

Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen,
Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen,
Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen

Tyviko-projektin loppuraportti

Tyviko-projektin loppuraportti

Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen & Jari Ulkuniemi

VTT

Markku Kananen, Markku Valtonen,
Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen

Oulun yliopisto



ISBN 978-951-38-7655-5 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7656-2 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2010

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Toimitus Mirjami Pullinen

Edita Prima Oy, Helsinki 2010

Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen, Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen, Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen. Tyviko-projektin loppuraportti [Short results of Tyviko project]. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2553. 74 s. + liitt. 6 s.

Avainsanat machine tool compensation, accuracy, lifetime

Tiivistelmä

Tyviko-projekti keskittyi NC-työstökoneissa esiintyvien systemaattisten virheiden korjaamiseen. Korjaaminen perustuu koneen tiedonsiirrossa olevan datan kompensoimiseen tehtyjen mittausten perusteella. Kompensaatiolla ja/tai tarkkuuden parantamisella voi olla kaksi tarkoitusta, joista molemmilla on selkeä hyöty teollisuudelle: saavuttaa entistä parempi tarkkuus jo tarkoille koneille ja siten mahdollistaa tarkkuus- tai mikromekaanisten osien entistä tarkempi valmistus tai pidentää koneiden elinikää. Molemmissa tapauksissa taloudellinen merkitys yritykselle korostuu, varsinkin kun Tyviko-menetelmän implementointi on varsin edullista. Tässä vaiheessa kustannuksiksi on laskettu (mikäli menetelmä tuoteistettaisiin) noin 15–20 k€kerta. Näin ollen mikäli esimerkiksi työstökoneen elinikä voidaan pidentää seitsemästä vuodesta yhteentoista vuoteen, tulee keskihintaiselle työstökoneelle kaksivuorotyössä takaisinmaksuajaksi noin kolmesta viiteen kuukautta laskutavasta riippuen.

Projekti toteutettiin teknisesti ja taloudellisesti projektisuunnitelman mukaisesti. Erityisen aktiivinen ohjausryhmä edesauttoi ja ohjasi projektin etenemistä myönteisesti. Projektisuunnitelmassa esitetyt tavoitteet saavutettiin.

Teknisesti voitiin osoittaa, että mittaamalla koneistuskeskuksen systemaattiset virheet ja ohjaamalla konetta laskennallisen kompensoation mukaisesti koneen tarkkuutta voidaan oleellisesti parantaa. Toisessa esimerkkikoneessa koneen tarkkuus parani uutta vastaavaksi ja toisessa niin tarkaksi, että mittauskoneella saavutettava toleranssi asetti rajat analyysille. Koneiden iät olivat yhdeksän ja kuusitoista vuotta. Vieläkin iäkkäämmällä, vuonna 1987 hankitulla koneella yllettiin lähes tarkkuustyöstökoneen vastaaviin tuloksiin. Täten menetelmän taloudellinen hyöty voitiin selkeästi todentaa.

Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen, Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen, Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen. Tyviko-projektin loppuraportti [Short results of Tyviko project]. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2553. 74 p. + app. 6 p.

Keywords machine tool compensation, accuracy, lifetime

Abstract

Tyviko project focused on the systematic error compensation of NC machine tools via software. The method is based on machining a test piece, measuring it, forming an error map and using the map for correcting the tool paths of the program to compensate existing errors.

Results and conclusions:

- Tyviko-method can improve the precision of CNC-machines by over 50% or more.
- The method extends lifetime of older machinery by postponing the need for new investment for years.
- In new and (ultra) precision machines, the resolution power of the coordinate measuring machine might set the limits of improving the accuracy (nominal measuring accuracy).
- The error origins must be known.
- Standardization of machining parameters, tools and measuring instruments creates comparability of results.
- Approaching direction has a significant influence to the results.

Technically, it was shown that by measuring the systematic errors of machine tools and numerically calculating new, compensated parameters, accuracy of machine tools could be substantially improved. Accuracy of the one, tested machine tool became equivalent with a new one and with another machine tool results of the measuring machine set the limits of improving accuracy furthermore. Main machine tools were 9 and 16 years old. The testing of the method in the even older machine tool (from 1990), achieved accuracy was almost at the same as in a precision machine tool. Thus the economic benefits of the method could be clearly evidenced.

Alkusanat

Tyviko-projekti perustuu suomalaisen CNC-koneistusta tekevän teollisuuden tarpeeseen parantaa työstökoneiden tarkkuutta. Tarkkuuden parantamisella voi olla kaksi tarkoitusta:

- saavuttaa nykyistä parempi tarkkuus ja siten ylläpitää yritysten kilpailukykyä ilman kalliita investointeja konekantaan
- pidentää koneiden elinikää.

Projekti aloitettiin 1.2.2009, ja se päättyi 30.9.2010. Projekti kuuluu Tekesin SISU 2010 -teknologiaohjelmaan. Projektiin muodostettiin ohjausryhmä ja projektiryhmä, joihin kuuluivat seuraavat henkilöt:

Ohjausryhmä Prof. Jussi A. Karjalainen, Oulun yliopisto, TTL, puheenjohtaja
Kimmo K. Mäkelä, VTT, sihteeri
Kimmo Hyvärinen, Tasogears Oy
Reijo af Heurlin, Zenex Oy, varapuheenjohtaja
Veijo Korkiakoski, Tekes
Kari Koski, Cron-Tek Oy
Juho Pyhälä, Ata Gears Oy
Kari Kuutela, Pathrace Oy
Markku Kananen, Oulun yliopisto, TTL
Kimmo Jokelainen, VTT

Projektiryhmä Kimmo K. Mäkelä, VTT
Jouni Huopana, VTT
Jouko Heikkala, Oulun yliopisto, TTL
Markku Kananen, Oulun yliopisto, TTL
Markku Valtonen, Oulun yliopisto, TTL
Kimmo Jokelainen, VTT
Ahti Haapalainen, VTT
Jari Ulkuniemi, VTT
Tomi Seppänen, VTT

Raportin tekijät kiittävät ohjausryhmää erittäin aktiivisesta toiminnasta.

Oulu 8.9.2010

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1. Johdanto	9
1.1 Tavoitteet	9
1.2 Kohteen kuvaus	10
1.3 Rajaukset	12
2. Menetelmä ja toteutus.....	13
2.1 Menetelmän vaiheet.....	14
2.1.1 Vaihe 1 – mittaus.....	14
2.1.2 Vaihe 2 – mittaustulosten kierto ja siirto.....	15
2.1.3 Vaihe 3 – virheiden määrittäminen kaarien mukaan	17
2.1.4 Vaihe 4 – virheiden kuvaus polynomifunktioiden avulla	18
2.1.5 Vaihe 5 – virhekartan luonti polynomifunktiosta	18
2.1.6 Vaihe 6 – kartan alueella olevan geometrian kompensointi.....	19
2.2 Tason virheiden määrittäminen reikäsarjojen mukaan	20
2.3 Lähestymissuunnan vaikutus.....	21
2.4 Esimerkkejä piirteiden kompensoinnista muilla tavoilla	22
2.4.1 Esimerkki: tasojen yhtälöiden ratkaiseminen pistepilvestä	22
2.4.2 Esimerkki: akseleiden kääntövirheet vähintään kolmeakselisissa työstökoneissa.....	24
2.5 Mallista toteutettavaksi ohjelmaksi.....	24
3. Tulokset.....	26
3.1 Deckel Maho DMU200P, Ata Gears Oy.....	26
3.1.1 Akseleiden kääntötarkkuus ja tornin reikien paikoitustarkkuus	27
3.1.2 Torni: XZ-tasot.....	28
3.1.3 Torni YZ-tasot.....	29
3.1.4 Reikäsarjat: lähestymissuunnat ja tulokset	30
3.1.5 X-suunnan kompensointifunktiot reikäsarjojen mukaan	31
3.1.6 Y-suunnan kompensointifunktiot reikäsarjojen mukaan	34
3.1.7 Kaaret.....	35
3.1.8 Pinnat	40
3.1.9 Suorat.....	42
3.1.10 Yhteenveto tuloksista	43
3.2 Kitamura Mycenter, Tasogears Oy	44
3.2.1 Reikäsarjat ja Y-suunnan korjaavat funktiot.....	45
3.2.2 X- ja Y-akseleiden välinen kohtisuoruus	49
3.2.3 Kaaret ja pinta	49
3.2.4 Testikappale: kiilaura.....	53

3.2.5	Yhteenveto Kitamura Mycenterin tuloksista	56
3.3	Mitsui Seiki HR-5B (Oulun yliopisto)	57
3.4	Herme C30 (VTT), Hermle C40 (Oulu PMC osuuskunta) ja Yasda YBM-850V (Oulun yliopisto)	61
4.	Johtopäätökset ja yhteenveto	63
5.	Some results of Tyviko method when used in industrial CNC	68
5.1	The main results of Tyviko method:	68
5.2	Creating of machine tool -specific error map	71
5.3	Conclusions	73
	Lähdeluettelo	74

Liitteet

- Liite A: Rouhintapiirustus testikappaleelle (200 x 200 x 120)
- Liite B: Testikappaleen piirteet (200 x 200 x 120)
- Liite C: Rouhintapiirustus testikappaleelle (120 x 120 x 120)
- Liite D: Pohjan viimeistely testikappaleelle (120 x 120 x 120)
- Liite E: Testikappaleen mitat (120 x 120 x 120)
- Liite F: Kappaleiden kiinnitysijain työpiirustus (120 x 120 x 120)

1. Johdanto

Projektin tavoitteena oli luoda pohja systemaattisten virheiden korjaamiseksi CNC-työstökoneilla ilman fyysisiä muutoksia koneisiin. Tämä edesauttaisi yrityksiä kilpailukyvyssä ja toisaalta pienentäisi investointien määrää koneiden eliniän pidentyessä. Tämä on erityisen tärkeää nykyisessä kilpailutilanteessa, kun otetaan huomioon konepajateollisuuden investointivaltaisuus. Tyvikomenetelmällä todennettiin laboratorio-olosuhteissa testattuja onnistuneita kokeita ja tuloksia vietiin suomalaiseen teollisuuteen, erityisesti pk-yrityksiin. Hankkeen edistyessä tutkimusosapuolten osaamisen kehittymisen myötä tuli esille toivomus, että saataisiin luotua verkosto, jossa ohjelmistokehityksen kautta myös tässä projektissa saatua teknologiaosaamista voitaisiin kehittää ja hyödyntää jatkossa. Aiemmista tutkimuksista mainittakoon Oulun yliopiston konetekniikan osastolla valmistunut väitöskirja *Modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy in a software way* (Rahman, 2004). Teknologisesti kyse on systemaattisen virheen todentamisesta ja siihen liittyvästä ohjelmistopohjaisesta korjauksesta, jolloin pyritään korjaamaan virhe myös systemaattisesti.

1.1 Tavoitteet

Projektin tuloksilla pyrittiin osoittamaan, että ohjelmistollisilla muutoksilla voidaan normaalia CNC-ohjattua konetta ohjata tavalla, joka parantaa tarkkuutta. Näin voidaan valmistaa perinteisellä teknologialla huomattavan tarkkoja osia ilman erillisiä, kalliita investointeja erikoiskoneisiin. Tämä lisänee erityisesti suomalaisen teollisuuden etua ja kilpailukykyä. Periaatteellisesti voidaan siis sanoa, että yritysten tuotannon tarkkuus paranee ilman laiteinvestointeja, mikä parantaa yritysten kilpailukykyä ja mahdollisuutta vastata yhä vaativamman mekaniikan tarpeeseen sekä luo tilaisuuden laajentaa toimintaa uusille liiketoiminta-alueille ja kasvattaa liikevaihtoa.

1.2 Kohteen kuvaus

Projektin ohjausryhmässä määriteltiin koekoneet ja ensimmäisen vaiheen koesuunnitelma seuraavasti:

- Piirteet valittiin ja mallinnettiin koneille Hermle C30 (VTT), Hermle C40 (Oulu PMC-osuuskunta) ja Yasda (Oulun yliopisto).
- Ensimmäinen koekappale suunniteltiin niin, että virhekartta on mahdollista luoda 200 x 200 x 120 mm:n alueelle X-, Y-, Z-suunnissa. Materiaalina on alumiini Al EN AW 6082-T6.
- Koekappaleita ajettiin jokaisella koneella.
- Elokuussa 2009 ajettiin koeluontoisesti sorvauskeskusta: Mori Seiki NT 4250 DSG vm. 2005 (PMC), ohjaus Fanuc 31iTA5 MSX 711 III.

Toisessa vaiheessa konekantaan lisättiin CNC-jyrsinkoneet:

- Kitamura Mycenter (Tasogears Oy)
- Deckel Maho DMU 200P (Ata Gears Oy)
- Mitsui Seiki HR-5B (Oulun yliopisto).

Seuraavaksi mallinnettiin pienempi (mitat 120 x 120 x 120 mm), karkaistusta teräksestä koneistettava kappale ja jigi Deckel Maholle.

Koneet edustivat vanhempaa konekantaan, joissa systemaattiset virheet esiintyvät selkeämmin ja kompensoinnin etu voidaan huomata helpommin. Testikoneiden tiedot ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Tyviko-menetelmän testaamiseen valitut koekoneet.

