има редно уметнуте керамичке цилиндри предвиђене за контакт са мерним пипком.



Слика 12. КОВА-step Gage Bar

7. Поступак еталонирања

Еталонирање је скуп поступака којима се, у одређеним условима, успоставља однос између вредности величина које показује мерило или мерни систем и одговарајуће вредности остварених еталоном.

Процес се састоји из више узастопних корака. Најпре, врши се технички преглед исправности као и отклањање евентуалних отказа и недостатака. Такође је потребно довести локалне услове у стање оптималних вредности. Ово подразумева да се испуне сви параметри и обезбеде услови везани за равномерност температуре, влажности ваздуха, чистоће клизних стаза машине, радног стола и еталона.

7.1. Калибрација мерног пипка

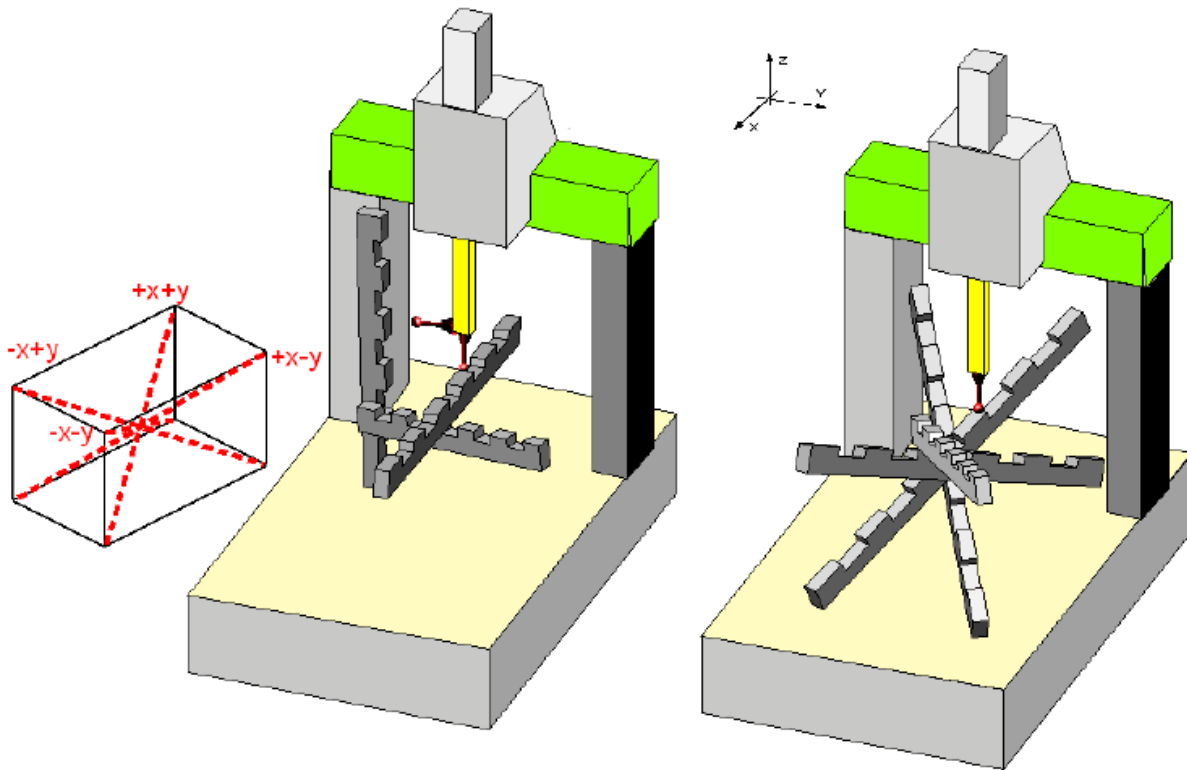
Како би се смањио утицај угиба, препоручљиво је да се при поступку калибрације користи пипак са кратком иглом. Када смо изабрали пипак, потребно је извршити његову калибрацију. За ову намену користи калибрациона сфера (слика 13.). Калибрација мерног пипка је релативно чест процес и врши се аутоматски.



Слика 13. Сфера за калибрацију мерног пипка

7.2. Прво контролно мерење еталон мерног комада KOBА-step Gage Bar

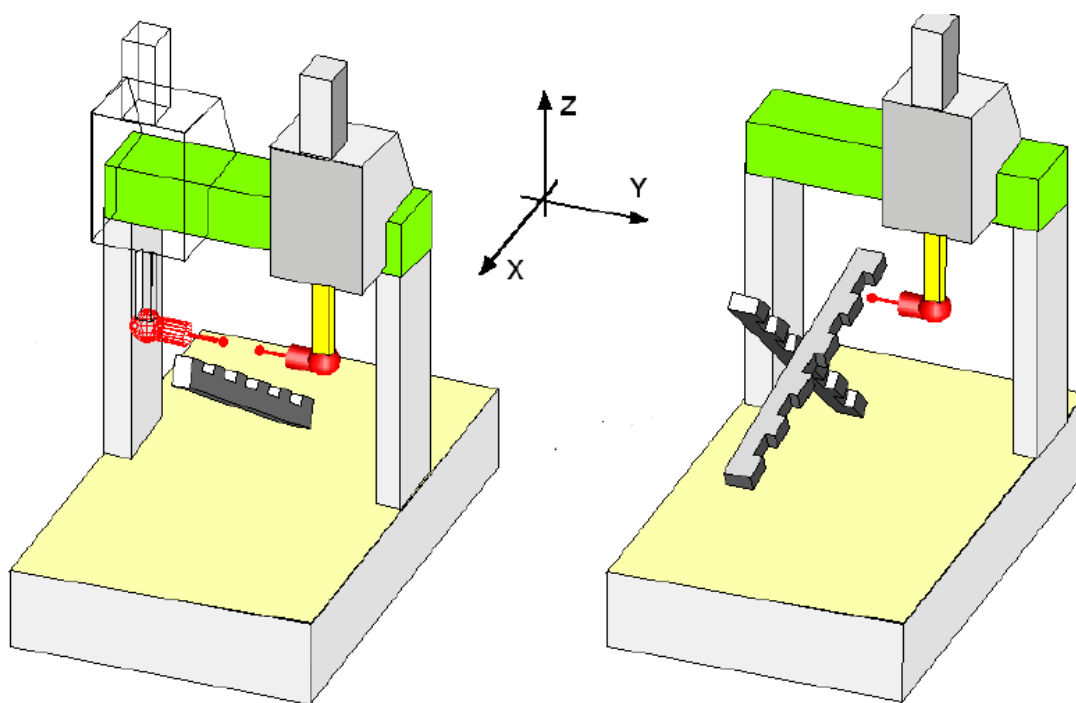
Поступак мерења потребног за еталонирање почиње постављањем еталона Коба праволинијски дуж осе X, (слика 14.) а затим се ручним управљањем помоћу палице пипак доводи у контакт са еталоном у више тачака. Ово служи да машина препозна положај, а затим аутоматски изврши мерења. Машина извршава програмирана мерења дуж осе еталона. На исти начин се врше и мерења по преостале две осе. Добијени су резултати L_{xx} , L_{xy} , L_{zz} .



Слика 14. Положај еталона за мерење

Следећи кораци подразумевају даљу промену положаја еталона, и то у позиције 4 просторне дијагонале (слика 14.). Поступак мерења је такође препуштен аутоматском управљању, а резултати су Q_{xy} , Q_{xz} , Q_{yz} .

Како би се провериле све могућности машине односно откриле све могуће грешке, потребно је извршити мерења и у положајима који су приказани (слика 15.).



Слика 15. Положај еталона за мерење

Резултати мерења који су добијени овим поступком се меморишу, и овим је завршена прва етапа поступка.

7.3. Упоредивање резултата

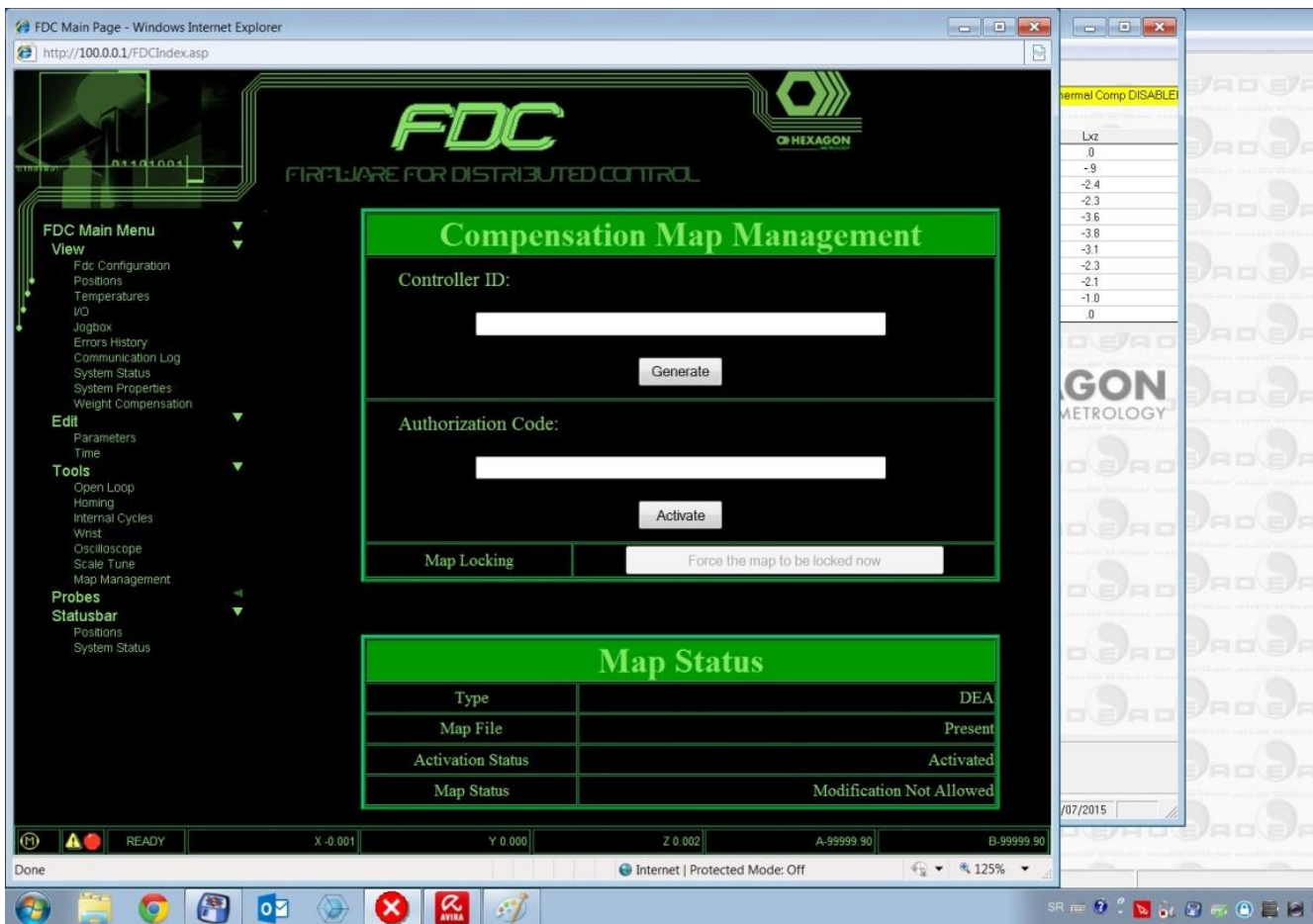
Након што су креирани резултати, врши се компарација њихових вредности са вредностима које имамо за еталон Коба.

Ако се испоставило да су грешке веће од дозвољених, то значи да је дошло до некаквих промена на машини. Овакве несавршености су увек могуће без обзира на све системе минимализовања појаве грешака.

Како би откривена одступања била отклоњена потребно је извршити промену компензационих мапа.