Yritys / laitos	Koneistus-keskus	Malli	Valmistaja	Valmistus- / hankintavuosi	Ohjaus	Toimintatapa
Oulu PMC	Hermle	C 40 Dynamics	Hermle AG	2005	Heidenhain iTNC530	5-akselinen
VTT	Hermle	C 30 Dynamics	Hermle AG	2006	Heidenhain iTNC530	5-akselinen
Oulun yliopisto	Yasda	YBM-850V	Yasda	1990	Fanuc 15 MA	Pystykarainen, 3-akselinen + pyöröpöytä
Oulun yliopisto	Mitsui Seiki	HR-5B	Mitsui Seiki	1987	Fanuc 11M	Vaakakarainen, 3-akselinen + indeksipöytä
Tasogears	Kitamura	Mycenter 4/1125	Kitamura	1993	Fanuc 11M-A	Pystykarainen, 3-akselinen
Ata Gears	Deckel Maho	DMU200P	Gildemeister	2000	Heidenhain TNC 430	5-akselinen

Mittauskoneena käytettiin Oulu PMC:n mittakonetta Mitutoyo Strato 9166 (vm. 2006), jonka todennettu tarkkuus on $\pm 1,47 \mu\text{m}$. Tarkkuus riippuu jonkin verran käytetystä mittausjärjestä. Tyviko-mittauksissa käytettiin edellä mainittuun tarkkuuteen yltävää kärkeä.



Kuva 1. Mittakone Mitutoyo Strato 9166 (www.oulupmc.fi).

1.3 Rajaukset

Rajauksista sovittiin seuraavaa:

1. systemaattiset virheet selvitetään
2. muuttujien (työvara, lastuamisarvot, lähestymissuunta ym.) vakiointi määritellään
3. jäljelle jäävien satunnaisvirheiden suuruus määritetään.

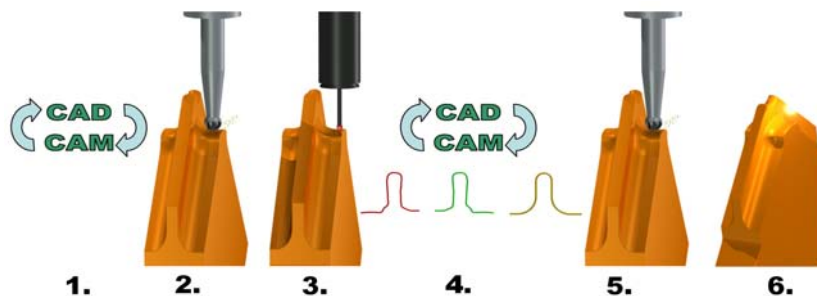
Muuttujien vakiointi tehtiin tapauskohtaisesti. Mikäli työ siirrettiin tehtäväksi jollakin toisella koneella, arvot (työkalut, lastuamisarvot ym.) pidettiin samoina. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus määritettiin tapauskohtaisesti, ja virheiden korjaus Tyviko-menetelmällä oli tutkimuksen keskeinen sisältö. Jäljelle jäävien satunnaismuuttujien suuruus määritti tarkkuuden, johon on mahdollista päästä.

Pääasiallinen käytetty koemateriaali oli alumiini EN AW 6082-T6. Lisäksi Ata Gearsin koneella suoritettiin kokeet hiilletyskarkaistuun teräkseen 18CrNiMo6-7 (HRC63). Koekappaleen koko oli poikkeuksellisesti 120 x 120 x 120 mm, ja kappaleita oli kaksi samassa jigissä. Yleensä ottaen vakioitiin kaikki, mikä voitiin. Tämä koski myös mittaustyötä. Periaatteena oli, että ainoat muuttujat olivat systemaattiset ja satunnaiset virheet.

On huomioitava, että menetelmä todennettiin nimenomaan yritysten (Ata Gears ja Tasogears) koneilla.

2. Menetelmä ja toteutus

Käytettyä menetelmää kutsutaan lyhyesti Tyviko-menetelmäksi. Virhekompensoinnin pyrkimyksenä on minimoida ympäristöstä johtuvat valmistukseen virheellisesti vaikuttavat tekijät. Näitä ovat muun muassa koneen ja ympäristön lämpötilan muutoksesta aiheutuvat lämpölaajenemiset ja koneistuksessa tapahtuvien liikkeiden toistuvat epätarkkuudet. Lämpötilan vaikutusta kontrolloitiin muun muassa esilämmittämällä työstökoneet ennen varsinaista testikappaleiden koneistusta.



Kuva 2. Kompensaatioprosessin eteneminen.

Kompensaatioprosessi etenee seuraavasti:

1. Suunnitellaan valmistettava kappale ja siihen liittyvä koneistus CAD/CAM-ympäristöissä.
2. Koneistetaan kappale.
3. Mitataan koneistettu kappale.
4. Tulkitaan mittausdataa ja selvitetään, mitä virheitä kappaleeseen on syntynyt. Näiden tietojen perusteella muodostetaan uusi CAD/CAM-malli, jossa on huomioitu koneistuksen aikana syntyneet virheet.

2. Menetelmä ja toteutus

5. Koneistetaan uusi kappale.
6. Lopputuloksena on kappale, jonka tarkkuus ylittää koneelle normaalin valmistustarkkuuden.

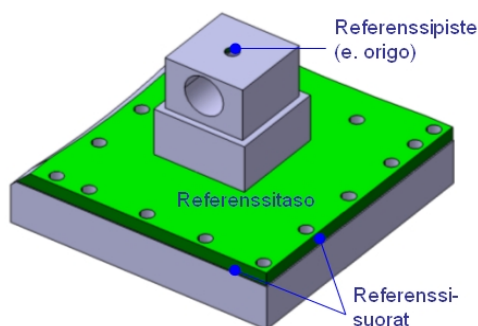
Luomalla oikeanlainen testikappale voidaan muodostaa kuva koneen käyttäytymisestä. Tämän testikappaleen mittaustulosten perusteella laaditaan virhekartta, jonka mukaan geometrialle määritetään matemaattisesti mallintaen korjaustarve virhekartan alueella.

Alumiinisen testikappaleen rouhintapiirustus on esitetty liitteessä 1.1. Liitteessä 1.2 on esitetty sen piirteet selityksineen. Pienemmän, teräksisen testikappaleen viimeistely- rouhinta-, pohjan viimeistelypiirustus ja jigien työpiirustus löytyvät liitteistä 2.1, 2.2, 2.3 ja 2.4.

2.1 Menetelmän vaiheet

Käytetty Tyviko-menetelmä rakentui kuudesta vaiheesta, jotka esitellään seuraavassa.

2.1.1 Vaihe 1 – mittaus



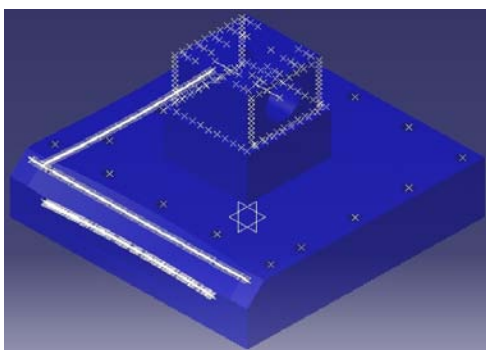
Kuva 3. Referenssikappaleen referenssipinnat.

Referenssitasoksi valittiin suurin pinta ja se mitataan useasta kohdasta eri puolilta kappaletta. Mikäli pintaa ei ollut koneistuksessa tasoitettu, valittiin referenssitasoksi tornin yläpinta.

Kappaleen referenssisuoraksi valittiin mieluiten työstökoneen X-akselin suuntainen kylki. Molemmat sivut kuitenkin koneistettiin ja mitattiin. (Tyvikomittauksissa sivut skannattiin; näytteenottotiheys oli 20/1 mm). Tällöin X- ja Y-

akseleiden keskinäistä kohtisuoruutta ja akseleiden suoruuksia voitiin arvioida. Referenssipisteeksi eli origon paikaksi valittiin tornin huipun avarrettu reikä.

Tyvikossa reikien keskipisteet ja halkaisijat määritettiin mittaamalla ympyrän kehältä yhdeksän pistettä. Kaaret mitattiin skannaamalla 0,05 mm:n askelin. Kukin taso mitattiin vähintään kymmenestä eri pisteestä. Tornin sivuilla olevien avarrettujen reikien keskiakseli määritettiin mittaamalla ympyröiden keskipisteet kolmelta eri syvyydeltä jokaisessa reiässä. Kuvassa 4 näkyy esimerkki mitatuista piirteistä ja ote mittausraportista.



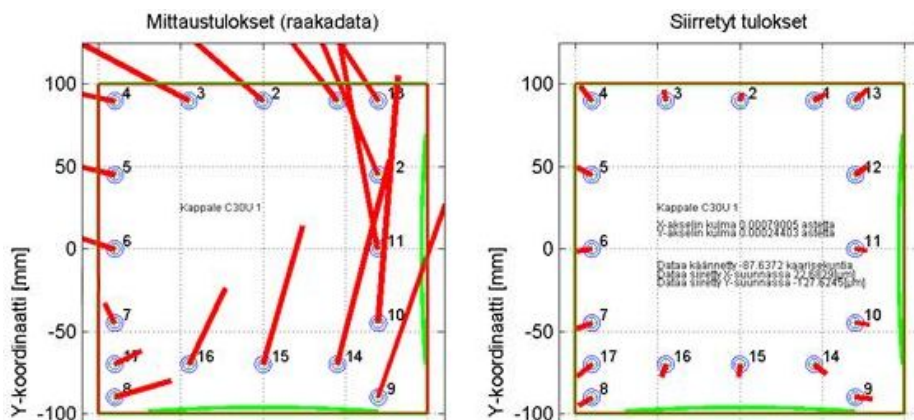
Mittaus		Pisteen nro.		Dian nro.		Pöytäosan nro (1)	
Mittaus		Jari Mähkäaho		Tyyliko C.O Pos			
25.08.2009 13:58							
Part name	Drawn number	Revision number	Customer				
Tyyliko	C30UTest2	2	VTT				
El. No.	Element	Part	Z-Coord.	Y-Coord.	Z-Coord.	Diameter	Variance
No.	Tolerance	R/R	Th Angle	Th Angle	Z-Depth	Dia. Angle	Dev./Zerr
M1: Koko ja paikkaus:							
1	30	Tero	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		Tasmatuus					→→→
1	30	Tero	0	0,01	0	0	→→→
		Z-pakka	-0,01				→→→
M2: Halkaja 50 mm							
1	42	Eläyry	0	0,01	50,00	-0,02	-0,02
		Eläyry XY					→→→
M3: Halkaja 50 mm							
2	51	Eläyry	0	0,01	50,00	-0,02	-0,02
		Eläyry XY					→→→
M4							
2	50	Ympäri	100,0	0,01	100,00	-0,02	-0,02
		Säte					→→→
2	50	Ympäri	100,0	0,01	100,00	0,02	0,02
		Ympärimäärä					→→→
2	50	Ympäri	100,0	0,01	100,00	-0,02	-0,02
		Z-pakka	-0,01				→→→
2	50	Ympäri	100,0	0,01	100,00	0,02	0,02
		Z-pakka	-0,01				→→→
2	50	Ympäri	100,0	0,01	100,00	0,00	0,00

Kuva 4. Mittaustulokset: pistepilvet ja mittausraportti.

2.1.2 Vaihe 2 – mittaustulosten kierto ja siirto

Origoksi valittu referenssipiste ei ollut riittävän tarkka, ja kaikkien esimerkkikoneiden mittaustuloksia jouduttiin jonkin verran siirtämään. Reikäsarjojen mittaustulosten perusteella tarkistettiin, tarvitseeko koordinaatistoa kiertää Z-akselin ympäri ja paljonko koordinaatistoa tulee siirtää X- ja Y-suunnissa (kuva 2). Tämän jälkeen kaikkia mittaustuloksia kierrettiin vastakkaiseen suuntaan ja siirrettiin siirtymien verran. Projektin alussa referenssitason virheellinen valinta (kappaleen pohja) vaati koordinaatiston kierron arviointia myös X- ja Y-akseleiden suhteen.

2. Menetelmä ja toteutus



Kuva 5. Mittaustulosten siirto ja kierto Z-akselin ympäri.

Tuloksia siirrettäessä voitiin arvioida myös kerrointa, joka tarvittiin tulosten skaalaamiseen. Tämän kertoimen avulla voitiin arvioida lämpötilamuutosta koneistuksen ja mittauksen välillä. Seuraavissa taulukoissa on esimerkki Hermle C30:n numeroarvoisista tuloksista ennen koordinaatiston siirtoa ja siirron jälkeen (taulukko 2) sekä lämpötilan vaikutuksesta tuloksiin (taulukko 3).

Taulukko 2. Raakadata ennen koordinaatiston siirtoa ja kiertoa sekä niiden jälkeen.

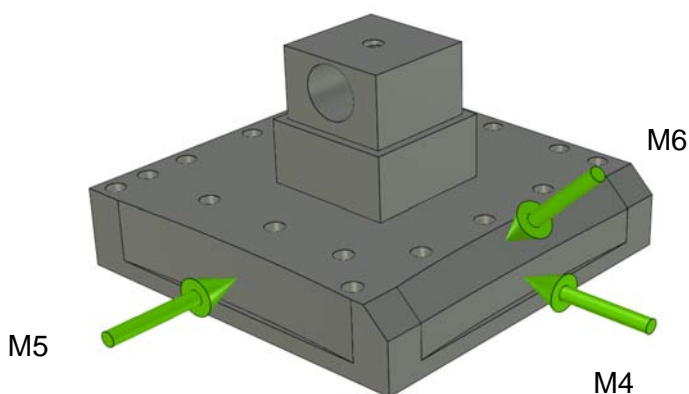
reikä nro.	x mitattu [µm]	y mitattu [µm]		x siirretty [µm]	y siirretty [µm]
1	-52.0	67.0		3.6	2.1
2	-55.0	48.0		0.6	2.2
3	-56.0	30.0		-0.4	3.3
4	-59.0	12.0		-3.4	4.4
5	-41.0	10.0		-4.5	2.4
6	-22.0	7.0		-4.6	-0.6
7	-3.0	6.0		-4.8	-1.6
8	17.0	5.0		-3.9	-2.6
9	26.0	75.0		5.1	-0.6
10	6.0	75.0		4.3	-0.6
11	-14.0	75.0		3.4	-0.6
12	-33.0	78.0		3.5	2.5
13	-52.0	79.0		3.6	3.5
14	16.0	62.0		3.6	-2.9
15	12.0	42.0		-0.4	-3.8
16	11.0	23.0		-1.4	-3.7
17	8.0	4.0		-4.4	-3.6

Jos tuloksiin vaikutetaan lämpötilan muutoksella (tässä tapauksessa mitattu kappale on 1,8 °C lämpimämpi kuin koneistettaessa), tulokset voivat muuttua huomattavasti – etenkin kun virheet ovat alle 0,01 mm. Lämpötilan vaikutusta ei kuitenkaan ole huomioitu muissa esitetyissä tuloksissa.

Taulukko 3. Kun otetaan huomioon lämpötilan vaikutus materiaalin laajenemiseen, voivat tulokset muuttua tarkoissa koneistuksissa merkittävästi. Rajoittavaksi tekijäksi tulee mitauskoneen tarkkuus.

x siirretty [μm]	y siirretty [μm]		x lämp. siirt. [μm]	y lämp. siirt. [μm]
3.6	2.1		1.7	-1.8
0.6	2.2		0.6	-1.7
-0.4	3.3		1.6	-0.6
-3.4	4.4		0.5	0.5
-4.5	2.4		-0.6	0.5
-4.6	-0.6		-0.7	-0.6
-4.8	-1.6		-0.9	0.4
-3.9	-2.6		0.0	1.3
5.1	-0.6	1.8 °C	2.1	3.3
4.3	-0.6		1.2	1.4
3.4	-0.6		0.3	-0.6
3.5	2.5		0.5	0.5
3.6	3.5		0.6	-0.4
3.6	-2.9		1.7	0.1
-0.4	-3.8		-0.4	-0.8
-1.4	-3.7		0.6	-0.7
-4.4	-3.6		-0.5	-0.5

2.1.3 Vaihe 3 – virheiden määrittäminen kaarien mukaan



Kuva 6. Testikappaleen kaaret.

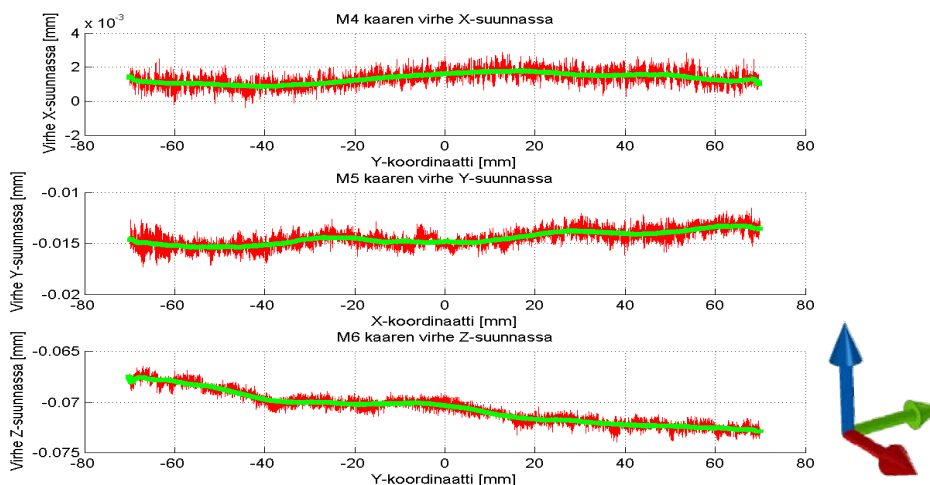
2. Menetelmä ja toteutus

Seuraavaksi laskettiin kuvan 6 kaarien M4, M5 ja M6 virheet ja mitattujen profiilien koordinaattitietoa verrattiin kaaren keskipisteeseen. Jokaisesta kaaresta arvioidaan kunkin akselin suuntainen virhe. Esimerkiksi akseleiden järjestys Hermle C30:llä oli

1. M4 => x-akseli
2. M5 => y-akseli
3. M6 => z-akseli.

2.1.4 Vaihe 4 – virheiden kuvaus polynomifunktioiden avulla

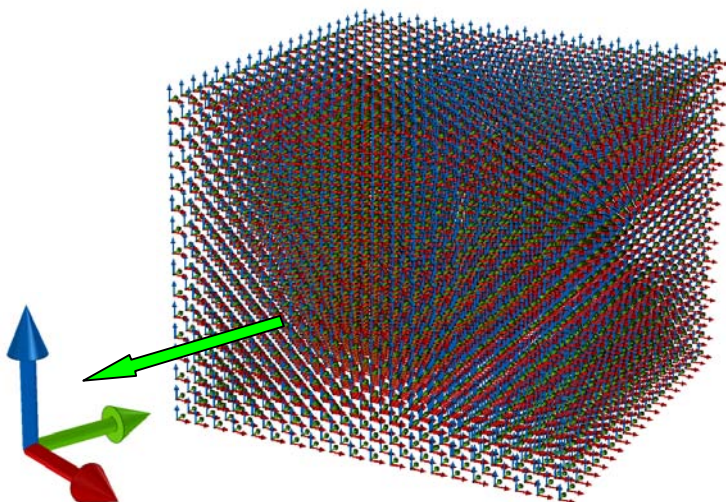
Kaarien virheisiin (kuva 7) sovitettiin esimerkiksi kolmannen asteen polynomi. Näin voitiin arvioida virhettä annetuissa koordinaateissa jokaisessa suunnassa.



Kuva 7. Esimerkki: kaarien virheet X-, Y- ja Z-akselien suunnissa.

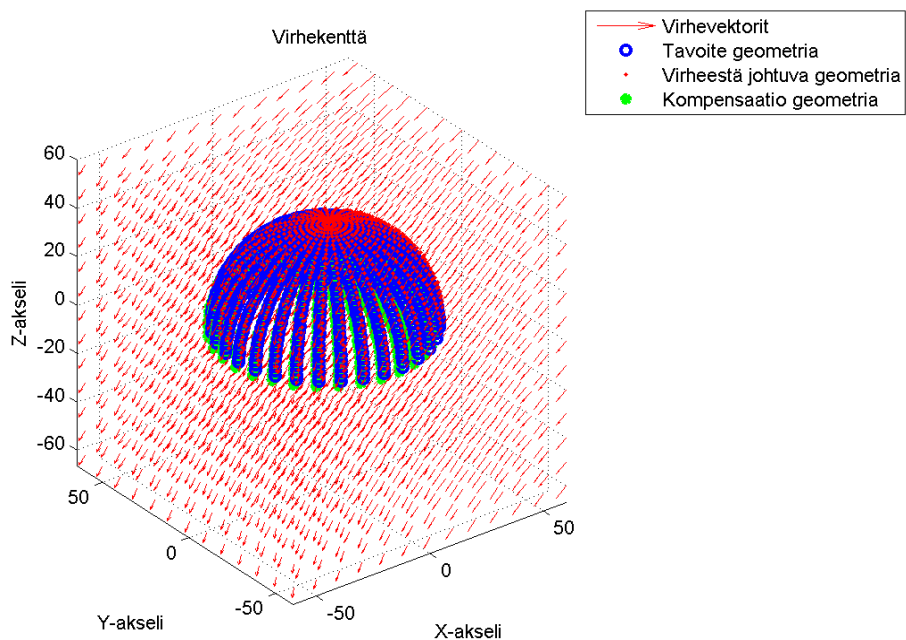
2.1.5 Vaihe 5 – virhekartan luonti polynomifunktioista

Seuraavaksi luotiin funktioiden avulla vektoriavaruus (X,Y ja Z), joka kuvaa virheitä kolmiulotteisesti – yksilöllisesti joka kohdassa (kuva 8).



Kuva 8. Funktioiden avulla luotu kolmiulotteinen virhekartta.

2.1.6 Vaihe 6 – kartan alueella olevan geometrian kompensointi



Kuva 9. Geometrian kompensointi virhekartan avulla.

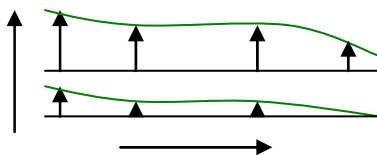
2. Menetelmä ja toteutus

Laaditun virhekartan avulla voitiin arvioida geometrialle syntyvää virhettä (kuva 9). Käyttämällä tätä tietoa hyväksi voitiin muodostaa kompensoitu malli mille tahansa geometrialle kartan alueella. Varhaisemmissa mittauksissa *offset*-ilmiö suurisäteisillä kaarilla oli liian suuri luotettavan kartan luomiseksi Z-suunnassa. Sen sijaan virhekartat luotiin onnistuneesti reikäsarjoista todennettujen virheiden mukaan X- ja Y-suunnassa. Testikappaleissa Z-akselin virheen määrittäminen ei ollut yhtä luotettava kuin X- ja Y-akseleilla. Osasyynä voidaan pitää Z-akselin virheen linkittymistä työkalun pituuteen. Testikappaleen Z-suuntaisilla lisäpiirteillä (esim. pyramidimainen porrastus, nouseva spiraali, tasapohjaisten reikien jyrskintä eri syvyyksille) voitiin arvioida virheen muodostumista myös Z-suunnassa. Tästäkin on tärkeää huomioida Z-akselin liikesuunta (+ tai -), kuten seuraavissa luvuissa esitetään.

2.2 Tason virheiden määrittäminen reikäsarjojen mukaan

Reikäsarjat kompensoidaan yksinkertaisesti siirtämällä reikien keskipisteitä. Jos akseli on vinossa, ilmenee se kaarien ja suorien lisäksi myös reikäsarjoista. Lähestymissuunta, ts. mihin suuntaan koneen pöytä liikkuu kunkin akselin suhteen reikään tultaessa, tulee ottaa huomioon. Kun reikäsarjojen kompensointi on todettu toimivaksi ja lähestymissuunnat ovat tiedossa, voidaan virhekartat tasolle määrittää.

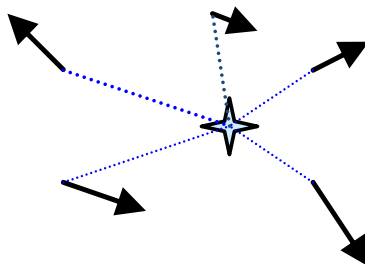
Periaate voi olla sama kuin edellä mainitussa virhekartan luomisessa kaarien mukaan. Virheiden perusteella voidaan määrittää niille korjaavat polynomifunktiot kullekin akselille.



Kuva 10. Reikien keskipisteen siirto kompensoitiossa polynomifunktiota hyväksi käyttäen.

Tämä toimii, jos virheet ovat säännönmukaisia. Kunkin akselin plus- ja miinus-suunnille omat tarvitaan funktiot suunnanvaihtovälilyksen kompensoimiseksi. Jos havaitut virheet ovat epäsäännöllisiä, voidaan kartan alueella olevan, mielivaltaisen pisteen kompensoitio laskea myös tunnettujen virhevektoreiden painotettuna summana. Tällöin tunnettuja vektoreita painotetaan sen mukaan, miten etäällä ne

ovat tarkasteltavasta pisteestä. Painokerroin on suuri, jos virhevektori on lähellä tarkasteltavaa pistettä, ja lähestyy nollaa, jos pisteestä etäännyttään. Aihetta ovat käsitelleet muun muassa Shepard (1968) ja Franke (1982).



Kuva 11. Virhevektoreiden sijainti tarkastelupisteeseen nähden.

Tässä esityksessä määritetyt korjaavat funktiot pätevät vain sillä työstökoneen alueella, missä koekappaleiden koneistukset on tehty.