7.4. Промена вредности у компензационој мапи

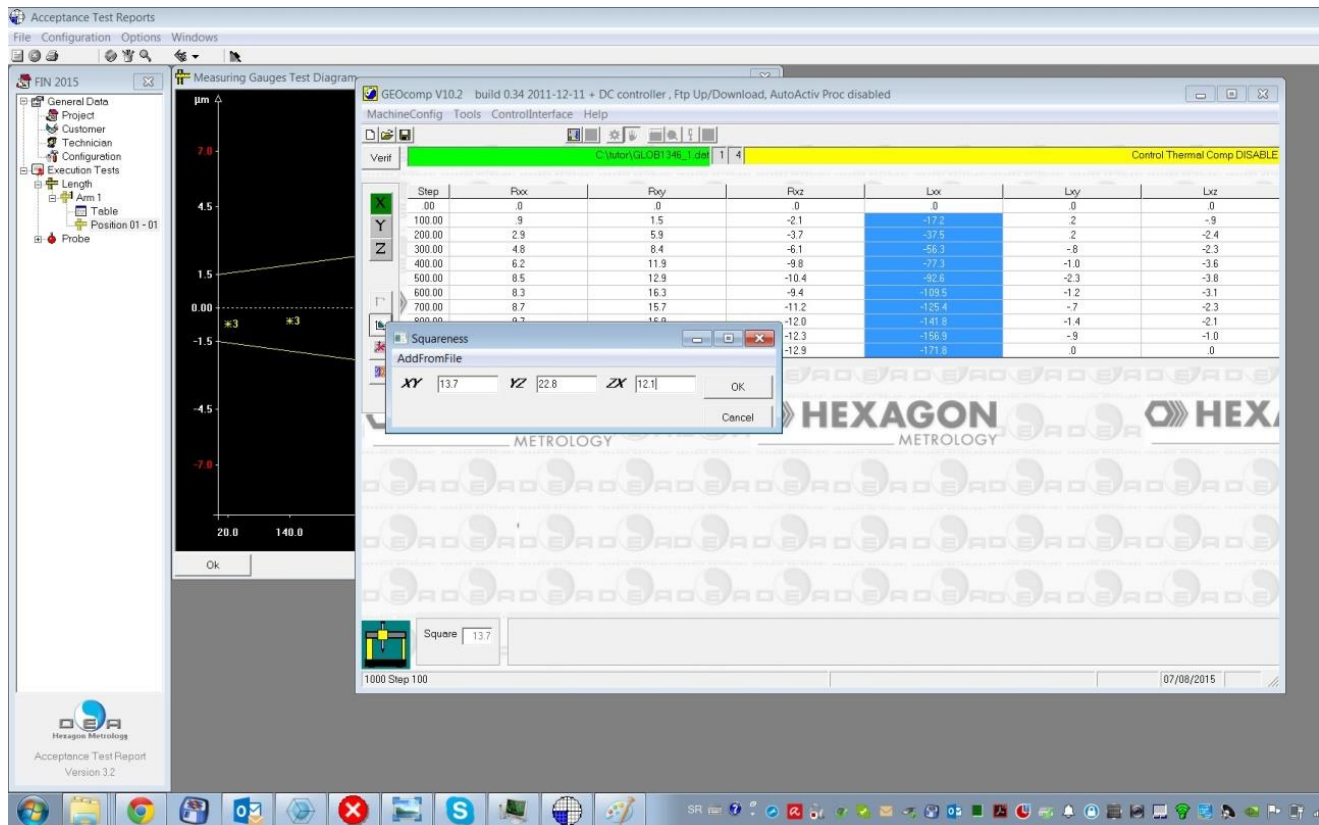
Компензационе мапе представљају базе података о вредностима грешака које се јављају због несавршености машине. Компензациона мапа садржи вредности за компензацију грешака на сваких 100 mm у свим правцима радне запремине машине. Један од софтверских алата који њима располаже је GEOcomp. Овакви подаци се добијају експериментално и они су уникатни за сваку мерну машину. Променом вредности које се налазе у компензационој мапи на погрешан начин може довести и до грубих грешака.



Слика 16. Унос сигурносног кода потребног за приступ

Софтвер овог типа користе само овлашћени сервисни инжењери који врше контролу и сервис мерних машина. Тако је приликом приступа корисничком интерфејсу потребно претходно затражити дозволу од произвођача путем мејла, а затим унети сигурносни код за приступ радном окружењу (слика 16.).

Промена вредности у компензационој мапи (слика 17.) најчешће се врши линеарно за сва чворишта геометријске компензационе мапе, за одређену врсту грешке појединачно. Величина промене се одређује на основу разлике вредности добијених у првом контролном мерењу еталона и референтних података за еталон Коба.



Слика 17. Поступак промене вредности у компензационој мапи

7.5. Поновно мерење и контрола одступања

Када се изврши промена вредности у програму GEOcomp, тада је потребно спровести поступак мерења еталона Коба у истим позицијама као што је претходно објашњено за прво мерење. Како би мерна машина функционисала правилно потребно је да одступања буду у границама које је прописао произвођач. Уколико се утврди да су одступања изнад дозвољених граница, поступак се понавља. У случају да није могуће подесити да мерна несигурност буде у дозвољеним границама, значи да је дошло до отказа неког елемента.

8. Сертификат о извршеном еталонирању

Након извршене контроле и еталонирања корисник ове услуге добија сертификат о свим информацијама везаним за извршени поступак, као и потврду о спроведеном стандарду ISO 10360-2.

У овом документу постоје сви подаци о спољним условима, положају еталона, положају мерног пипка при сваком спроведеном мерењу. Приказане су упоредно мере добијене поновним мерењем еталона и одговарајуће референтне мере. Поред резултата дате су и вредности толеранција, као и вредности одступања. Такође постоји и дијаграм извршених мерења. На крају, издат сертификат значи да је мерна машина извршила контролна мерења еталона са одступањима у дозвољеним границама. Један пример сертификата је дат као прилог на крају рада.

9. Закључак

Производна метрологија представља важну основу производних технологија, а отуда и значај метролошких мерних система. Данас нумерички управљане мерне машине постају све заступљеније у индустрији, услед тежње произвођача и потрошача за производима високог квалитета.

Елементи сложених облика и велике прецизности, све су више примењени у нашем ближем окружењу доказујући да је савремена метрологија дала велики допринос у развоју индустрије. Данас готово све компаније које се баве производњом имају интерес за даљи развој мерних машина.

Редовно еталонирање и сертификација, поред тога што обезбеђују прописану прецизност и тачност дају и разлог више за бољи пласман производа. Управо применом стандарда, као и даљем усавршавању метрологије може се кренути ка новим достигнућима.

Литература

- [1] Миодраг Лазић, Основи метрологије, Машински факултету Крагујевцу 1987.
- [2] Видосав Мајсторовић, Јанко Ходолич, Нумерички управљане мерне машине, Факултет техничких наука, Нови Сад 1998.
- [3] Петар Тодоровић, Милан Матијевић, Мерење и управљање, скрипта са предавања, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу
- [4] Бојан Богдановић, Софтверска компензација геометријских грешака на координатним машинама, Семинарски рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу 2011.
- [5] <http://hexagonmetrology.us/>
- [6] <http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/>
- [7] Eugen Trapet - Verification of Large CMMs by Means of Artifacts www.trapet.de, Spain

Прилог

У наставку рада је дата копија оригиналног сертификата о успешно извршеном еталонирању мерне машине издатог од стране испоставе компаније “HEXAGON METROLOGY“ на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Acceptance protocol for 3D Coordinate Measuring Machine

Protocol nr. 0GLOD000862IA1503171141 (ISO 10360-2)

CMM

Manufacturer: **DEA**
Machine Model: **Global Advantega - 12.32.10**
Serial Number: **GLOD000862IA**
Arms Number: **1**
Axis lengths [mm]: **X=1200, Y=3200, Z=1000**
Hardware Control: **DC800**
Software: **PcDmis (2014)**

Customer

Company: **Strata Manufacturing PJSC**
Address: **Al Ain, PO Box 86519, UAE**

Department: **Quality**
References: **Daniel Ruse**
Telephone: **+971559008659**
Note:

Technician

Name: **Bojan Bogdanovic**
Personal Code: **+38163217564**
Company: **Hexagon Metrology**

*In consideration of the result of the tests carried out, we hereby certify that
the machine conforms to the performance defined in the
Hexagon Metrology catalog, according to ISO 10360-2*

19-mar-2015

Inspected by:

Accepted by:

Measurement Performance

Reference gauge used

Description	Type Certificate No.	Serial No. Certificate date	Certificate by
Sphere gauge	25 mm 102367	G0401 31-avg-2014	Trafalgar limited
Step block gauge	1020 mm 2012110006/1/SG2/653	200605 S293 09-okt-2013	NPL

The measure lengths test has been execute using this formula:

MPE Measuring Gauges: $1.40 + L / 333.00$

Measuring Parameters

Measurement Speed [mm/s]:	5.0
Position Speed [mm/s]:	500.0
Acceleration [mm/s ²]:	1750.0
Approach distance [mm]:	0.5
Fly enabled:	Yes
Temperature compensation mode:	Structural NTC

Length Probe Info

Probe Model (head):	TesaStar M DEA	Probe serial number:	7B003401
Sensor Model:	LSP - X1S	Sensor serial number:	M00-114-006-000
Probe Extension [mm]:	0.0		
Tip length [mm]:	50.0		
Tip diameter [mm]:	5.0		



Position (Volume 1 Position 1)

18-mar-2015 10:52

Gauge position and Probe orientation

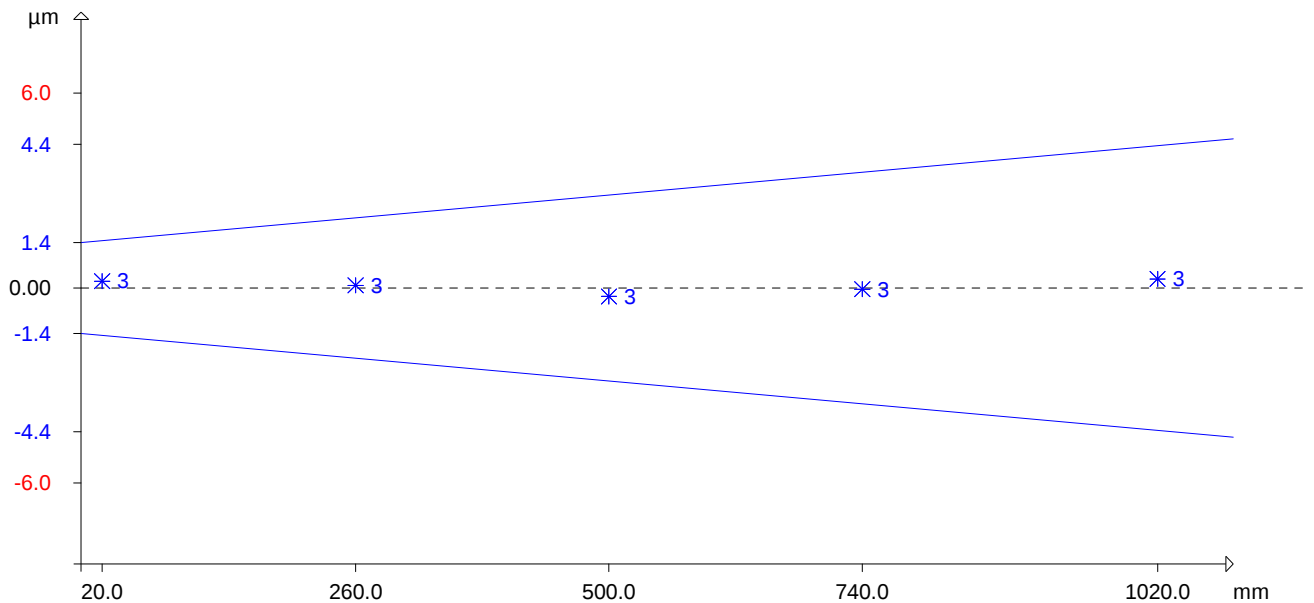
X [mm]:	1106.0272	X [cos]:	-1.0	Roll position [g]:	0.0
Y [mm]:	605.965	Y [cos]:	0.0007	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-626.6266	Z [cos]:	0.0099		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.6	25.6
Y temperature [°C]:	25.66	25.66
Z temperature [°C]:	25.45	25.45
Part temperature [°C]:	25.33	25.33

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00780	±1.46	0.31
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04510	±2.90	-0.06
740.01874	740.01880	±3.62	0.06
1019.96622	1019.96670	±4.46	0.48
20.00749	20.00770	±1.46	0.21
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04510	±2.90	-0.06
740.01874	740.01880	±3.62	0.06
1019.96622	1019.96660	±4.46	0.38
20.00749	20.00770	±1.46	0.21
260.07022	260.07040	±2.18	0.18
500.04516	500.04490	±2.90	-0.26
740.01874	740.01870	±3.62	-0.04
1019.96622	1019.96650	±4.46	0.28





Position (Volume 1 Position 2)