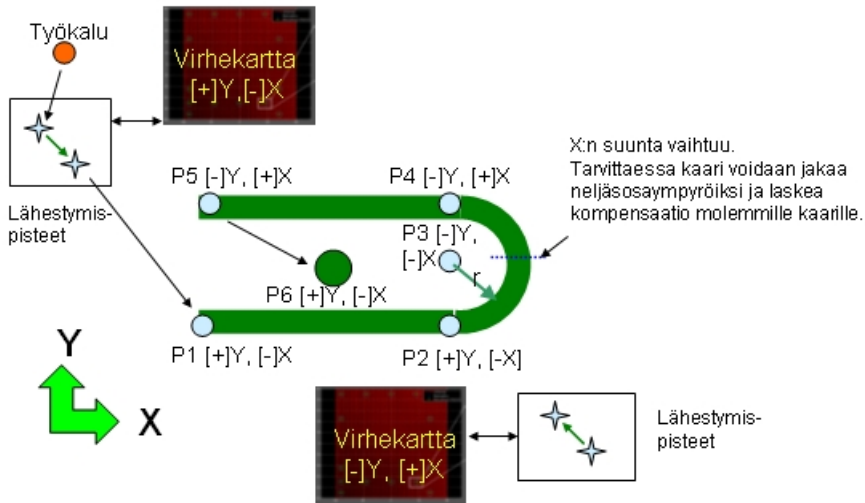
2.3 Lähestymissuunnan vaikutus

Kompensoinnissa tulee aina ottaa huomioon, mihin suuntaan CNC-työstökoneen pöytä liikkuu kunkin akselin suhteen. Kun akselin liikesuunta vaihtuu, tulee laskea myös uusi, korjattu koordinaatti suunnanvaihtovälyksen kompensoimiseksi. CAM-ohjelmoinnissa tulee käyttää erillisiä lähestymispisteitä aina, kun se on mahdollista. Varsinkin koneistuksen alussa ja työkalujen vaihdoissa CAM-ohjelmoija ei välttämättä tiedä, mistä suunnasta lähestyminen tapahtuu.

Koneen ohjaus saattaa oikoa pikaliikettä käytettäessä, jolloin on olemassa törmäyksen vaara. Tästä syystä turvataso on syytä valita ohjelmoinnissa kappaleen korkeimman pisteen yläpuolelle ja sijoittaa lähestymispisteet turvatasolle.

Kolmiakselisille lineaarikoneille tarvitaan kaksi virhekarttaa eli kartat vastakaissuuntaisille pöydän liikkeille, kuten $-X,+Y,-Z$ ja $+X,-Y,+Z$. Esimerkkinä kuvan 12 kiilauran X- ja Y-suunnan korjauksessa käytettävä kartta on merkitty pisteiden ”P” perään hakasulkuihin []. Kun pöytä liikkuu X- tai Y-akselin positiiviseen suuntaan, on merkinnäksi valittu [+] ja päinvastaisessa tapauksessa [-]. Karttojen komponentteja voidaan yhdistellä esimerkiksi poimimalla kartoista komponentit [-]X ja [-]Y.

2. Menetelmä ja toteutus



Kuva 12. Virhekarttojen käyttö X- ja Y-tasolla olevan kiilauran koneistuksessa.

2.4 Esimerkkejä piirteiden kompensoinnista muilla tavoilla

Kolmiulotteinen virhekartta voidaan helposti kolmeakselisille työstökoneille. Jos akseleita on enemmän, kuten pyöröpöydällä, voidaan neljättä akselia tarkastella erikseen. Yli neliakselisilla koneilla kinematiikan hallinta on huomattavasti haastavampaa. Aihetta ovat pohtineet muun muassa Rahman (1994–2004) sekä Rahman et al. (1997–2002), E. Bohez (2002).

Puhtaissa tason mittauksissa, joissa tasolta on mitattu useampi piste (yli kolme), voidaan tason yhtälö sovittaa pistejoukkoa parhaiten kuvaavasti käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää.

2.4.1 Esimerkki: tasojen yhtälöiden ratkaiseminen pistepilvestä

Tyvikossa kukin taso mitattiin vähintään kymmenen pisteen pistepilvenä. Vaikka aiemmin mainittuja virhekarttoja voidaan soveltaa mihin tahansa koekappaleen tasoon, ratkaistiin tasojen yhtälöt pienimmän neliösumman menetelmällä. Menetelmä antaa tulokseksi kaikkia mittauspisteitä parhaiten kuvaavan tason yhtälön. Koska tasojen virheet ovat pieniä, tarkin tulos saadaan, kun pisteiden keskimääräinen etäisyys redusoidaan tarkastelusuunnassa nolaksi, ts. alla olevan

yhtälön C:n arvo ≈ 0 . Etäisyys lisätään myöhemmin kompensoituna takaisin tason yhtälöön ($= C$).

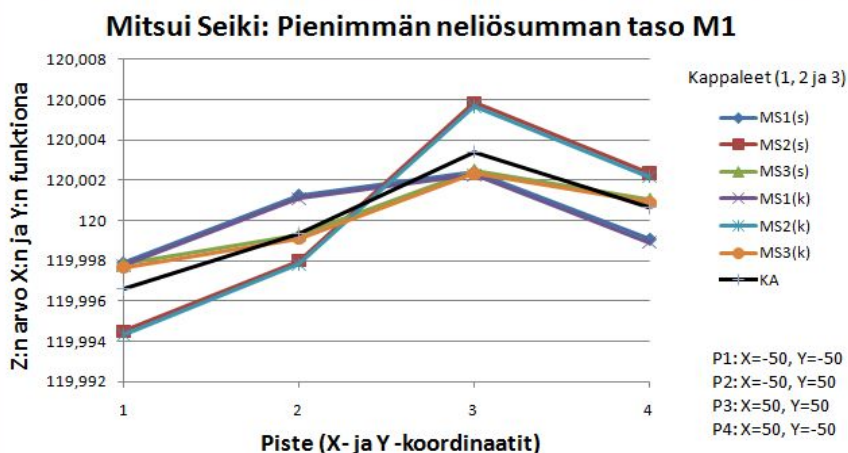
Pistepilvestä lasketaan pienimmän neliösumman taso kuvassa 13 esitetyn kaavan mukaan (D. Eberly), jossa x_i , y_i ja z_i ovat kunkin pisteen koordinaatit.

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m y_i & \sum_{i=1}^m 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i z_i \\ \sum_{i=1}^m y_i z_i \\ \sum_{i=1}^m z_i \end{bmatrix}.$$

Kuva 13. Pienimmän neliösumman laskentakaava.

Yhtälöryhmän ratkaisu antaa tulokseksi tason muotoa $Z = Ax + By + C$. Kun yhtälöryhmä ratkaistaan käänteismatriisin avulla ei tuloksissa ole merkittävää eroa verrattuna iteroimalla ratkaistuihin tuloksiin, kuten kuva 14 osoittaa. Esi-merkin pistepilvi on mitattu Mitsui Seikillä koneistetuille kappaleelle.

Piste	X	Y	Ratk. Solver			Ratk. Käänteismatriisi			
			Z: MS1	Z: MS2	Z: MS3	Z: MS1	Z: MS2	Z: MS3	Z:KA
1	-50	-50	119,9979	119,9945	119,9978	119,9977	119,9943	119,9977	119,9966
2	-50	50	120,0013	119,998	119,9993	120,0011	119,9978	119,9991	119,9993
3	50	50	120,0024	120,0058	120,0025	120,0023	120,0057	120,0023	120,0034
4	50	-50	119,9991	120,0023	120,0011	119,9989	120,0022	120,0009	120,0007



Kuva 14. Kompensoidut tasot Mitsui Seikillä koneistettujen kolmen kappaleen (MS1, MS2 ja MS3) pistepilvien mukaan. Tasojen keskiarvon yhtälöksi saadaan: $4,1 \times 10^{-5} X + 2,8 \times 10^{-5} Y + 120$.

2. Menetelmä ja toteutus

2.4.2 Esimerkki: akselien kääntövirheet vähintään kolme-akselisissa työstökoneissa

Koekappaleista voidaan arvioida myös akselien kääntövirhettä (vähintään kolmeakseliset työstökoneet). Reiät koneistetaan tornin molemmin puolin siten, että neljättä akselia (esim. C-akseli) kierretään 180°. Mittauksista saadaan reikien keskiakselien kulmavirheet (kuva 15) ja paikoitustarkkuus. Esimerkiksi Mitsui Seikissä indeksipöydän (B-akseli) paikoitus tapahtui 1°:n porrastuksella, joten pienten virheiden kompensointi ei käytännössä onnistu. Reiät koneistettiin yli kolmiakselisilla työstökoneilla (Deckel Maho, Hermle C30 ja C40, Yasca).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3									
4								Reikä M12, +Y	
5								X-kulma	90,003
6								Y-kulma	179,979
7								Z-kulma	89,979
8									
9								Reikä M13, +Y	
10								X-kulma	90,003
11								Y-kulma	179,988
12								Z-kulma	89,988
13								M12, M13 Kulmaero	
14								X-kulma	0
15								Y-kulma	0,009
16								Z-kulma	0,009
17									
18									

Kuva 15. Reikien keskiakselien kulmavirheet.

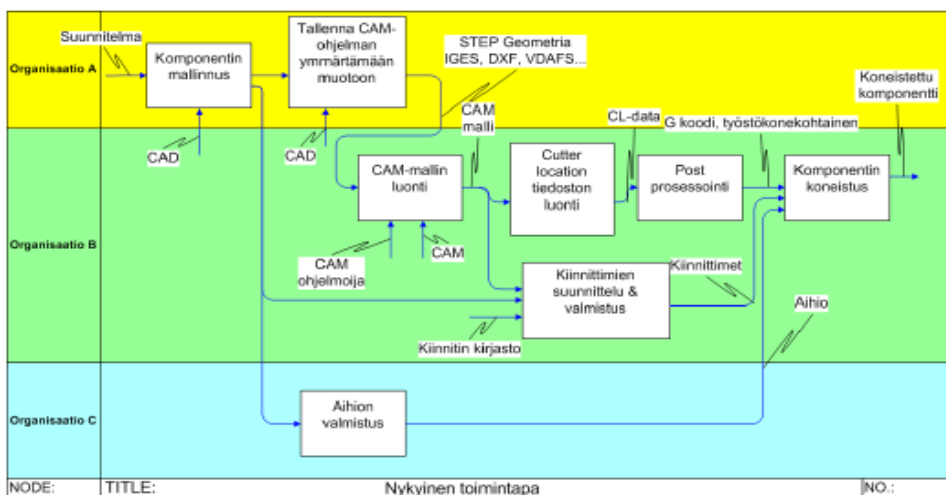
2.5 Mallista toteutettavaksi ohjelmaksi

Kompensoitio voidaan tehdä seuraavilla tavoilla (Karjalainen 2009):

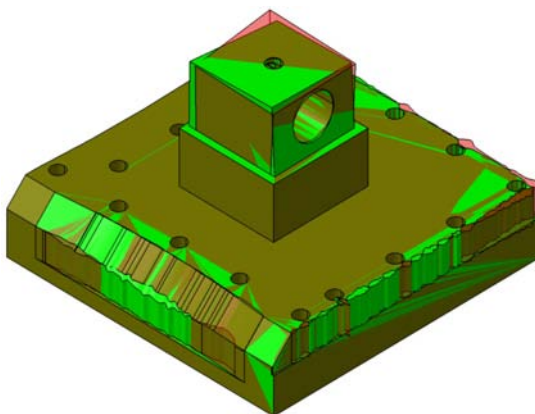
1. korjataan geometrasta mallia
2. korjataan CL-tiedostoa kirjoitusvaiheessa
3. korjataan CL-tiedostoa (Catia/Mastercam/Vericut) ennen postproessoria
4. korjataan postproessorissa
5. korjataan NC-koodia postproessorin jälkeen
6. korjataan koodi ohjauksella
7. hajautetaan korjaaminen kahteen tai useampaan vaiheeseen.

Eri vaihtoehtoja on pohdittu tarkemmin professori Karjalaisen esityksessä *Radan määrittäminen ja korjaukset* (2009).

Kuva 16 esittää osan valmistuksen vaiheet mallista valmiiseen osaan. Datan korjaamisessa olennaista ei ole pelkkä koordinaattitiedon korjaaminen, vaan pitää tietää, mistä pisteeseen tullaan ja vaihtuuko jonkin akselin suunta koneistuksen aikana. Tyvikossa kompensatio tehtiin malleihin. Kuvassa 17 on esimerkki Mitsui Seikin kompensoidusta mallista, jossa virheitä ja kompensoituja piirteitä on korostettu 10–100-kertaisina.



Kuva 16. Komponentin valmistuksen vaiheet.



Kuva 17. Korjaamaton ja kompensoitu malli päällekkäin (Mitsui Seiki). Mallissa virheet ja tarvittavat kompensointipiirteet ovat 10–100-kertaisina.

3. Tulokset

Tyviko-projektille oli asetettu seuraavat tulostavoitteet:

1. Projektin tavoitteena on luoda pohja systemaattisten virheiden korjaamiseksi CNC-työstökoneilla ilman fyysisiä muutoksia.
2. Teknologisesti kyse on työstökoneiden virheiden todentamisesta ja siihen liittyvästä ohjelmistopohjaisesta korjauksesta.
3. Tämä parantaa yritysten kilpailukykyä ja pidentäessään CNC-koneiden elinikää pienentää investointien määrää.