18-mar-2015 11:21

Gauge position and Probe orientation

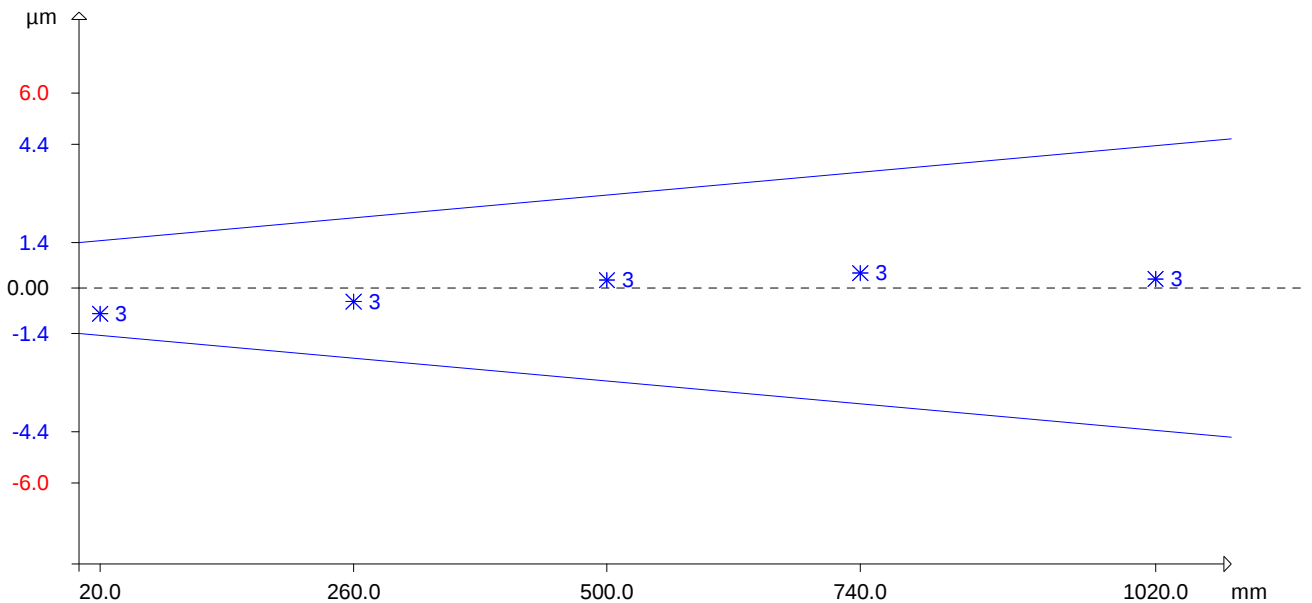
X [mm]:	529.8287	X [cos]:	-0.004	Roll position [g]:	0.0
Y [mm]:	109.9815	Y [cos]:	0.9999	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-626.5235	Z [cos]:	0.0096		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.75	25.75
Y temperature [°C]:	25.67	25.67
Z temperature [°C]:	25.6	25.6
Part temperature [°C]:	25.34	25.34

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00690	±1.46	-0.59
260.07022	260.07010	±2.18	-0.12
500.04516	500.04550	±2.90	0.34
740.01874	740.01950	±3.62	0.76
1019.96622	1019.96660	±4.46	0.38
20.00749	20.00680	±1.46	-0.69
260.07022	260.06990	±2.18	-0.32
500.04516	500.04540	±2.90	0.24
740.01874	740.01920	±3.62	0.46
1019.96622	1019.96650	±4.46	0.28
20.00749	20.00670	±1.46	-0.79
260.07022	260.06980	±2.18	-0.42
500.04516	500.04540	±2.90	0.24
740.01874	740.01930	±3.62	0.56
1019.96622	1019.96660	±4.46	0.38





Position (Volume 1 Position 3)

18-mar-2015 12:04

Gauge position and Probe orientation

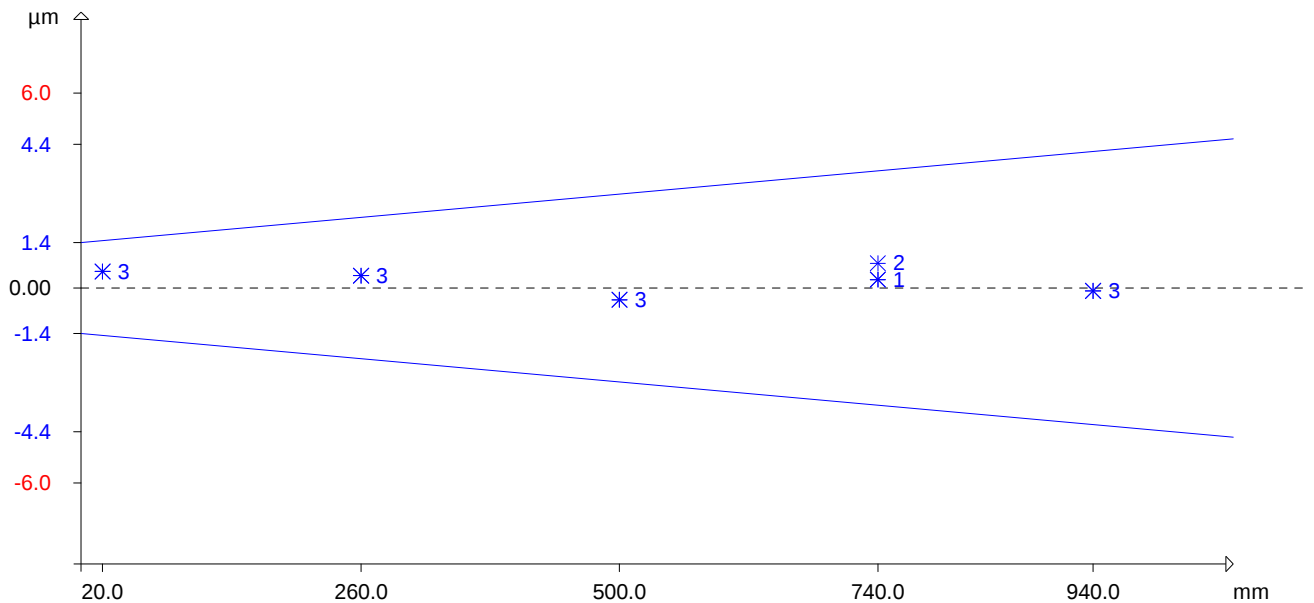
X [mm]:	570.0584	X [cos]:	-0.0013	Roll position [g]:	90.0
Y [mm]:	341.7378	Y [cos]:	-0.009	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-979.073	Z [cos]:	1.0		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.89	25.89
Y temperature [°C]:	25.7	25.7
Z temperature [°C]:	25.76	25.76
Part temperature [°C]:	25.64	25.64

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00800	±1.46	0.51
260.07022	260.07070	±2.18	0.48
500.04516	500.04480	±2.90	-0.36
740.01874	740.01960	±3.62	0.86
939.98659	939.98650	±4.22	-0.09
20.00749	20.00810	±1.46	0.61
260.07022	260.07060	±2.18	0.38
500.04516	500.04500	±2.90	-0.16
740.01874	740.01900	±3.62	0.26
939.98659	939.98660	±4.22	0.01
20.00749	20.00820	±1.46	0.71
260.07022	260.07060	±2.18	0.38
500.04516	500.04490	±2.90	-0.26
740.01874	740.01950	±3.62	0.76
939.98659	939.98650	±4.22	-0.09





Position (Volume 1 Position 4)

19-mar-2015 10:28

Gauge position and Probe orientation

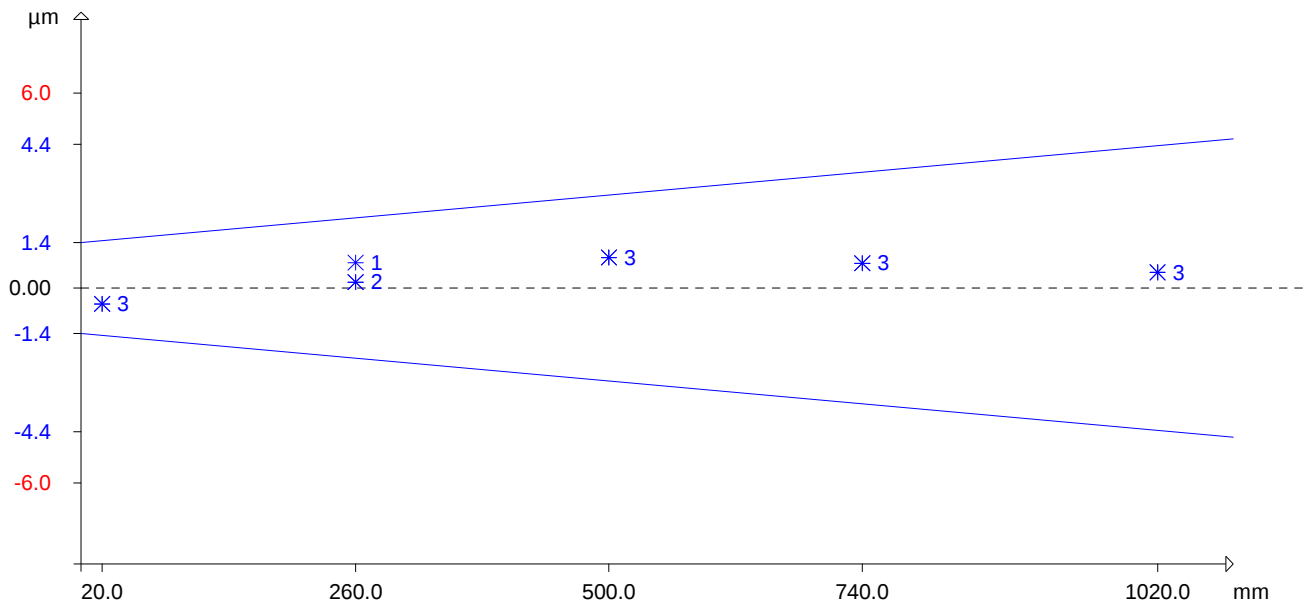
X [mm]:	248.062	X [cos]:	0.4907	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	481.0828	Y [cos]:	0.5153	Pitch position [g]:	135.0
Z [mm]:	-994.9394	Z [cos]:	0.7026		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.39	26.39
Y temperature [°C]:	26.09	26.09
Z temperature [°C]:	26.37	26.37
Part temperature [°C]:	25.92	25.92

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00710	±1.46	-0.39
260.07022	260.07100	±2.18	0.78
500.04516	500.04640	±2.90	1.24
740.01874	740.01960	±3.62	0.86
1019.96622	1019.96690	±4.46	0.68
20.00749	20.00710	±1.46	-0.39
260.07022	260.07060	±2.18	0.38
500.04516	500.04640	±2.90	1.24
740.01874	740.01960	±3.62	0.86
1019.96622	1019.96680	±4.46	0.58
20.00749	20.00700	±1.46	-0.49
260.07022	260.07040	±2.18	0.18
500.04516	500.04610	±2.90	0.94
740.01874	740.01950	±3.62	0.76
1019.96622	1019.96670	±4.46	0.48





Position (Volume 1 Position 5)

19-mar-2015 10:37

Gauge position and Probe orientation

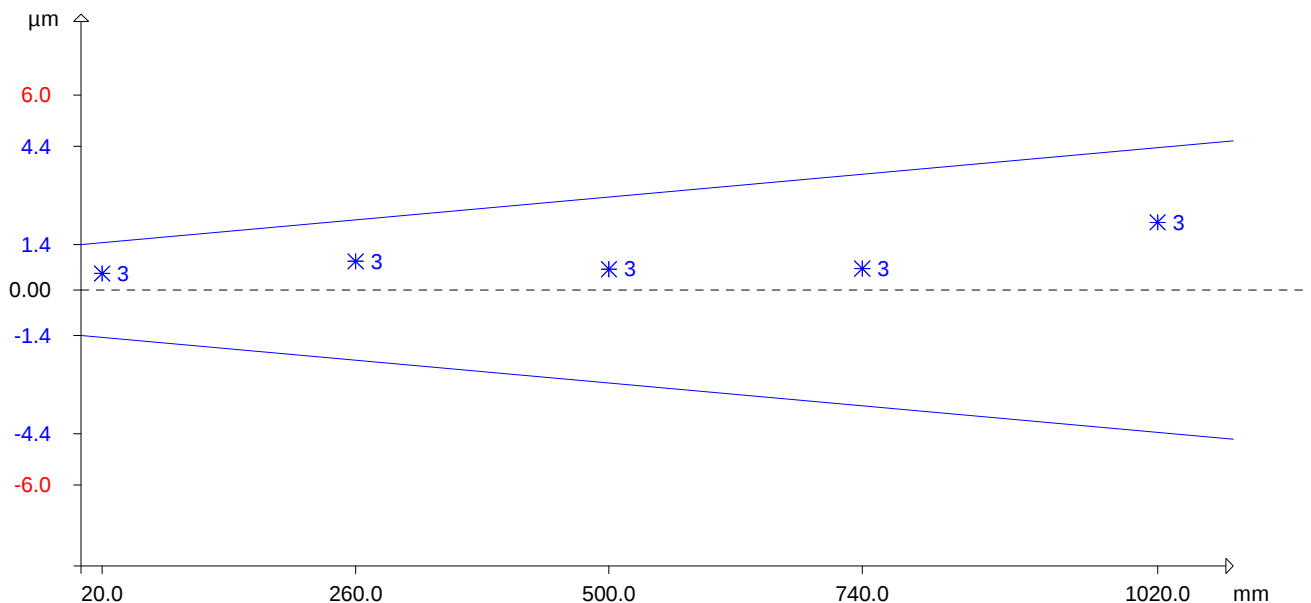
X [mm]:	858.4281	X [cos]:	-0.509	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	929.3284	Y [cos]:	-0.4978	Pitch position [g]:	-45.0
Z [mm]:	-994.6572	Z [cos]:	0.7022		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.43	26.43
Y temperature [°C]:	26.09	26.09
Z temperature [°C]:	26.42	26.42
Part temperature [°C]:	25.97	25.97

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00800	±1.46	0.51
260.07022	260.07110	±2.18	0.88
500.04516	500.04580	±2.90	0.64
740.01874	740.01950	±3.62	0.76
1019.96622	1019.96840	±4.46	2.18
20.00749	20.00800	±1.46	0.51
260.07022	260.07140	±2.18	1.18
500.04516	500.04580	±2.90	0.64
740.01874	740.01960	±3.62	0.86
1019.96622	1019.96850	±4.46	2.28
20.00749	20.00820	±1.46	0.71
260.07022	260.07140	±2.18	1.18
500.04516	500.04600	±2.90	0.84
740.01874	740.01940	±3.62	0.66
1019.96622	1019.96830	±4.46	2.08





Position (Volume 1 Position 6)

19-mar-2015 10:04

Gauge position and Probe orientation

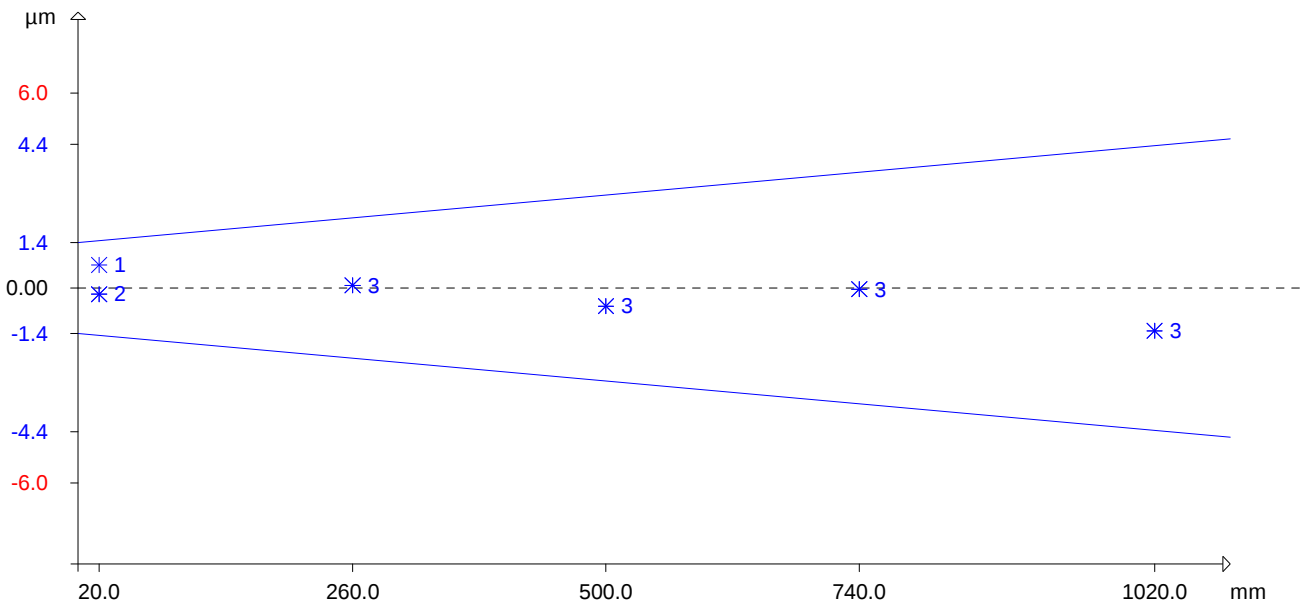
X [mm]:	382.2464	X [cos]:	0.4644	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	750.6082	Y [cos]:	-0.539	Pitch position [g]:	45.0
Z [mm]:	-995.0457	Z [cos]:	0.7028		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.31	26.31
Y temperature [°C]:	26.06	26.06
Z temperature [°C]:	26.28	26.28
Part temperature [°C]:	25.93	25.93

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00820	±1.46	0.71
260.07022	260.07050	±2.18	0.28
500.04516	500.04470	±2.90	-0.46
740.01874	740.01880	±3.62	0.06
1019.96622	1019.96500	±4.46	-1.22
20.00749	20.00740	±1.46	-0.09
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04470	±2.90	-0.46
740.01874	740.01890	±3.62	0.16
1019.96622	1019.96490	±4.46	-1.32
20.00749	20.00730	±1.46	-0.19
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04460	±2.90	-0.56
740.01874	740.01870	±3.62	-0.04
1019.96622	1019.96500	±4.46	-1.22





Position (Volume 1 Position 7)

19-mar-2015 10:41

Gauge position and Probe orientation

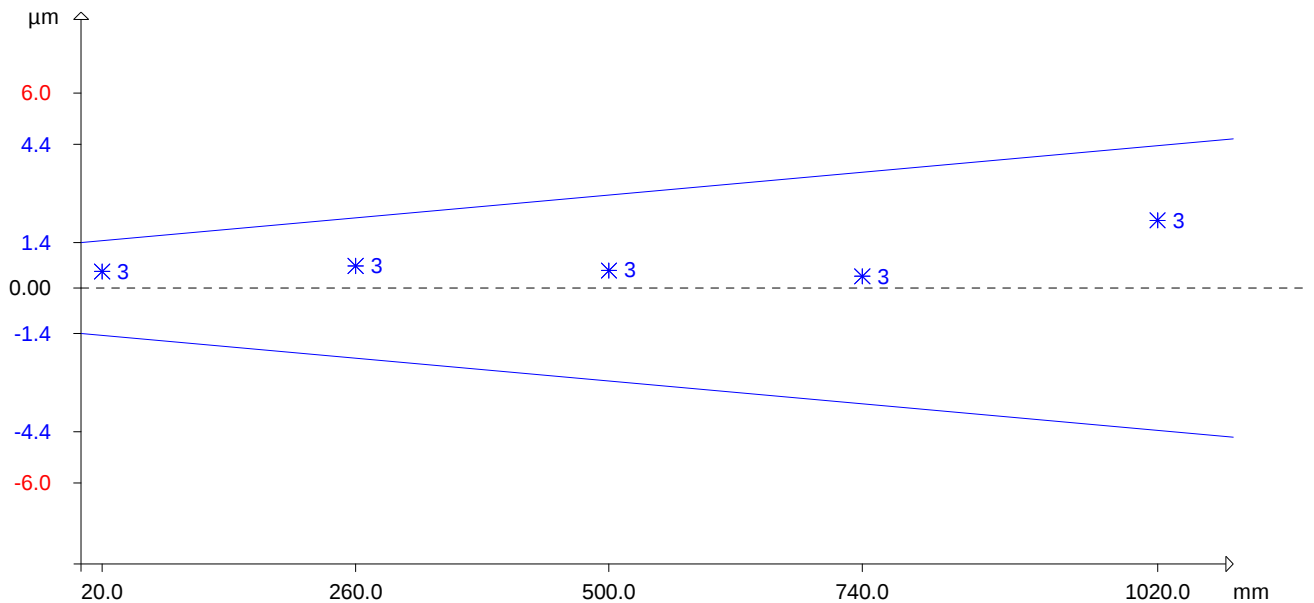
X [mm]:	858.4299	X [cos]:	-0.509	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	929.326	Y [cos]:	-0.4978	Pitch position [g]:	-45.0
Z [mm]:	-994.6571	Z [cos]:	0.7022		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.46	26.46
Y temperature [°C]:	26.1	26.1
Z temperature [°C]:	26.44	26.44
Part temperature [°C]:	25.98	25.98

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00800	±1.46	0.51
260.07022	260.07090	±2.18	0.68
500.04516	500.04570	±2.90	0.54
740.01874	740.01910	±3.62	0.36
1019.96622	1019.96830	±4.46	2.08
20.00749	20.00800	±1.46	0.51
260.07022	260.07120	±2.18	0.98
500.04516	500.04600	±2.90	0.84
740.01874	740.01930	±3.62	0.56
1019.96622	1019.96830	±4.46	2.08
20.00749	20.00810	±1.46	0.61
260.07022	260.07130	±2.18	1.08
500.04516	500.04590	±2.90	0.74
740.01874	740.01930	±3.62	0.56
1019.96622	1019.96850	±4.46	2.28





Position (Volume 2 Position 1)

18-mar-2015 10:44

Gauge position and Probe orientation

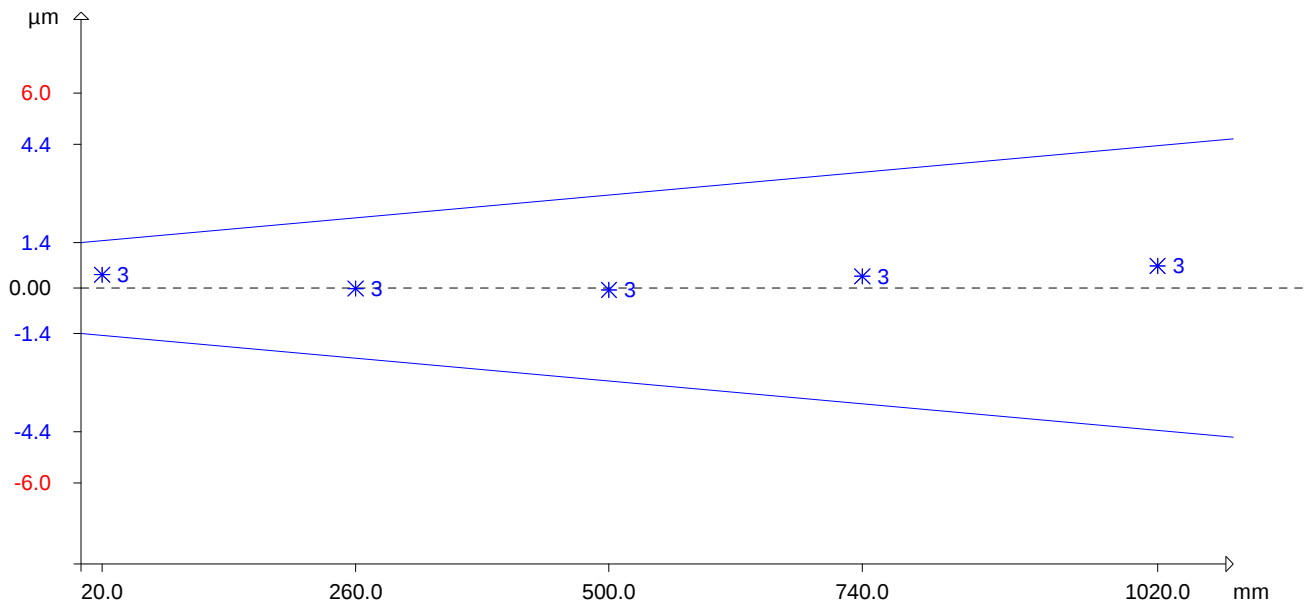
X [mm]:	1107.6429	X [cos]:	-0.9999	Roll position [g]:	0.0
Y [mm]:	1530.6262	Y [cos]:	-0.0025	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-626.6321	Z [cos]:	0.0099		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.57	25.57
Y temperature [°C]:	25.65	25.65
Z temperature [°C]:	25.41	25.41
Part temperature [°C]:	25.3	25.3

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00800	±1.46	0.51
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04530	±2.90	0.14
740.01874	740.01930	±3.62	0.56
1019.96622	1019.96700	±4.46	0.78
20.00749	20.00790	±1.46	0.41
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04540	±2.90	0.24
740.01874	740.01910	±3.62	0.36
1019.96622	1019.96690	±4.46	0.68
20.00749	20.00790	±1.46	0.41
260.07022	260.07020	±2.18	-0.02
500.04516	500.04510	±2.90	-0.06
740.01874	740.01920	±3.62	0.46
1019.96622	1019.96690	±4.46	0.68