Tyviko-menetelmä paransi tarkkuutta kaikilla valituilla työstökoneilla. Systemaattisia virheitä havaittiin kaikissa koneissa ja ne kyettiin korjaamaan. Yksi satunnaisvirhekin mahdollisesti havaittiin (taulukko 4). Virhelähteistä yllättävin havaittiin Mitsui Seikissä, jonka ohjauksessa ilmeni epätarkkuutta koneistettaessa suurisäteisiä kaaria ympyränkaari-interpolaatiolla. Koneistettaessa sama kaari splini-interpolaatiolla virhettä ei esiintynyt (kuvat 54 ja 55). VTT:n Hermle C30 oli testikoneista tarkin, eikä sillä päästy enää merkittäviin tarkkuuden parannuksiin (taulukko 3). Varsinkin reikäsarjoja avarrettaessa työkalun jousto ilmeni ajoittain värähtelynä, eikä tarkkoja tuloksia aina saatu. Tämä näkyi sekä reiän pinnanlaadussa että reiän halkaisijan muista poikkeavana mittaustuloksena. Värähtelyongelmat kyettiin kuitenkin aina lopulta ratkaisemaan työstöarvoja muuttamalla.

3.1 Deckel Maho DMU200P, Ata Gears Oy

Deckelillä koneistettiin kaksi sarjaa: 0-sarja ja kompensoitu sarja sarjakoona ollessa poikkeuksellisesti kaksi. Jigissä koneistetaan kaksi kappaletta kerrallaan. Jigejä oli käytössä vain yksi, joten kummankin sarjan ensimmäisinä koneistetut kappaleet jouduttiin irrottamaan ja sitten kiinnittämään uudelleen jigiin mittausta varten. Tämä heikensi kuitenkin vain vähän mittaustulosten luotettavuutta, koska

irrotuksen ja kiinnityksen aiheuttama epätarkkuus voitiin numeerisesti huomioida. Kappaleet koneistettiin hiilletyskarkaistusta teräksestä 18CrNiMo6-7, ja kappaleiden koko oli 120 x 120 x 120 mm. Tulosten mukaan työstökone on ”vakiona” tarkka. Materiaalin valinta ei kuitenkaan välttämättä vaikuta tuloksiin odotetulla tavalla, kuten luvussa 3.1.10 pohditaan.

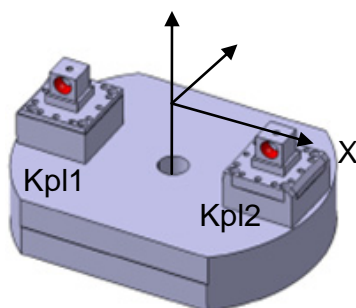
Ohjauksessa käytetään 0,01 mm:n ja CAM-ohjelmoinnissa 0,003 mm:n toleranssia. Syynä tähän on, että konetta käytetään vain rouhintaan eikä sillä viimeistellä kappaleita. Kaarien ja pintojen virheet olivat pieniä jo 0-sarjassakin. Tästä syystä tulosta voidaan pitää hyvänä, jos arvo kaarien ja pintojen osalta poikkeaa X-, Y- ja Z-suunnissa enintään $\pm 0,01$ mm tavoitearvosta. Tosin muiden tehtyjen kokeiden perusteella, toleranssia pienentämällä, Deckel kykenee kompensaatiossa vähintään kaksi kertaa tarkempaan lopputulokseen.

Reikäsarjojen paikoitustarkkuuteen ohjauksen toleranssi ei vaikuta. Reikäsarjoissa päästiinkin kompensaatiossa peräti toleranssiin $\pm 0,005$ mm. Korjaamattomissa reikäsarjoissa paikoitusvirheet olivat maksimissaan Y-suunnassa noin 0,017 mm, eli tarkkuus parani noin kolminkertaiseksi.

Paikoitusvirhe oli X-suunnassa suurimmillaan 0,057 mm. Tämä saatiin pienennettyä 0,016 mm:iin. Virhe ilmeni tornin avarrettujen reikien paikoituksessa, mutta tällöin kara liikkuikin X-akselilla lähes ääriasennosta toiseen (taulukko 4).

Käytetyssä, ikääntyneessä postprosessorissa havaittiin virheitä, joita jouduttiin manuaalisesti editoimaan. Mastercam-ohjelmistosta käytössä oli niin ikään vanhahko 9-versio.

3.1.1 Akseleiden kääntötarkkuus ja tornin reikien paikoitustarkkuus



Kuva 18. Koekappaleiden sijainti Deckel Maho DMU 200P -koneella.

3. Tulokset

Koneistetut reiät avarretaan tornin molemmin puolin C-akselin käännön ollessa 180°. Reiät on merkitty viereiseen kuvaan punaisella. Ne ovat liian lyhyitä (20 mm ja mitattu etäisyys 17 mm), jotta lieriöiden kulmavirheitä olisi voitu luotettavasti määrittää. Referenssitasoksi mittauksissa valittiin tornien huiput.

Koska jigi oli kiinnitetty lähelle Deckelin kääntöpöydän ulointa reunaa, tuli myös karan liikkua X-suunnassa lähellä ääriasentojaan. Tästä syytä reikien X-suuntainen paikoitusvirhe oli myös Deckelin mittaustulosten suurin.

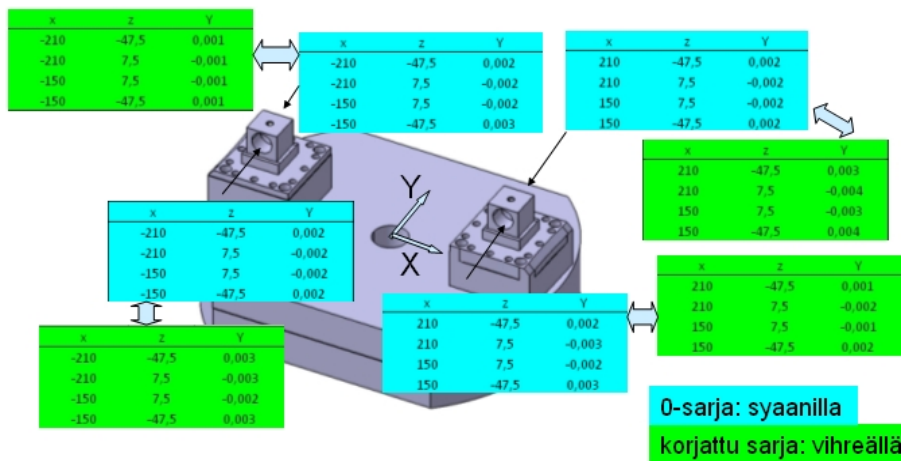
Reikien paikoitustarkkuus X- ja Z-suunnissa ilmenee taulukosta 4. Alimpana ovat kompensoidun sarjan tulokset. Vastakkaisten reikien kohdistustarkkuus parani X-suunnassa merkittävästi -0,062 mm:stä -0,002 mm:iin. Myös X-suunnan maksimivirhe pieneni 0,057 mm:stä 0,016 mm:iin. Kompensoidun sarjan reiässä "M13_kpl1" virhe Z-suunnassa oli -0,016 mm. Virheen ei olisi pitänyt olla näin suuri, koska kompensointia oli Z-suunnassa vain -0,003 mm. Tässä lienee satunnaisvirhe todennäköinen, koska muiden reikien Z-suuntaiseksi toleranssiksi saadaan $\pm 0,004$ mm.

Taulukko 4. Tornin avarretut reiät, Deckel Maho. (Samoja kappaleita käytettiin sekä 0-sarjassa että korjatussa sarjassa, jossa tornin huippu koneistettiin noin 0,5 mm matalammaksi. Tästä johtuu ero sarjojen Z-suuntaisissa mitoissa.)

0-sarja							
Kompensaatio, paikotusvirheet M12 ja M13							
M12, kpl1, Y+		M13, kpl1, Y-		(M12 e. 13), kpl2, Y+		(M13 e. 12), kpl2 Y-	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
-180,016	-17,494	-179,953	-17,497	180,002	-17,504	180,057	-17,500
Ero x	Ero Z			Ero x	Ero Z		
-0,062	0,003			-0,055	-0,004		
Kompensoitu							
Kompensaatio, paikotusvirheet M12 ja M13, SARJA1							
M12, kpl1, Y+		M13, kpl1, Y-		(M12 e. 13), kpl2, Y+		(M13 e. 12), kpl2 Y-	
X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
-180,005	-17,030	-180,004	-17,009	179,993	-17,024	179,984	-17,026
Ero x	Ero Z			Ero x	Ero Z		
-0,002	-0,021		(linreg.)	0,008	0,002		(linreg.)

3.1.2 Tornin XZ-tasot

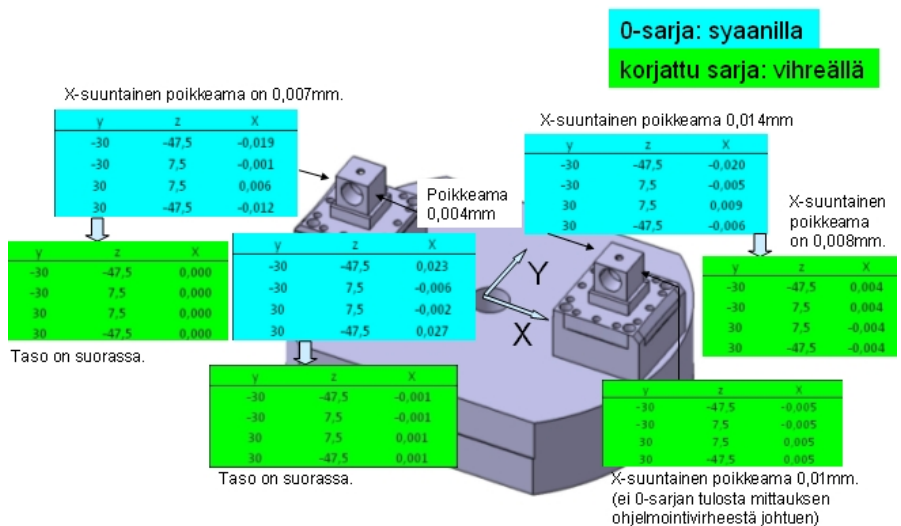
Tornin XZ-tasot koneistettiin työkalun otsapinnalla eli samasta suunnasta kuin tornin avarretut reiätkin. C-akselin kierto oli siis tässäkin 180°. Tasojen koneistustarkkuus oli lähes virheetön. Korjaamisen tarvetta ei siis ollut (kuva 19).



Kuva 19. Akseleiden kääntötarkkuus oli erittäin hyvä, ja tasojen poikkeamat Y-suunnassa olivat hyvin pieniä.

3.1.3 Torni YZ-tasot

YZ-tasot koneistetaan työkalun kyljellä. Tasojen Y-suuntainen kohtisuoruus X-akseliin nähden parani; vasemmanpuoleisen kappaleen tasot oikeivat täysin, ja oikeanpuoleisenkin suoruus parani lähes kaksinkertaisesti (kuva 20). 0-sarjan poikkeamat johtuivat lähinnä X- ja Y-akselien välisestä kulmavirheestä (kuvat 34 ja 35).

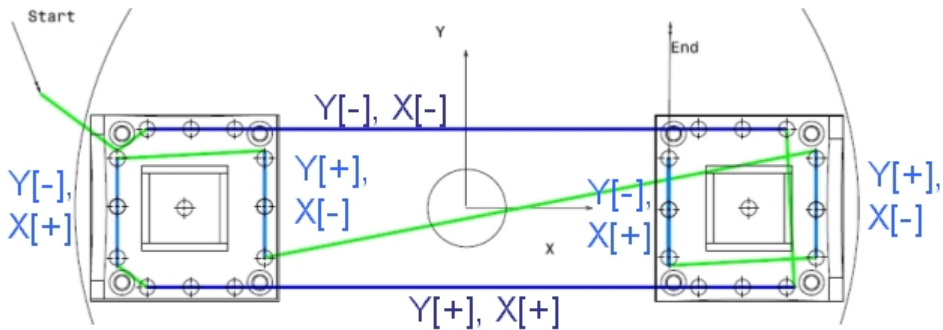


Kuva 20. YZ-tasojen poikkeamat.