Position (Volume 2 Position 2)

18-mar-2015 11:16

Gauge position and Probe orientation

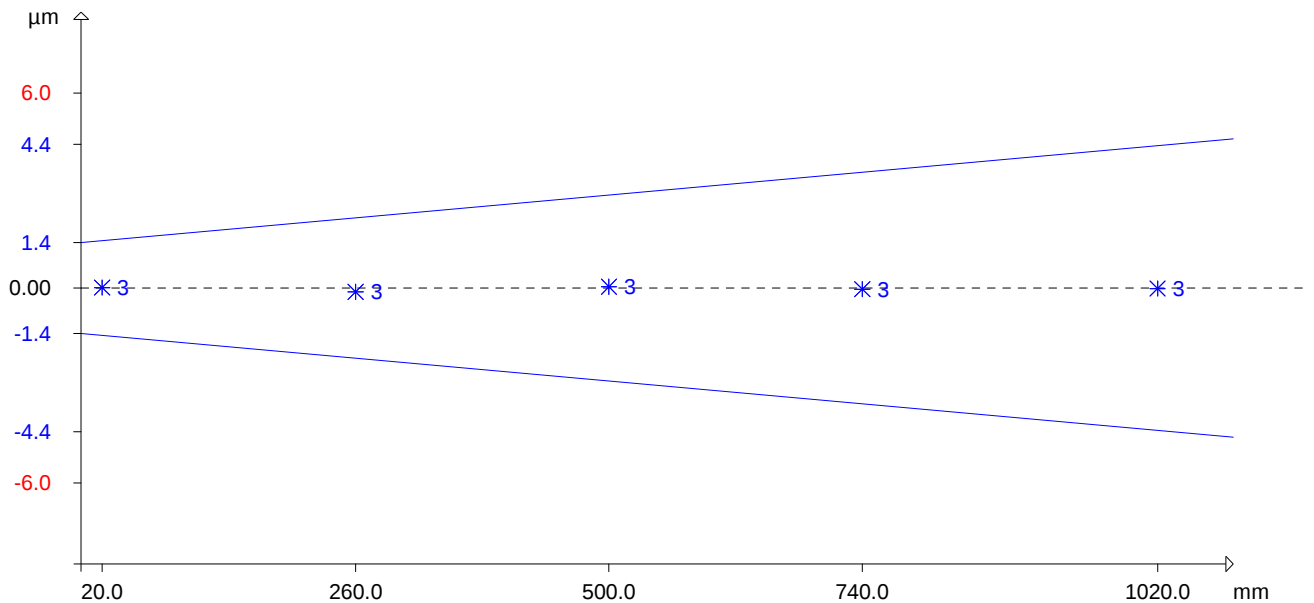
X [mm]:	550.2683	X [cos]:	-0.002	Roll position [g]:	0.0
Y [mm]:	762.4863	Y [cos]:	1.0	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-626.5387	Z [cos]:	0.0097		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.73	25.73
Y temperature [°C]:	25.67	25.67
Z temperature [°C]:	25.59	25.59
Part temperature [°C]:	25.35	25.35

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00750	±1.46	0.01
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04530	±2.90	0.14
740.01874	740.01880	±3.62	0.06
1019.96622	1019.96650	±4.46	0.28
20.00749	20.00760	±1.46	0.11
260.07022	260.07020	±2.18	-0.02
500.04516	500.04520	±2.90	0.04
740.01874	740.01870	±3.62	-0.04
1019.96622	1019.96640	±4.46	0.18
20.00749	20.00750	±1.46	0.01
260.07022	260.07010	±2.18	-0.12
500.04516	500.04520	±2.90	0.04
740.01874	740.01870	±3.62	-0.04
1019.96622	1019.96620	±4.46	-0.02





Position (Volume 2 Position 3)

18-mar-2015 12:18

Gauge position and Probe orientation

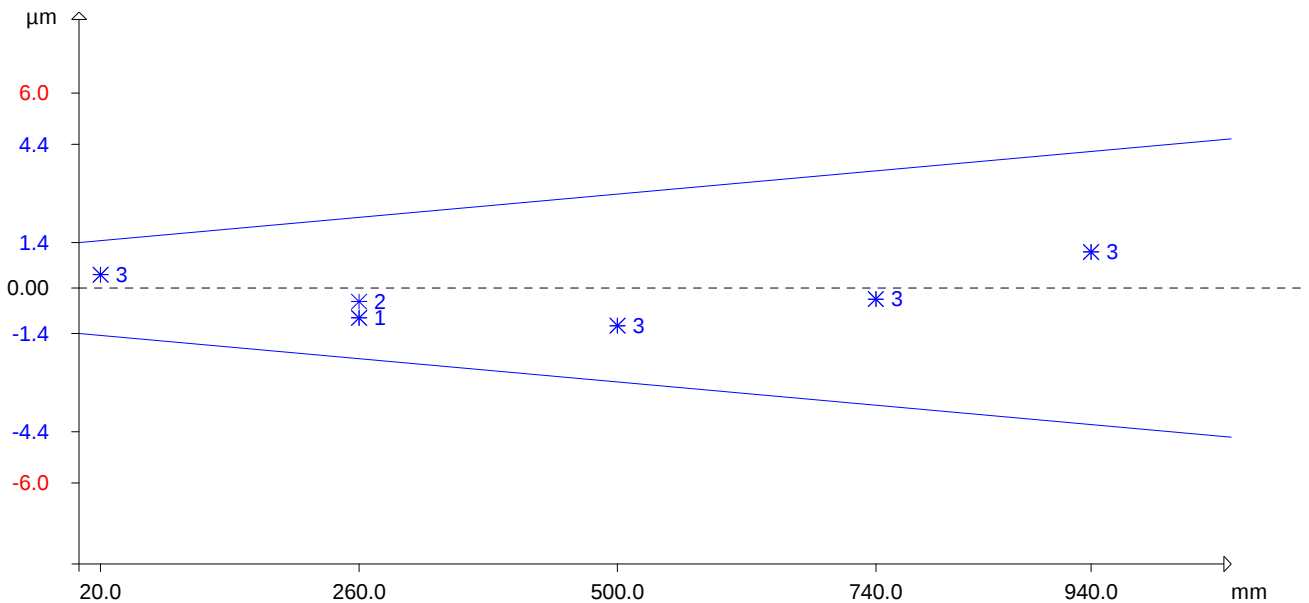
X [mm]:	704.7501	X [cos]:	0.0053	Roll position [g]:	90.0
Y [mm]:	1248.8498	Y [cos]:	-0.0076	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-979.1524	Z [cos]:	1.0		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.93	25.93
Y temperature [°C]:	25.72	25.72
Z temperature [°C]:	25.83	25.83
Part temperature [°C]:	25.63	25.63

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00800	±1.46	0.51
260.07022	260.07010	±2.18	-0.12
500.04516	500.04410	±2.90	-1.06
740.01874	740.01840	±3.62	-0.34
939.98659	939.98770	±4.22	1.11
20.00749	20.00790	±1.46	0.41
260.07022	260.06980	±2.18	-0.42
500.04516	500.04400	±2.90	-1.16
740.01874	740.01860	±3.62	-0.14
939.98659	939.98770	±4.22	1.11
20.00749	20.00820	±1.46	0.71
260.07022	260.06930	±2.18	-0.92
500.04516	500.04420	±2.90	-0.96
740.01874	740.01870	±3.62	-0.04
939.98659	939.98800	±4.22	1.41





Position (Volume 2 Position 4)

18-mar-2015 15:22

Gauge position and Probe orientation

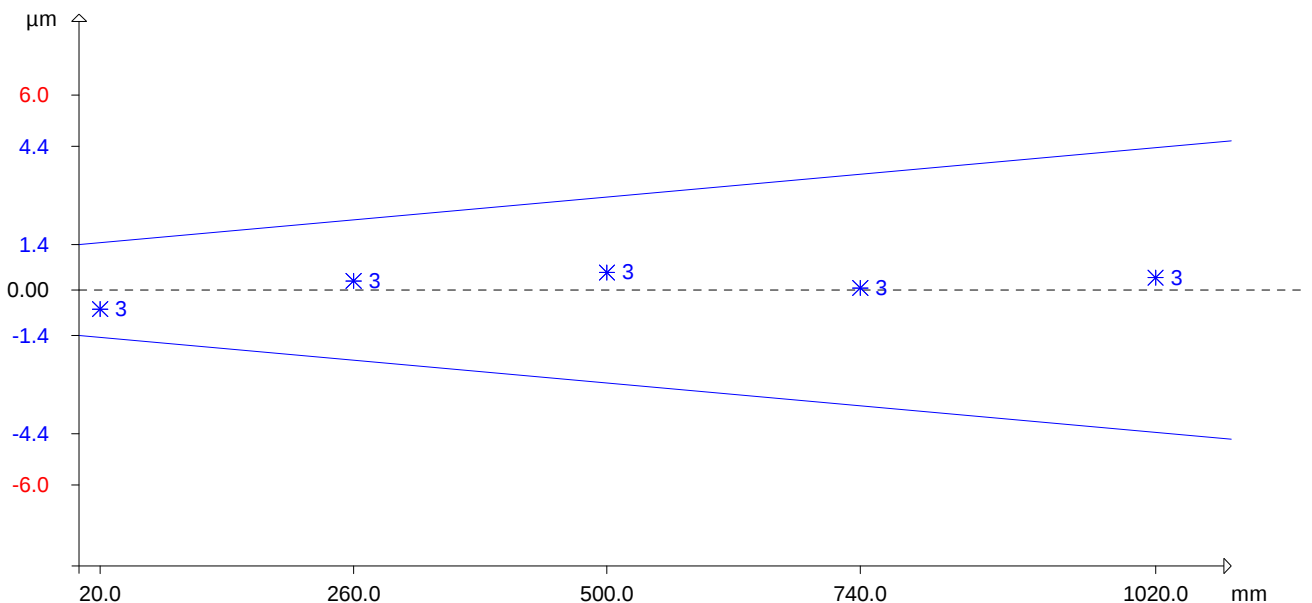
X [mm]:	337.1156	X [cos]:	0.5203	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	1377.1101	Y [cos]:	0.4854	Pitch position [g]:	135.0
Z [mm]:	-995.0223	Z [cos]:	0.7026		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.4	26.4
Y temperature [°C]:	25.88	25.88
Z temperature [°C]:	26.41	26.41
Part temperature [°C]:	25.65	25.65

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00700	±1.46	-0.49
260.07022	260.07070	±2.18	0.48
500.04516	500.04570	±2.90	0.54
740.01874	740.01880	±3.62	0.06
1019.96622	1019.96680	±4.46	0.58
20.00749	20.00690	±1.46	-0.59
260.07022	260.07060	±2.18	0.38
500.04516	500.04570	±2.90	0.54
740.01874	740.01890	±3.62	0.16
1019.96622	1019.96660	±4.46	0.38
20.00749	20.00690	±1.46	-0.59
260.07022	260.07050	±2.18	0.28
500.04516	500.04570	±2.90	0.54
740.01874	740.01890	±3.62	0.16
1019.96622	1019.96670	±4.46	0.48





Position (Volume 2 Position 5)