3. Tulokset

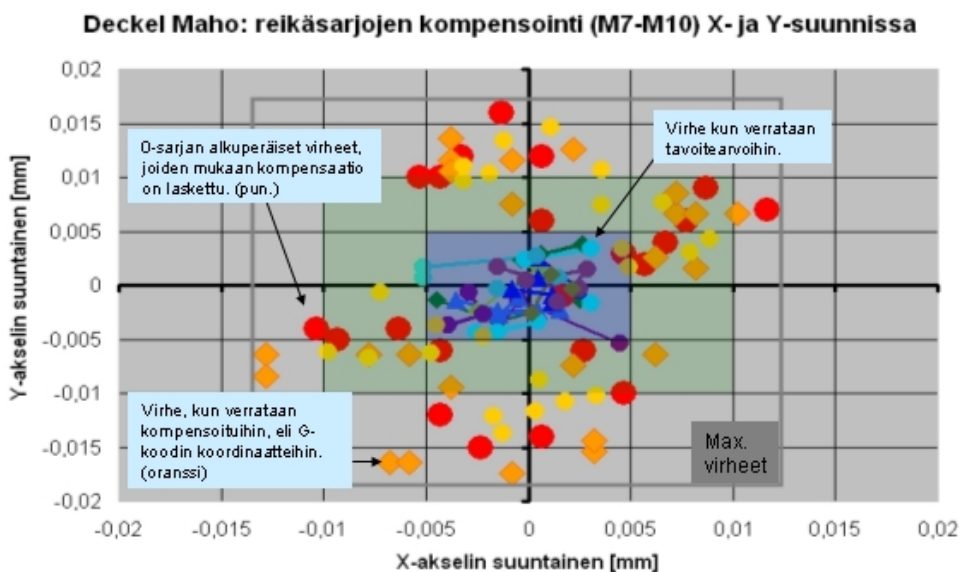
3.1.4 Reikäsarjat: lähestymissuunnat ja tulokset

Kun reikäsarjojen lähestymissuunnat tunnetaan, voidaan virhekartat määrittää pöydän liikesuunnille (kuva 21). Pöydän liikesuunta X- ja Y-akseleiden suhteen on merkitty kunkin sarjan kohdalla merkein [+] ja [-]. Jos pöytä liikkuu akselin positiiviseen suuntaan, merkintänä on [+].



Kuva 21. Kuvassa on reikäsarjojen koneistusjärjestys.

Reikäsarjoissa kompensointi onnistui erinomaisesti. Tarkkuus oli hyvä jo 0-sarjassakin; X-suunnassa lähes kaikkien reikien toleranssi oli alle $\pm 0,01$ mm. Y-suunnassa suurin virhe 0-sarjassa oli 0,017 mm. Kompensoidussa sarjassa kaikki reiät menivät toleranssiin $\pm 0,005$ mm sekä X-, että Y-suunnassa (kuva 22). Kuvassa tämä on esitetty siten, että kompensoidun sarjan virheet mahtuvat violetin laatikon sisään. Vihreä laatikko kuvaa toleranssia $\pm 0,01$ mm. Uloin, harmaa suorakaide kuvaa 0-sarjan maksimipoiskeamia (punaiset ja keltaiset pisteet), sekä kompensoidun sarjan todellisia poikkeamia (oranssit pisteet). Viimeksi mainitut saadaan, kun mittaustuloksia verrataan CAM-ohjelmoinnissa annettuihin todellisiin koordinaatteihin ja lasketaan virheet.



Kuva 22. Reikäsarjojen tulokset, Deckel Maho.

3.1.5 X-suunnan kompensointifunktiot reikäsarjojen mukaan

Deckelillä X-suunnan kompensointi ei ole aivan välttämätöntä, jos tavoitteena on $\pm 0,01$ mm:n paikoitustarkkuus. Molemmille lähestymissuunnille [+] ja [-] tarvitaan omat funktiot, toisin sanoen sen mukaan, liikkuuko pöytä X-akselin positiiviseen [+] vai negatiiviseen suuntaan [-]. Pöydän liikkuessa X-akselin positiiviseen suuntaan voidaan kompensointi laskea seuraavan toisen asteen polynomifunktion avulla:

$$x_{k+}(x,y) = -0,00000145y^2 - 0,000095y + 1,000019x, \text{ missä}$$

x ja y ovat kartan alueella olevan pisteen tavoitekoordinaatit ja

x_{k+} on pisteen x-koordinaatin korjattu arvo.

Taulukossa 5 on funktion avulla lasketut korjaavat x_{k+} -arvot. Arvoja on verrattu 0-sarjasta laskettuihin korjaaviin arvoihin, joilla kompensointi todennetusti myös toimii. Suurin poikkeama on rengastettu punaisella. Suurin ero funktiolla lasketun ja mittauksin todennetun kompensointi-arvon välillä on 0,003 mm.

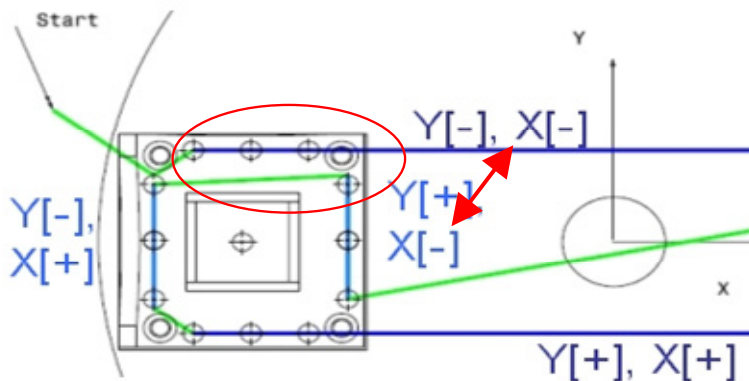
3. Tulokset

VRT.	Pöydän liike +X-suuntaan			VRT. vs. Komp	
	komp 4/10	y	nim. X	Komp_x	ero
0-sarjan mukaan laskettu korjaava arvo X:lle.	-223,004	-32	-223	-223,003	-0,002
	-223,004	1	-223	-223,004	0,000
	-223,010	32	-223	-223,009	-0,002
	-9,27297E-05	-223,006	<-Lin. reg.		
Tavoitearvot (eli koordinaatit, joihin kompensatiolla pyritään). Arvot sijoitetaan funktioon.	129,005	-32	129	129,004	0,001
	129,001	-1	129	129,003	-0,002
	128,997	32	129	128,998	-0,001
	-0,000124942	129,001	<-Lin. reg.		
	-204,002	-51	-204	-204,003	0,001
	-175,999	-51	-176	-176,002	0,003
	-147,999	-51	-148	-148,002	0,002
	148,006	-51	148	148,004	0,002
	176,007	-51	176	176,004	0,002
	204,008	-51	204	204,005	0,003
		-10	-100	-100,001	

Taulukko 5. X-suunnan kompensointi, kun pöytä liikkuu X-akselin positiiviseen suuntaan.

Pöydän liikuessa X-akselin negatiiviseen suuntaan kahden lähekkäin olevan arvon välillä havaittiin Deckelille muutoin poikkeuksellinen 0,008 mm:n ”hyppäys” (kuva 23). Tästä syystä kompensoiva funktio on jaettu kolmeen osaan. Sitä, missä kohtaa arvo tarkalleen reikien välillä muuttuu, ei tiedetä, ja sen selvittäminen vaatisi lisäkokeita kyseiseltä alueelta. Tämän X-suunnan korjauksessa voitaisiin kuitenkin kokeilla kompensatiota tunnettujen virhevektoreiden painotettuna summana, kuten esitettiin luvussa 2.2. Korjaava funktio, jossa ”hyppy” on huomioitu, on

$$X_{kc}(x, y) = \begin{cases} -0,000047y + 1,0000236x & \text{kun } x < -147, \\ -0,000047y + 0,9999764x & \text{kun } -147 \leq x < 0, \\ -0,00017y + 1,0000313x & \text{kun } x \geq 0. \end{cases}$$



Kuva 23. 0,008 mm:n kompensointiarvojen muutos X-suunnassa kahden lähekkäin olevan reiän välillä.

Taulukossa 6 on funktion avulla lasketut korjaavat X:n arvot, kun pöytä liikkuu X-akselin negatiiviseen suuntaan. Suurin ero funktiolla lasketun ja mittauksin todennetun kompensatioarvon välillä on 0,002 mm.

Taulukko 6. X-suunnan kompensointiarvot, kun pöytä liikkuu X-akselin negatiiviseen suuntaan.

		Pöydän liike -X-suuntaan			VRT. vs. Komp
komp 4/10		y		Komp_x	ero
0-sarjan mukaan laskettu korjaava arvo X:lle.	223,012	-32	223	223,012	-0,001
	223,009	-1	223	223,007	0,002
	223,001	32	223	223,002	-0,001
	-0,000172619	223,007	<-Lin. reg.		
Tavoitearvot (käytetään myös funktion laskemisessa)	-128,995	-32	-129	-128,995	0,000
	-128,997	1	-129	-128,997	0,000
	-128,998	32	-129	-128,998	0,000
	-4,70158E-05	-128,997	<-Lin. reg.		
	203,999	51	204	203,998	0,001
	175,996	51	176	175,997	-0,001
	147,995	51	148	147,996	-0,001
	-148,006	51	-148	-148,006	0,000
	-176,006	51	-176	-176,007	0,000
	-204,009	51	-204	-204,007	-0,002
		-10	-100	-99,997	

Function $x_k(x,y)$ arvo

Funktiolla lasketun arvon poikkeama 0-sarjan korjaavasta arvosta.

3. Tulokset

3.1.6 Y-suunnan kompensointifunktiot reikäsarjojen mukaan

Deckelin tapauksessa mitattujen pisteiden perusteella Y-suunnan kompensointiin vaikuttaisi riittävän seuraava lineaarinen funktio lähestymissuunnasta riippumatta:

$$y_k(x,y) = 0,0000493x + 1,000088y$$

Vertailun vuoksi on taulukossa 7 korjaavat Y:n arvot laskettu kolmen eri funktion avulla:

- lähestymissuuntien mukaiset lineaarifunktiot
- lähestymissuuntien mukaiset kolmannen asteen polynomit
- mainittu lineaarifunktio.

Taulukosta 7 havaitaan, että lähestymissuunnan vaikutus on yllättävän merkityksellinen, kun verrataan funktiolla laskettujen arvojen ”Lin. [-] & [+]” poikkeamia 0-sarjan virheiden perusteella määritetyistä korjaavista arvoista ”komp 4/10”. Suurin poikkeama on 0,005 mm, joka itse asiassa vastaa lähes ”tarkennettua” lisäkorjaustarvetta ”komp 5/10”, eli kyseessä on ns. kompensoinnin kompensointi.

Taulukko 7. Kolmella eri funktiolla laskettujen Y-suunnan kompensointiarvojen vertailu.

Pöydän liike -Y-suuntaan									
0-sarja	Mitattu	Uusi komp.	Nimellisarvot		Y:n kompensoatio eri funktioiden mukaan			ero	
komp 4/10	"->Virhe->"	komp 5/10	X	y	Lin. [-]	3:n asteen	Lin. [-] & [+]	vrt. komp 4/10	
50,995	0,001	50,994	-204	51	50,994	50,993	50,994	0,001	
50,996	0,002	50,994	-176	51	50,996	50,994	50,996	0,000	
50,996	0,002	50,994	-148	51	50,997	50,995	50,997	-0,001	
51,010	-0,001	51,011	148	51	51,011	51,009	51,012	-0,002	
51,010	-0,002	51,012	176	51	51,012	51,012	51,013	-0,003	
51,016	0,002	51,014	204	51	51,013	51,015	51,015	0,001	
-0,994	-0,002	-0,992	129	-1	-0,993	-0,991	-0,994	0,000	
-31,997	0,000	-31,997	129	-32	-31,996	-31,996	-31,996	-0,001	
-32,012	0,004	-32,016	-223	-32	-32,015	-32,013	-32,014	0,002	
32,012	0,000	32,012	129	32	32,008	32,007	32,009	0,003	
31,996	0,004	31,992	-223	32	31,992	31,993	31,992	0,004	
0,994	0,003	0,991	-223	1	0,990	0,993	0,989	0,005	
Pöydän liike +Y-suuntaan									
0-sarja	Mitattu	Uusi komp.	Nimellisarvot		Y:n kompensoatio eri funktioiden mukaan			ero	
komp 4/10	"->Virhe->"	komp 5/10	X	y	Lin. [+]	3:n asteen	Lin. [-] & [+]	vrt. komp 4/10	
-51,015	0,001	-51,016	-204	-51	-51,016	-51,016	-51,015	-0,001	
-51,014	0,003	-51,017	-176	-51	-51,014	-51,016	-51,013	-0,001	
-51,014	0,001	-51,015	-148	-51	-51,013	-51,015	-51,012	-0,002	
-50,998	0,000	-50,998	148	-51	-50,997	-50,998	-50,997	-0,001	
-50,996	-0,003	-50,993	176	-51	-50,996	-50,996	-50,996	0,000	
-50,994	-0,001	-50,993	204	-51	-50,995	-50,993	-50,994	0,000	
-32,010	0,004	-32,014	-129	-32	-32,010	-32,011	-32,009	-0,001	
0,994	0,001	0,993	-129	1	0,994	0,996	0,994	0,000	
31,999	0,005	31,994	-129	32	31,996	31,996	31,996	0,002	
32,012	-0,001	32,013	223	32	32,013	32,017	32,014	-0,002	
-31,993	0,000	-31,993	223	-32	-31,992	-31,989	-31,992	-0,001	
-0,991	0,000	-0,991	223	-1	-0,989	-0,984	-0,989	-0,002	

↑ "Tavoitearvot"

↑ "kompensaation kompensoatio"

↑ Kolmella eri funktiolla lasketut, korjatut Y:n arvot.