18-mar-2015 14:58

Gauge position and Probe orientation

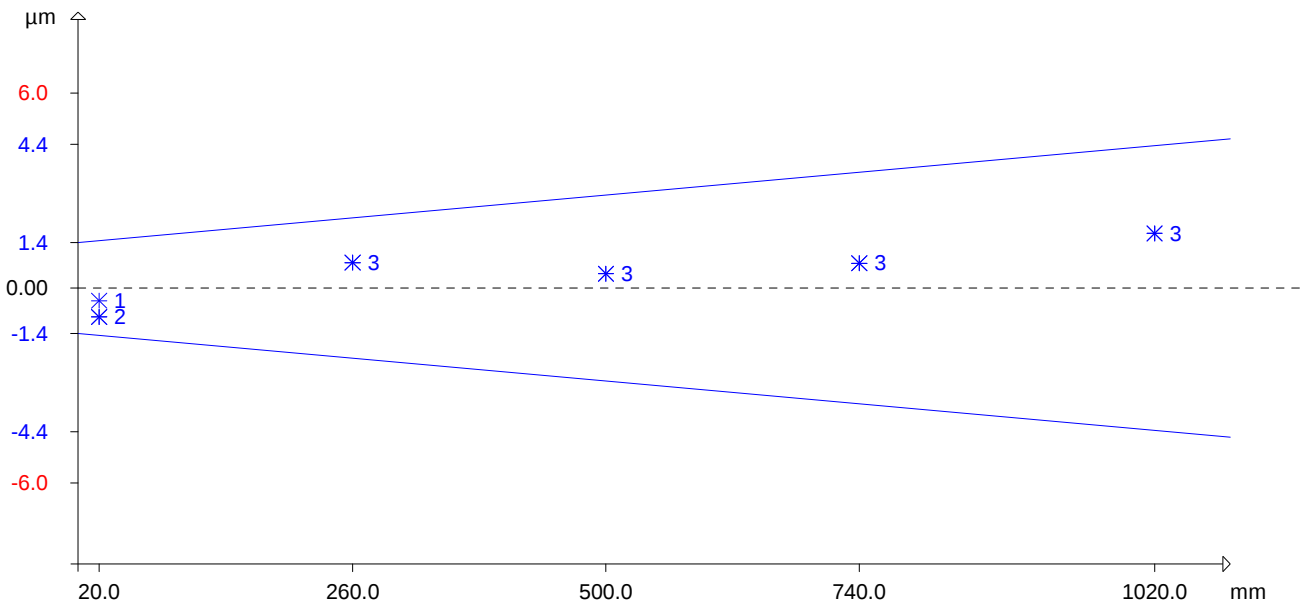
X [mm]:	844.8594	X [cos]:	-0.5008	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	1410.4428	Y [cos]:	0.5053	Pitch position [g]:	-135.0
Z [mm]:	-995.0547	Z [cos]:	0.7028		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.37	26.37
Y temperature [°C]:	25.86	25.86
Z temperature [°C]:	26.38	26.38
Part temperature [°C]:	25.6	25.6

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00710	±1.46	-0.39
260.07022	260.07130	±2.18	1.08
500.04516	500.04570	±2.90	0.54
740.01874	740.01970	±3.62	0.96
1019.96622	1019.96820	±4.46	1.98
20.00749	20.00660	±1.46	-0.89
260.07022	260.07110	±2.18	0.88
500.04516	500.04570	±2.90	0.54
740.01874	740.01970	±3.62	0.96
1019.96622	1019.96790	±4.46	1.68
20.00749	20.00660	±1.46	-0.89
260.07022	260.07100	±2.18	0.78
500.04516	500.04560	±2.90	0.44
740.01874	740.01950	±3.62	0.76
1019.96622	1019.96790	±4.46	1.68





Position (Volume 2 Position 6)

18-mar-2015 15:06

Gauge position and Probe orientation

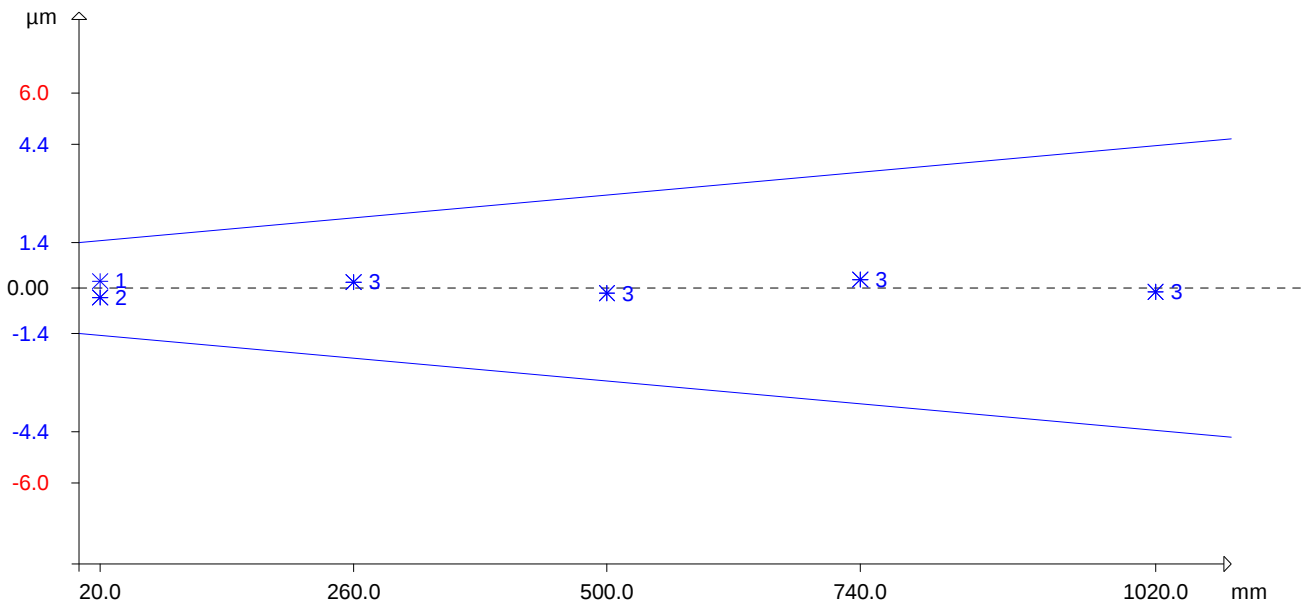
X [mm]:	330.7223	X [cos]:	0.5139	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	1854.09	Y [cos]:	-0.492	Pitch position [g]:	45.0
Z [mm]:	-995.0342	Z [cos]:	0.7027		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.38	26.38
Y temperature [°C]:	25.86	25.86
Z temperature [°C]:	26.39	26.39
Part temperature [°C]:	25.63	25.63

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00770	±1.46	0.21
260.07022	260.07050	±2.18	0.28
500.04516	500.04500	±2.90	-0.16
740.01874	740.01900	±3.62	0.26
1019.96622	1019.96610	±4.46	-0.12
20.00749	20.00730	±1.46	-0.19
260.07022	260.07040	±2.18	0.18
500.04516	500.04530	±2.90	0.14
740.01874	740.01910	±3.62	0.36
1019.96622	1019.96610	±4.46	-0.12
20.00749	20.00720	±1.46	-0.29
260.07022	260.07050	±2.18	0.28
500.04516	500.04510	±2.90	-0.06
740.01874	740.01910	±3.62	0.36
1019.96622	1019.96640	±4.46	0.18





Position (Volume 2 Position 7)

18-mar-2015 15:13

Gauge position and Probe orientation

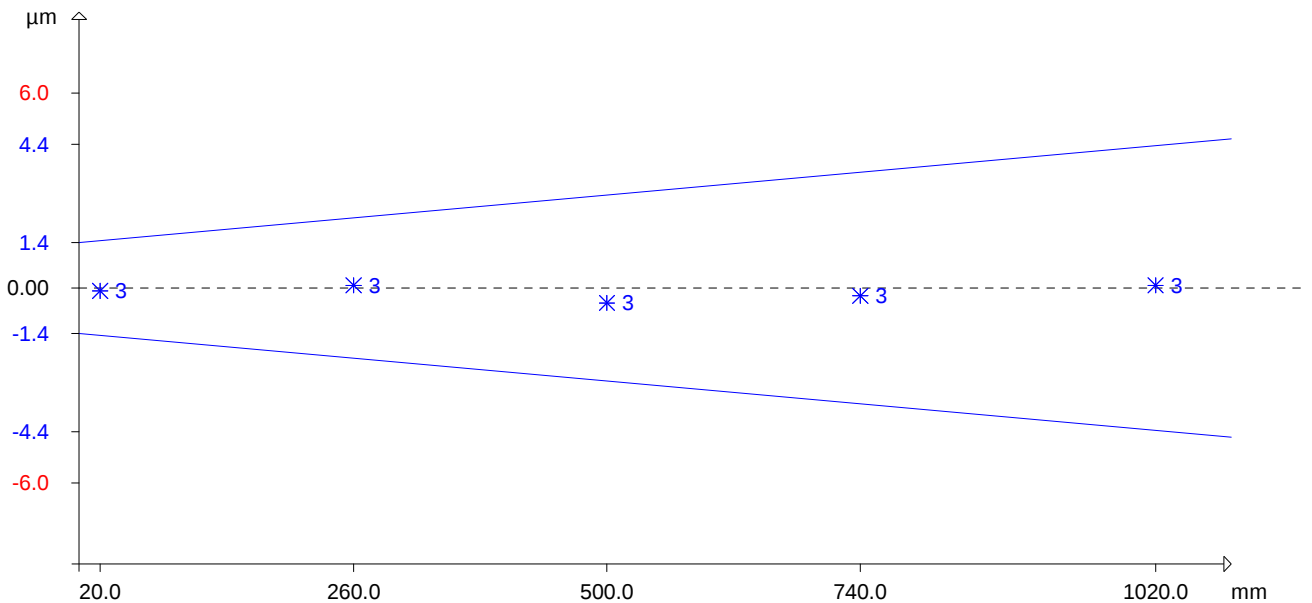
X [mm]:	910.5365	X [cos]:	-0.5226	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	1792.4472	Y [cos]:	-0.483	Pitch position [g]:	-45.0
Z [mm]:	-994.9296	Z [cos]:	0.7025		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.39	26.39
Y temperature [°C]:	25.87	25.87
Z temperature [°C]:	26.4	26.4
Part temperature [°C]:	25.63	25.63

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00740	±1.46	-0.09
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04500	±2.90	-0.16
740.01874	740.01870	±3.62	-0.04
1019.96622	1019.96630	±4.46	0.08
20.00749	20.00750	±1.46	0.01
260.07022	260.07060	±2.18	0.38
500.04516	500.04470	±2.90	-0.46
740.01874	740.01850	±3.62	-0.24
1019.96622	1019.96630	±4.46	0.08
20.00749	20.00740	±1.46	-0.09
260.07022	260.07050	±2.18	0.28
500.04516	500.04480	±2.90	-0.36
740.01874	740.01850	±3.62	-0.24
1019.96622	1019.96630	±4.46	0.08





Position (Volume 3 Position 1)

18-mar-2015 10:59

Gauge position and Probe orientation

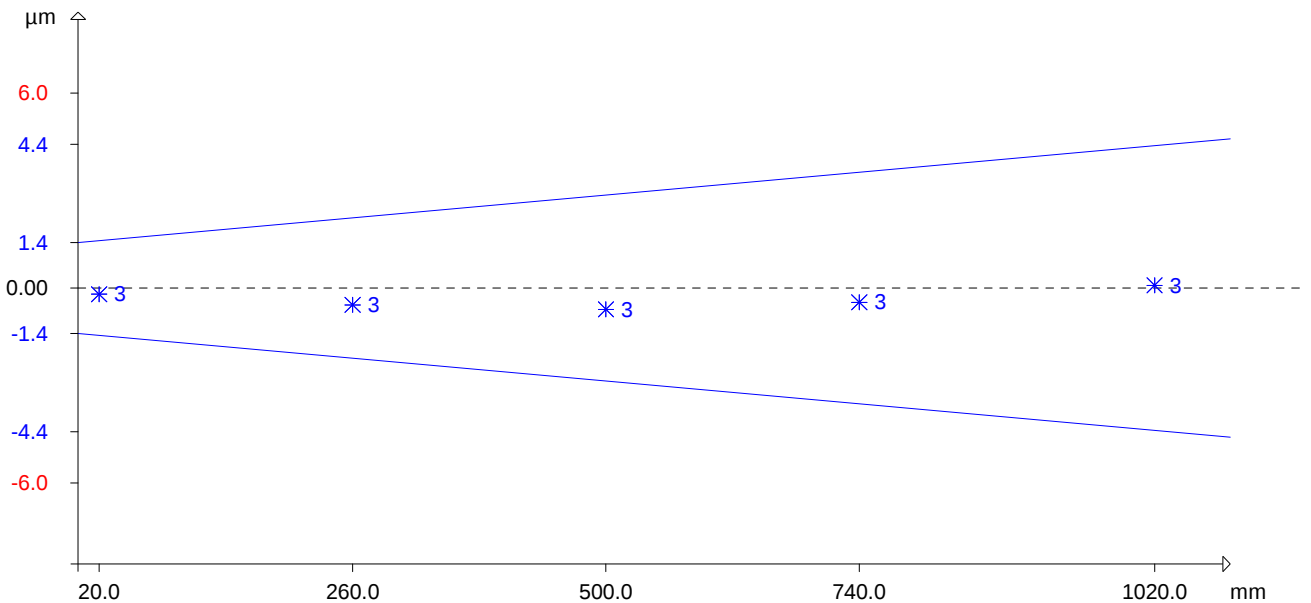
X [mm]:	1114.182	X [cos]:	-0.9999	Roll position [g]:	0.0
Y [mm]:	2616.9747	Y [cos]:	-0.0052	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-626.5402	Z [cos]:	0.0098		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.63	25.63
Y temperature [°C]:	25.67	25.67
Z temperature [°C]:	25.48	25.48
Part temperature [°C]:	25.34	25.34