↑ Kompensoidun sarjan virhe, kun verrataan tavoite-arvoon

↑ 0-sarjan mukaan laskettu korjaava arvo Y:lle.

↑ Funktiolla lasketun arvon poikkeama 0-sarjan korjaavasta arvosta. (Suurinkin poikkeama hyvin lähellä "uutta kompensoitua arvoa".)

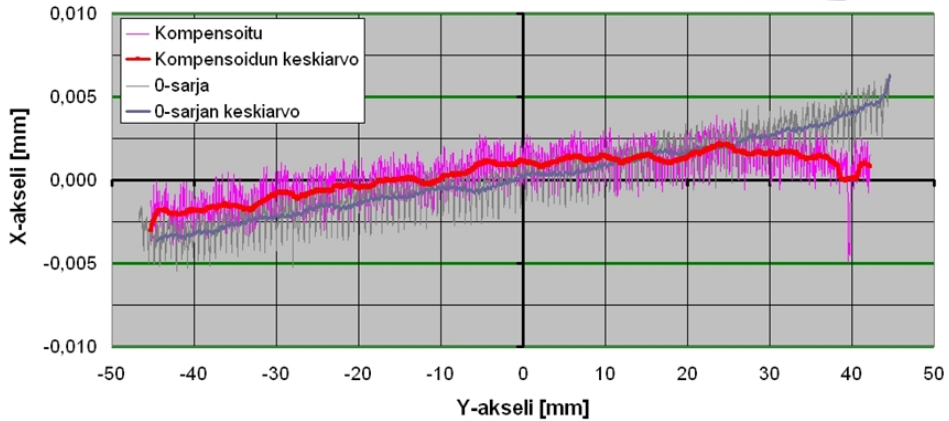
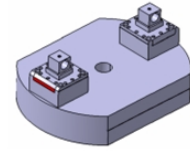
3.1.7 Kaaret

Suurin ero 0-sarjan ja kompensoidun sarjan välillä oli se, että 0-sarjan kaaret koneistettiin ympyränkaari-interpolaatiota käyttäen, kun taas korjatussa sarjassa käytettiin splini-interpolaatiota. Keskimäärin kaarien virheet pienenevät hieman. Tosin 0-sarjassakin kaaret ja pinnat ovat tarkkoja. Ohjaukseen määritetyn tarkkuuden ollessa $\pm 0,01$ mm voidaan kaikkia tuloksia pitää hyvinä. Kaarien virheet näkyvät kuvissa 24–31.

3. Tulokset

M4-kaari: vasen, 0-sarja vs. kompensoitu

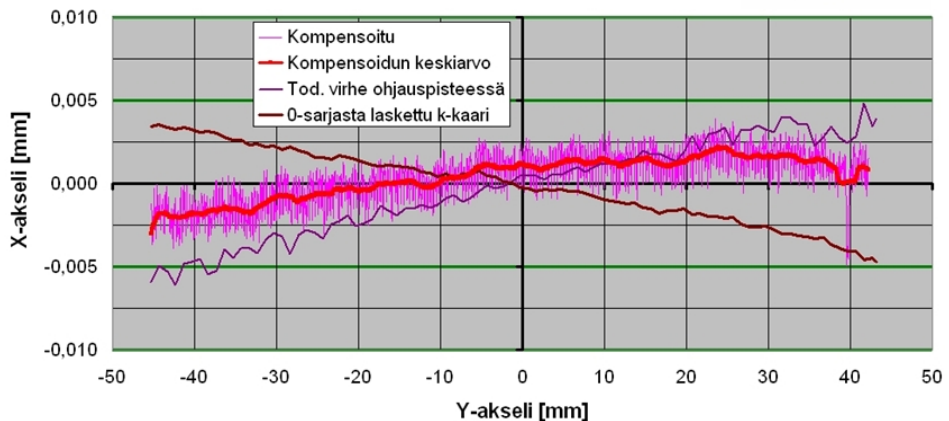
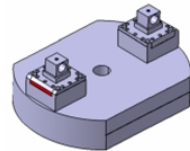
Deckel Maho DMU 200P



Kuva 24. Kompensoidun kaaren virheet ovat vain $\pm 0,003$ mm. 0-sarjan kaarikin on tarkka, virhe $\pm 0,005$ mm.

M4-kaari: vasen, todellinen tarkkuus

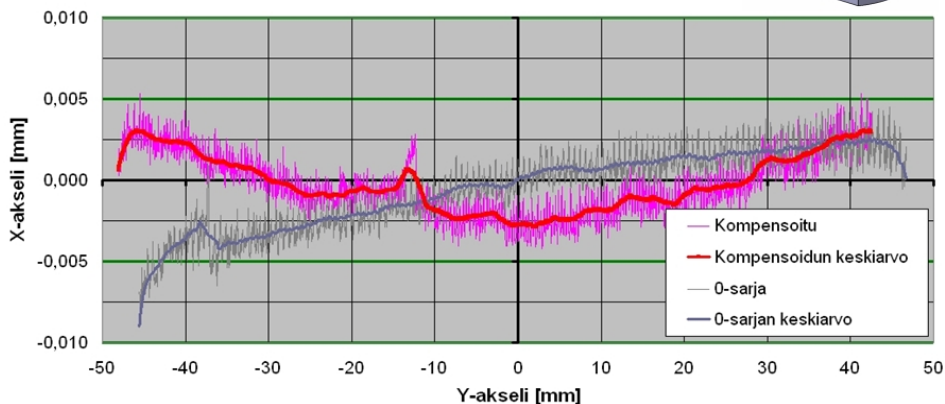
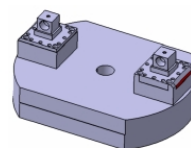
Deckel Maho DMU 200P



Kuva 25. Kaaren todellinen virhe eli kuinka tarkasti kaari noudattaa 0-sarjasta laskettua kompensoitua rataa ja sen ohjauspisteitä. Ruskean ja punaisen pitäisi ideaalitapauksessa olla päällekkäin. Eroavuus on luokkaa $\pm 0,005$ mm.

M4-kaaret: oikea 0-sarja vs. kompensoitu

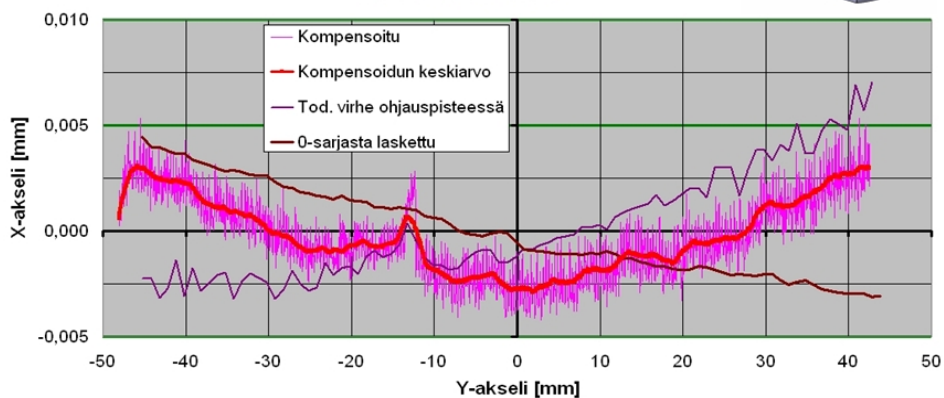
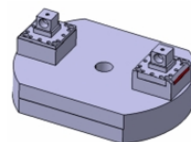
Deckel Maho DMU 200P



Kuva 26. Kompensoidun kaaren virheet ovat vain $\pm 0,004$ mm. 0-sarjan kaaren tarkkuuskin on hyvä, vain lievästi vinossa.

M4-kaaret: oikea, todellinen tarkkuus

Deckel Maho DMU 200P

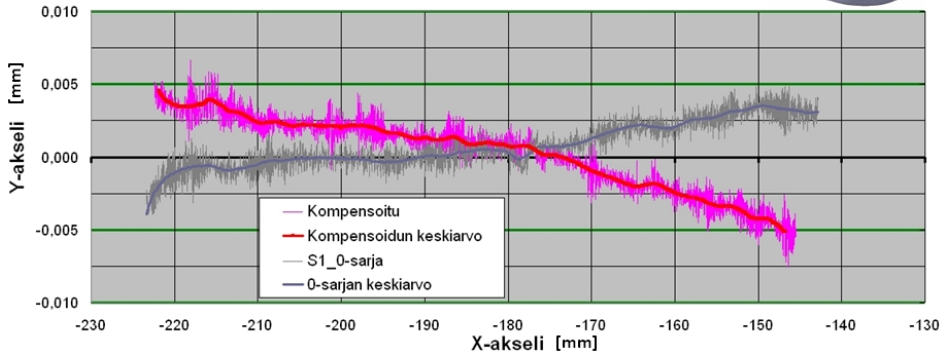
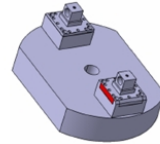


Kuva 27. Kaaren todellinen virhe eli kuinka tarkasti kaari noudattaa 0-sarjasta laskettua kompensoitua rataa ja sen ohjauspisteitä. Ruskean ja punaisen tulisi olla päällekkäin. Ero on suurimmillaan hieman yli 0,005 mm.

3. Tulokset

M5-kaaret: vasen, 0-sarja vs. kompensoitu

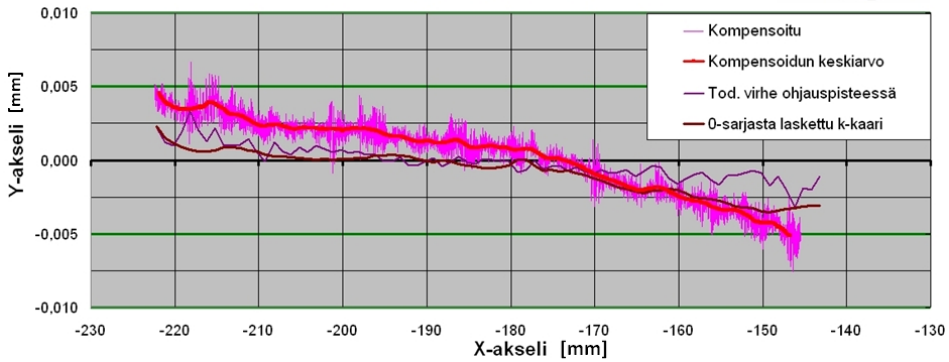
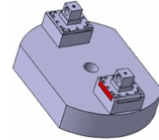
Deckel Maho DMU 200P



Kuva 28. 0-sarjan kaari on hieman tarkempi kuin kompensoitu kaari. Kompensoidun kaaren toleranssi on kuitenkin hyvä eli $\pm 0,005$ mm.

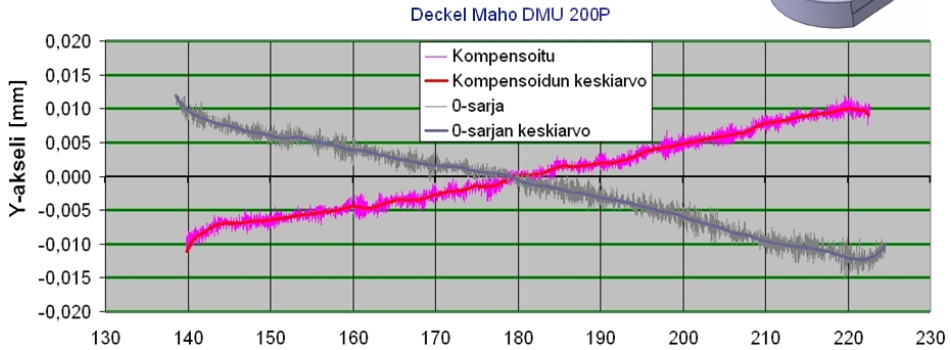
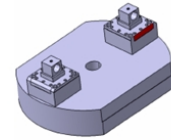
M5-kaari: vasen, todellinen tarkkuus

Deckel Maho DMU 200P



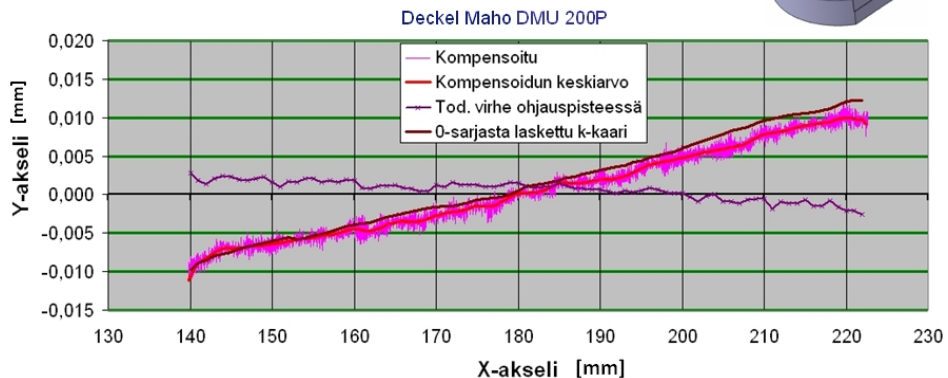
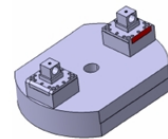
Kuva 29. Kompensoitu kaari noudattaa tarkasti 0-sarjasta laskettua kompensoitua rataa.