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00740	±1.46	-0.09
260.07022	260.06970	±2.18	-0.52
500.04516	500.04450	±2.90	-0.66
740.01874	740.01830	±3.62	-0.44
1019.96622	1019.96630	±4.46	0.08
20.00749	20.00730	±1.46	-0.19
260.07022	260.06980	±2.18	-0.42
500.04516	500.04450	±2.90	-0.66
740.01874	740.01830	±3.62	-0.44
1019.96622	1019.96640	±4.46	0.18
20.00749	20.00730	±1.46	-0.19
260.07022	260.06970	±2.18	-0.52
500.04516	500.04460	±2.90	-0.56
740.01874	740.01850	±3.62	-0.24
1019.96622	1019.96650	±4.46	0.28





Position (Volume 3 Position 2)

18-mar-2015 11:28

Gauge position and Probe orientation

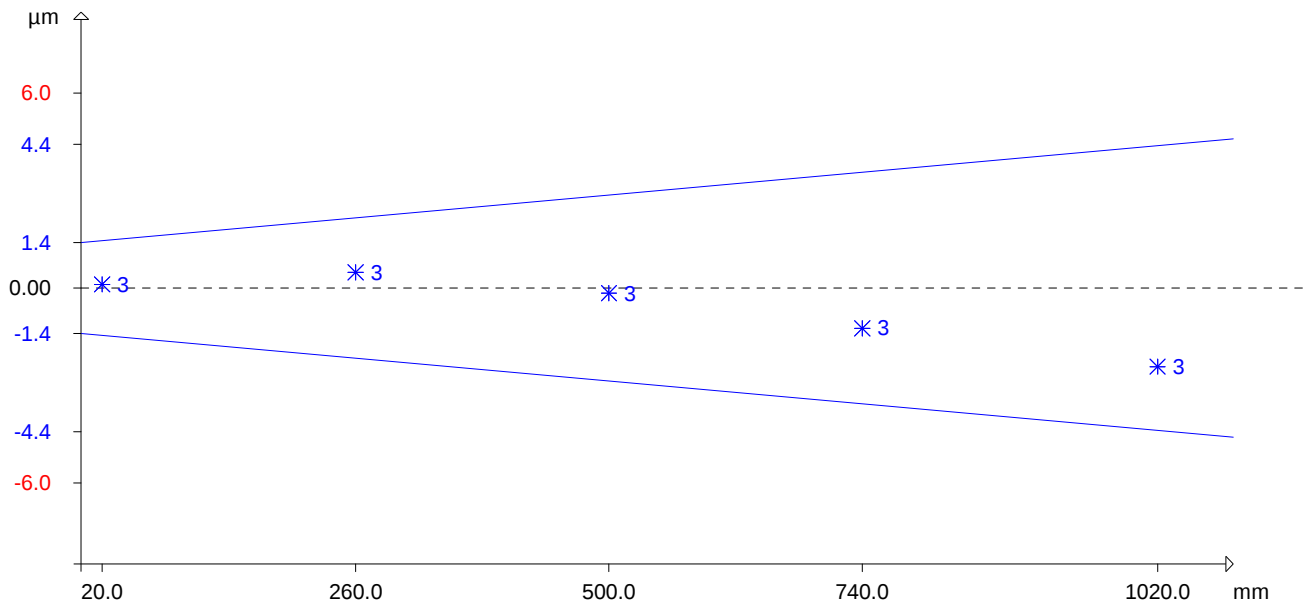
X [mm]:	529.8509	X [cos]:	0.0001	Roll position [g]:	0.0
Y [mm]:	1957.2944	Y [cos]:	1.0	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-626.5365	Z [cos]:	0.0097		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.77	25.77
Y temperature [°C]:	25.67	25.67
Z temperature [°C]:	25.63	25.63
Part temperature [°C]:	25.33	25.33

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00770	±1.46	0.21
260.07022	260.07080	±2.18	0.58
500.04516	500.04500	±2.90	-0.16
740.01874	740.01750	±3.62	-1.24
1019.96622	1019.96380	±4.46	-2.42
20.00749	20.00760	±1.46	0.11
260.07022	260.07080	±2.18	0.58
500.04516	500.04510	±2.90	-0.06
740.01874	740.01750	±3.62	-1.24
1019.96622	1019.96380	±4.46	-2.42
20.00749	20.00770	±1.46	0.21
260.07022	260.07070	±2.18	0.48
500.04516	500.04500	±2.90	-0.16
740.01874	740.01750	±3.62	-1.24
1019.96622	1019.96390	±4.46	-2.32





Position (Volume 3 Position 3)

18-mar-2015 12:25

Gauge position and Probe orientation

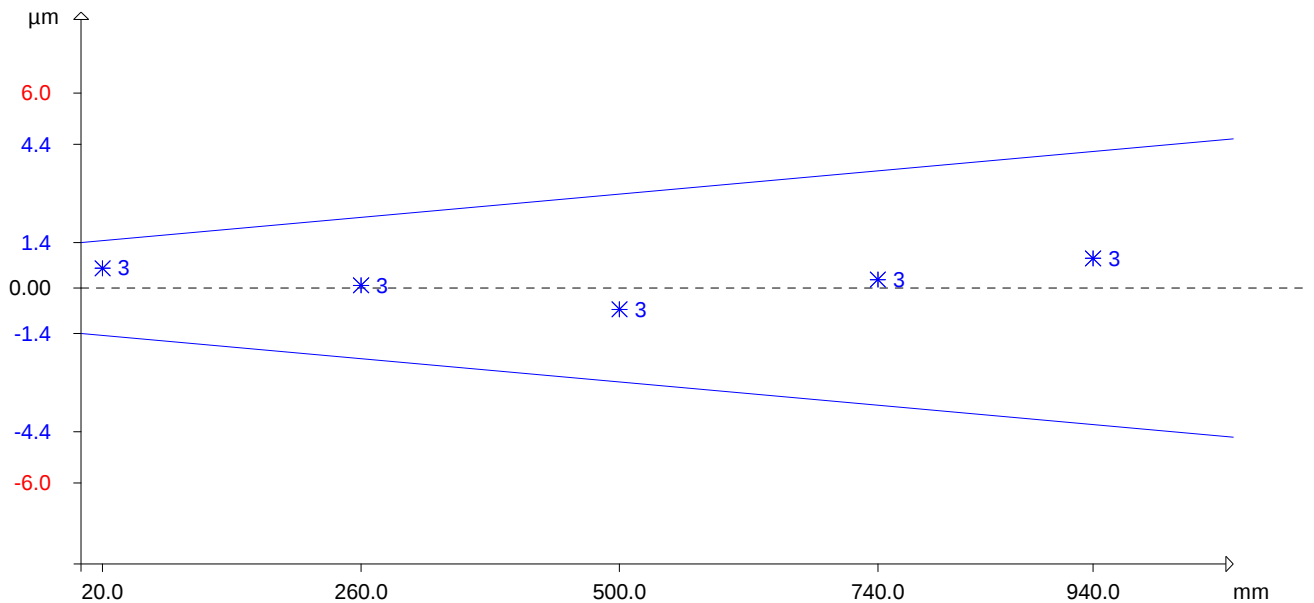
X [mm]:	541.943	X [cos]:	-0.0103	Roll position [g]:	90.0
Y [mm]:	2238.5463	Y [cos]:	0.0	Pitch position [g]:	0.0
Z [mm]:	-979.5244	Z [cos]:	0.9999		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	25.97	25.97
Y temperature [°C]:	25.75	25.75
Z temperature [°C]:	25.87	25.87
Part temperature [°C]:	25.71	25.71

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00840	±1.46	0.91
260.07022	260.07060	±2.18	0.38
500.04516	500.04450	±2.90	-0.66
740.01874	740.01900	±3.62	0.26
939.98659	939.98750	±4.22	0.91
20.00749	20.00820	±1.46	0.71
260.07022	260.07060	±2.18	0.38
500.04516	500.04470	±2.90	-0.46
740.01874	740.01930	±3.62	0.56
939.98659	939.98760	±4.22	1.01
20.00749	20.00810	±1.46	0.61
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04460	±2.90	-0.56
740.01874	740.01900	±3.62	0.26
939.98659	939.98760	±4.22	1.01





Position (Volume 3 Position 4)

19-mar-2015 11:20

Gauge position and Probe orientation

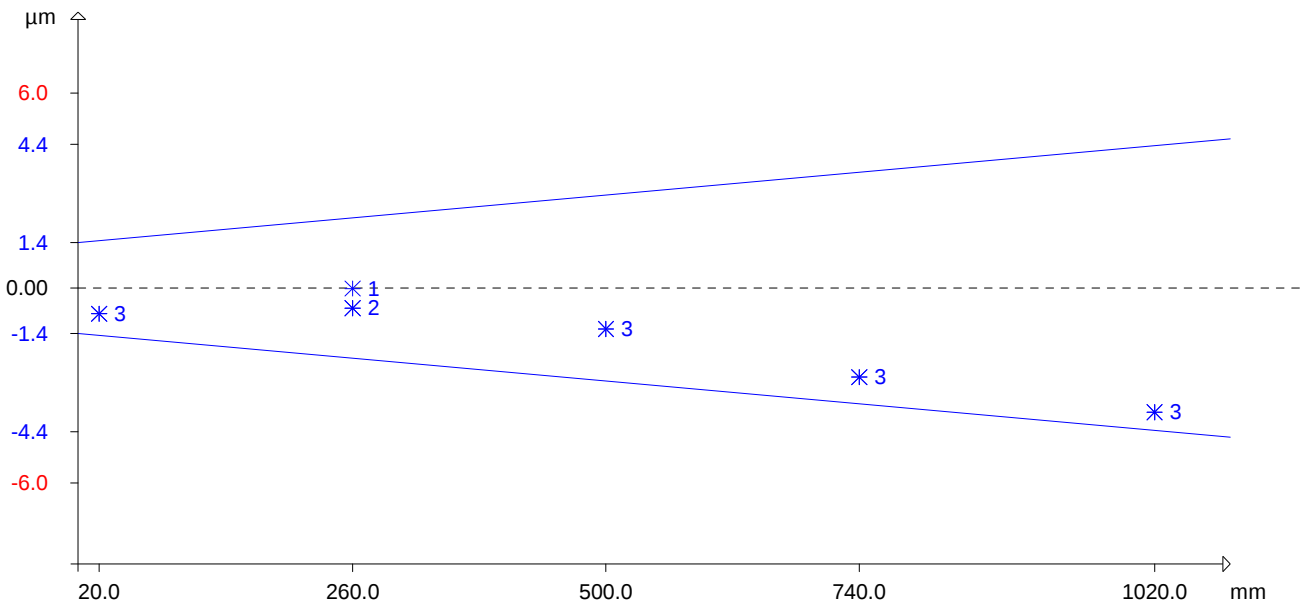
X [mm]:	311.0482	X [cos]:	0.4732	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	2351.2981	Y [cos]:	0.5321	Pitch position [g]:	135.0
Z [mm]:	-994.6032	Z [cos]:	0.7021		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.62	26.62
Y temperature [°C]:	26.12	26.12
Z temperature [°C]:	26.62	26.62
Part temperature [°C]:	26.11	26.11

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00690	±1.46	-0.59
260.07022	260.07020	±2.18	-0.02
500.04516	500.04430	±2.90	-0.86
740.01874	740.01630	±3.62	-2.44
1019.96622	1019.96270	±4.46	-3.52
20.00749	20.00670	±1.46	-0.79
260.07022	260.06970	±2.18	-0.52
500.04516	500.04410	±2.90	-1.06
740.01874	740.01620	±3.62	-2.54
1019.96622	1019.96250	±4.46	-3.72
20.00749	20.00670	±1.46	-0.79
260.07022	260.06960	±2.18	-0.62
500.04516	500.04390	±2.90	-1.26
740.01874	740.01600	±3.62	-2.74
1019.96622	1019.96240	±4.46	-3.82





Position (Volume 3 Position 5)

19-mar-2015 11:15

Gauge position and Probe orientation

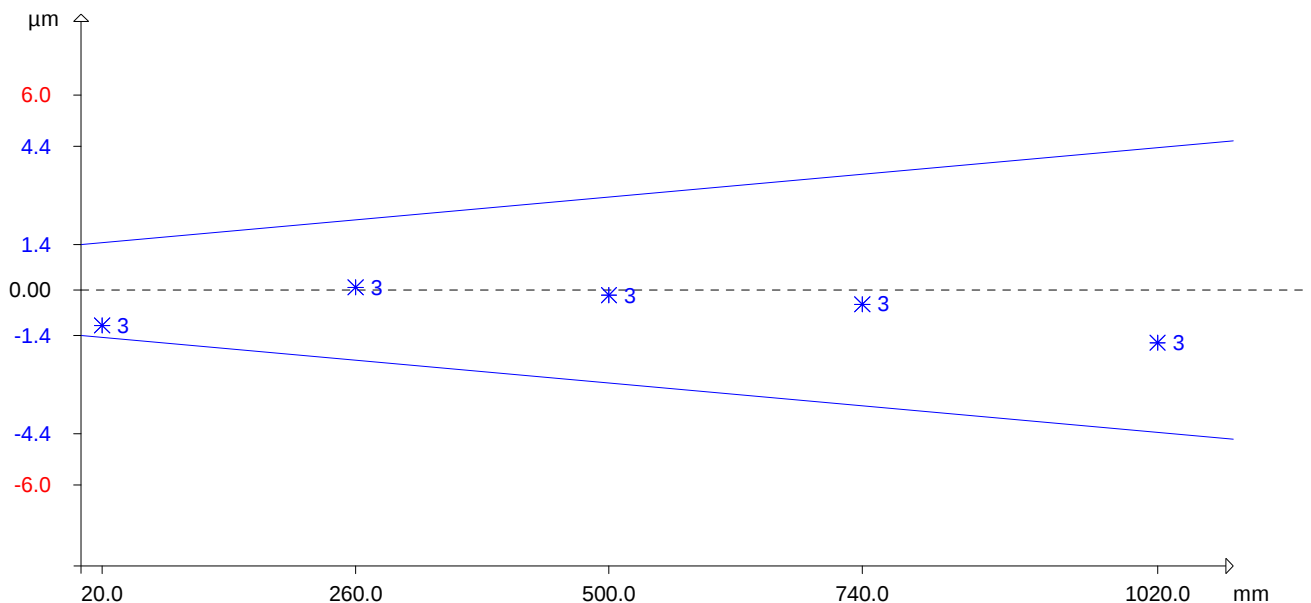
X [mm]:	802.2991	X [cos]:	-0.5076	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	2227.1899	Y [cos]:	0.4989	Pitch position [g]:	-135.0
Z [mm]:	-994.7956	Z [cos]:	0.7024		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.6	26.6
Y temperature [°C]:	26.12	26.12
Z temperature [°C]:	26.61	26.61
Part temperature [°C]:	26.09	26.09

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00640	±1.46	-1.09
260.07022	260.07070	±2.18	0.48
500.04516	500.04530	±2.90	0.14
740.01874	740.01860	±3.62	-0.14
1019.96622	1019.96500	±4.46	-1.22
20.00749	20.00640	±1.46	-1.09
260.07022	260.07040	±2.18	0.18
500.04516	500.04530	±2.90	0.14
740.01874	740.01850	±3.62	-0.24
1019.96622	1019.96460	±4.46	-1.62
20.00749	20.00640	±1.46	-1.09
260.07022	260.07030	±2.18	0.08
500.04516	500.04500	±2.90	-0.16
740.01874	740.01830	±3.62	-0.44
1019.96622	1019.96480	±4.46	-1.42





Position (Volume 3 Position 6)

19-mar-2015 11:30

Gauge position and Probe orientation

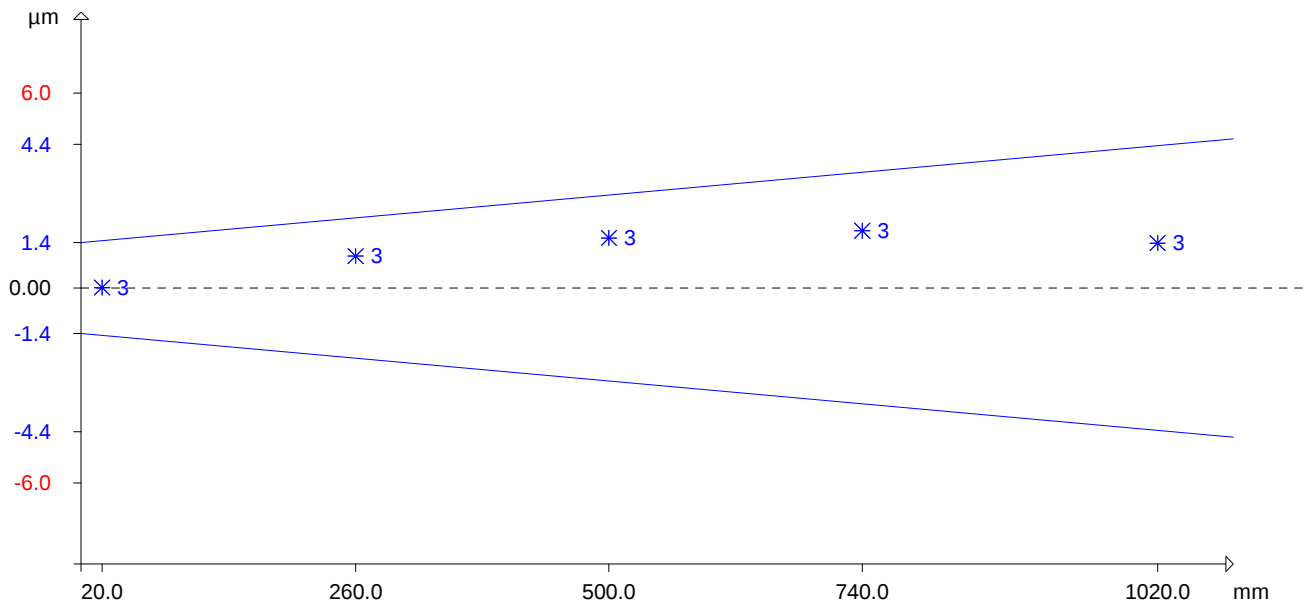
X [mm]:	361.7505	X [cos]:	0.5045	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	2856.4571	Y [cos]:	-0.5025	Pitch position [g]:	45.0
Z [mm]:	-994.6441	Z [cos]:	0.7021		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.66	26.66
Y temperature [°C]:	26.13	26.13
Z temperature [°C]:	26.67	26.67
Part temperature [°C]:	26.16	26.16

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00760	±1.46	0.11
260.07022	260.07120	±2.18	0.98
500.04516	500.04670	±2.90	1.54
740.01874	740.02050	±3.62	1.76
1019.96622	1019.96780	±4.46	1.58
20.00749	20.00770	±1.46	0.21
260.07022	260.07130	±2.18	1.08
500.04516	500.04690	±2.90	1.74
740.01874	740.02050	±3.62	1.76
1019.96622	1019.96780	±4.46	1.58
20.00749	20.00750	±1.46	0.01
260.07022	260.07130	±2.18	1.08
500.04516	500.04680	±2.90	1.64
740.01874	740.02050	±3.62	1.76
1019.96622	1019.96760	±4.46	1.38





Position (Volume 3 Position 7)

19-mar-2015 11:36

Gauge position and Probe orientation

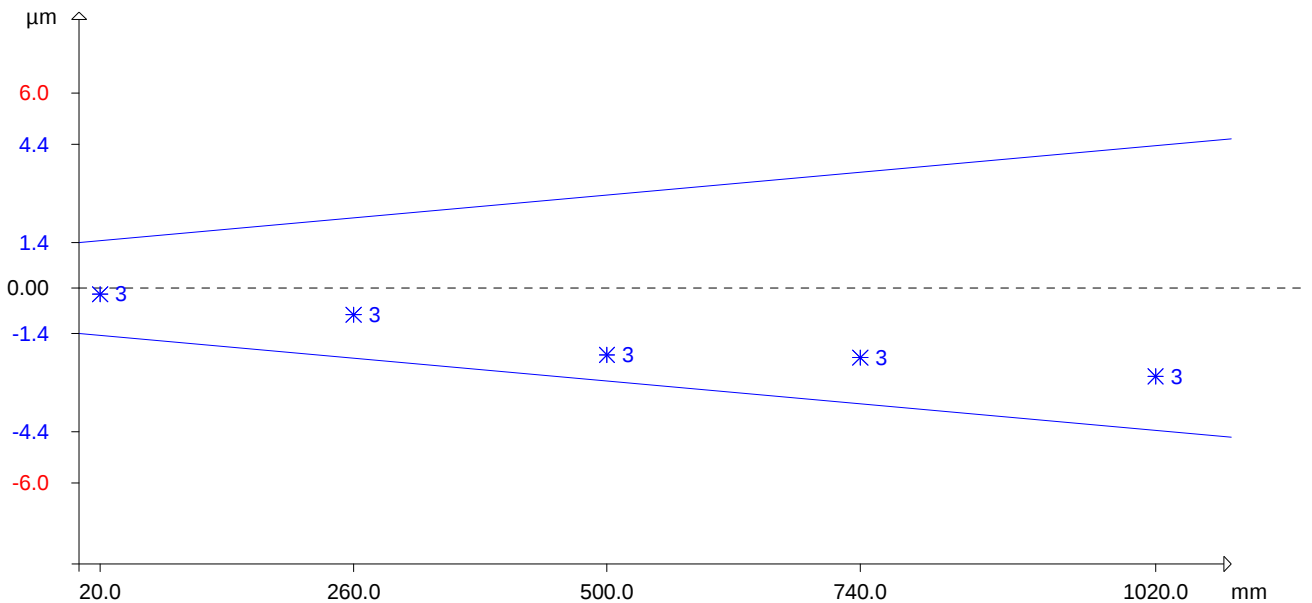
X [mm]:	793.4794	X [cos]:	-0.4884	Roll position [g]:	45.0
Y [mm]:	2836.1182	Y [cos]:	-0.518	Pitch position [g]:	-45.0
Z [mm]:	-994.694	Z [cos]:	0.7022		

Environment

	Before	After
Air temperature [°C]:	25.0	25.0
Air humidity [%]:	----	----
X temperature [°C]:	26.68	26.68
Y temperature [°C]:	26.14	26.14
Z temperature [°C]:	26.68	26.68
Part temperature [°C]:	26.19	26.19

Results

Nominal [mm]	Measured [mm]	Tolerance [μm]	Deviation [μm]
20.00749	20.00740	±1.46	-0.09
260.07022	260.06940	±2.18	-0.82
500.04516	500.04310	±2.90	-2.06
740.01874	740.01660	±3.62	-2.14
1019.96622	1019.96350	±4.46	-2.72
20.00749	20.00730	±1.46	-0.19
260.07022	260.06950	±2.18	-0.72
500.04516	500.04330	±2.90	-1.86
740.01874	740.01670	±3.62	-2.04
1019.96622	1019.96380	±4.46	-2.42
20.00749	20.00730	±1.46	-0.19
260.07022	260.06940	±2.18	-0.82
500.04516	500.04320	±2.90	-1.96
740.01874	740.01660	±3.62	-2.14
1019.96622	1019.96360	±4.46	-2.62





Probe Error (Volume 1 Position 1)

Probe Info

Probe Model (head):	TesaStar M DEA	Probe serial number:	7B003401
Sensor Model:	LSP - X1S	Sensor serial number:	M00-114-006-000
Probe Extension [mm]:	0.0	Roll position [g]:	0.0
Tip length [mm]:	50.0	Pitch position [g]:	0.0
Tip diameter [mm]:	5.0		

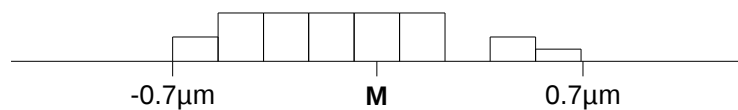
Gauge Position

X [mm]: **544.1736**
Y [mm]: **1423.3792**
Z [mm]: **-864.3217**

Results

Num	Measured [μm]	Num	Measured [μm]	Num	Measured [μm]
1	-0.1	10	0.1	19	0.0
2	-0.2	11	-0.2	20	-0.3
3	-0.2	12	0.5	21	-0.2
4	-0.3	13	-0.4	22	0.3
5	-0.3	14	0.1	23	0.7
6	0.2	15	-0.5	24	-0.5
7	0.1	16	-0.1	25	0.1
8	0.6	17	0.2		
9	0.0	18	0.2		

Tolerance [μm]: **1.4**
Radial Deviation [μm]: **1.2**



Hexagon Metrology S.p.A.

Servizio Assistenza Tecnica: Tel. 011.68055273 - 02.615411

CALIBRATION N°:

0GLOD000862IA1503171141

M/C: **Global Advantage** S/N:

HEXAGON MET **GLOD000862IA**

Date: **03/19/2015** Expired: **03/19/2016**