M5-kaaret: oikea, 0-sarja vs. kompensoitu



Kuva 30. 0-sarjan kaaressa origon X-suuntainen paikkavirhe on peräti 0,13 mm. Tästä syystä kaari on vinossa, kuten myös kompensoitu kaari, mutta vastakkaiseen suuntaan. Kyseessä ei ole systemaattinen työstökoneen virhe, vaan virhe on CAD/CAM-mallissa. Toisaalta kompensoitu kaari noudattaa tarkasti laskettua rataa ja sen ohjauspisteitä. Toisin sanoen kuvassa 30 punainen ja ruskea ovat lähes päällekkäin, ja todellinen koneistustarkkuus on erittäin hyvä eli noin $\pm 0,003$ mm.

M5-kaari: oikea, todellinen tarkkuus

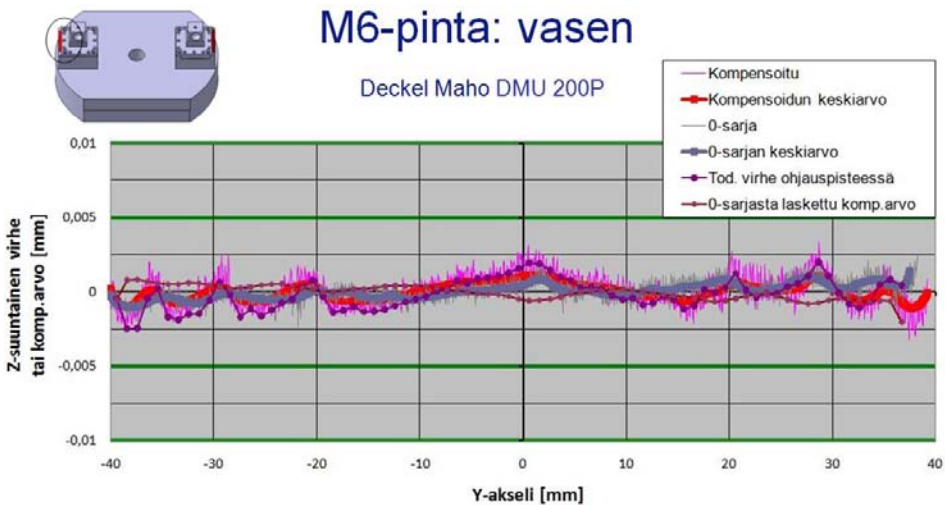


Kuva 31. Kompensoitu kaari noudattaa tarkasti 0-sarjasta laskettua rataa.

3. Tulokset

3.1.8 Pinnat

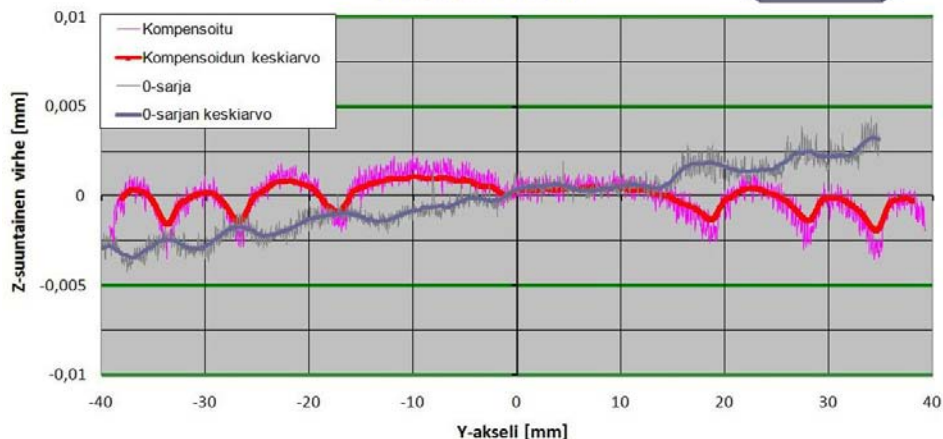
CAM-ohjelmoinnissa käytettiin pintojen osalta splini-interpolaatiota. Pinnat koneistettiin pallopää jyrsimellä. Visuaalinen pinnan laatu oli kaikissa testikappaleissa erittäin hyvä. Mittaustuloksista analysoitiin pinnan Z-akselin suuntainen virhe. Vasemmanpuoleisessa kappaleessa ei virhettä Z-suunnassa käytännössä esiintynyt, ja toleranssiksi testikappaleille saatiin $\pm 2,5 \mu\text{m}$ (kuva 32). Oikeanpuoleisen kappaleen pinnan lievä vinous saatiin oikaistua (kuva 33). Pinnan todellinen koneistus-tarkkuus on samaa luokkaa kuin virheet 0-sarjassa, eli molempien sarjojen koneistuksen toleranssiksi saatiin noin $\pm 4 \mu\text{m}$ (kuvat 33 ja 34).



Kuva 32. Pinta oli erittäin hyvä (toleranssi $\pm 2,5 \mu\text{m}$) ja suorassa kaikissa sarjoissa, joten kompensaation tarvetta ei ollut. Myös visuaalinen pinnanlaatu oli erittäin hyvä.

M6-pinta: oikea 0-sarja vs. kompensoitu

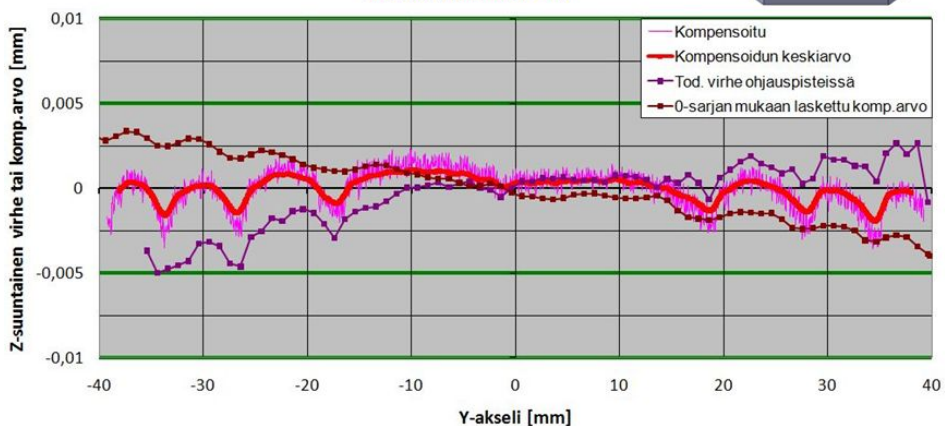
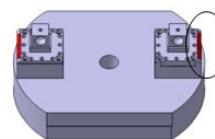
Deckel Maho DMU 200P



Kuva 33. 0-sarjan pinnan lievä vinous korjaantui kompensaatiossa. Pinnan laatu oli molemmissa sarjoissa erittäin hyvä. Kompensoidun sarjan toleranssiksi saatiin $\pm 2,5 \mu\text{m}$.

M6-pinta: oikea, todellinen tarkkuus

Deckel Maho DMU 200P



Kuva 34. Oikeanpuoleisen pinnan todellinen koneistustarkkuus eli kuinka tarkasti punainen rata seuraa ruskeaa rataa. Eroa on suurimmillaan 0,005 mm.

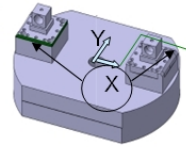
3. Tulokset

3.1.9 Suorat

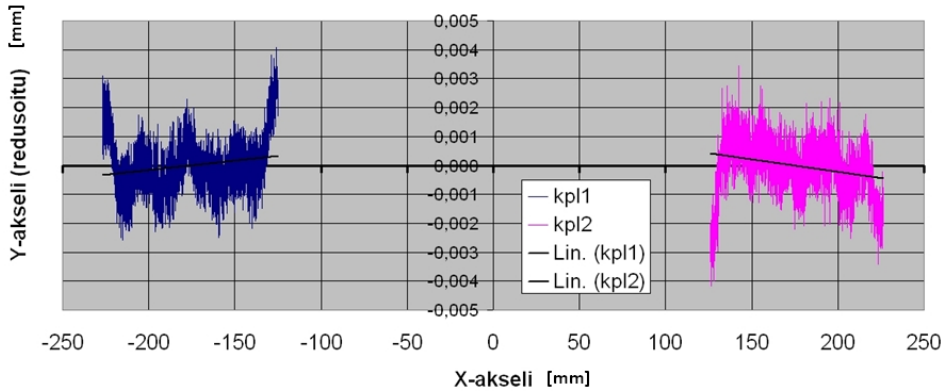
Y-akseli ei ole X-akseliin nähden täysin suorassa kulmassa. Molemmissa kappa-leissa (jigissä aina kaksi) ilmenee samansuuruinen kulmavirhe suuruudeltaan 23 kulmasekuntia ["], eli X:n ja Y:n välinen kulma on $90,0064^\circ$. X-akseli on mit-tausten referenssisuoran suuntainen, joten X-suuntaiset, koneistetut kyljet ovat odotetusti suorassa (kuva 35). Sen sijaan Y-suuntaiset kyljet ovat mainitun kul-mavirheen verran vinossa (kuva 36).

Suorat: X-akselin suuntaiset (mittausten referenssiakselin suuntaiset)

Deckel Maho DMU 200P

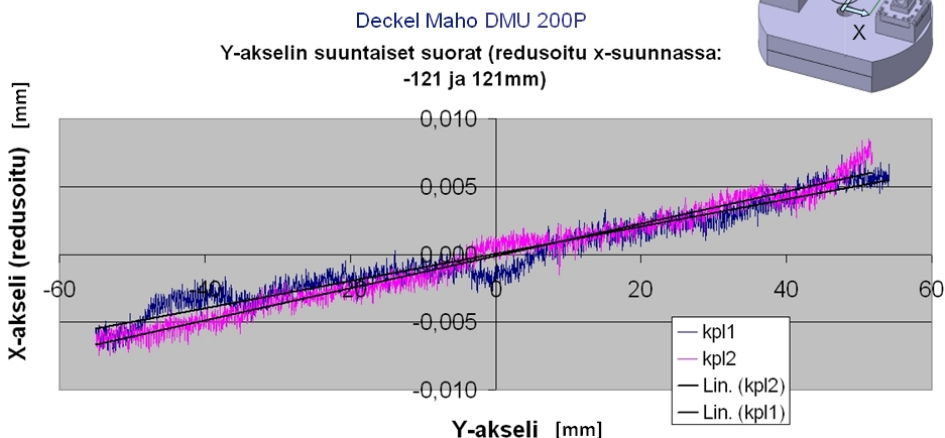


X-akselin (referenssi) suuntaiset suorat (redusoitu Y-suunnassa: -58,5 ja 58,5mm)



Kuva 35. Kappaleiden X-suuntaiset kyljet ovat suorassa.

Suorat: Y-akselin suuntaiset



Kuva 36. Kappaleiden Y-suuntaiset kyljet ovat vinossa. Molemmissa kappaleissa kulma-
virhe on $0,0064^\circ$.

3.1.10 Yhteenveto tuloksista

Deckel on kaiken kaikkiaan tarkka. Materiaalin lastuttavuus on ominaisuus, jota on vaikea määrittää mutta joka vaikuttaa oleellisesti siihen, millainen pinnanlaatu saavutetaan, ja myös mittatarkkuuksiin. Tilannetta voidaan muuttaa työkalu- ja työstöarvovalinnoilla. Työvaran suuruus viimeistelylastulle vaikuttaa lastunmuodostumiseen ja lastuamisvoimiin sekä siten mittatarkkuuteen (Valtonen 2009). Koneistajan kokemus oli työstöarvojen valinnassa ratkaisevan tärkeää. Lisäksi viimeistelylastu oli ohut ja työstövoimat pieniä, joten varreltaan lyhyt työkalu ei taipunut. Samoihin tarkkuuksiin olisi mahdollisesti päästy, vaikka materiaalina olisi ollut alumiinikin. Deckelillä koneistetaan pääasiassa raskaita hammaspyöriä. Jigi kappaleineen oli aivan liian kevyt, jotta hitausvoimilla olisi ollut vaikutusta.

Seuraavassa esitetään lyhyt yhteenveto kompensoinnin tuloksista.

- Kompensointi toimii erinomaisesti X/Y-tason avarrettuihin reikiin. Virheet pienenevät $0,015 \text{ mm} \rightarrow -0,005 \text{ mm}$.
- Tornien avarrettujen reikien paikoitustarkkuus parani merkittävästi $0,057 \rightarrow 0,017 \text{ mm}$. Samoin vastakkaisten reikien kohdistustarkkuus $-0,055 \rightarrow 0,008 \text{ mm}$.

3. Tulokset

- Tornin avarretut reiät ovat liian lyhyitä, jotta akseleiden kääntövirheitä voisi määrittää.
- Kaarien ja pintojen virheet ovat pieniä jo 0-sarjassa. Kompensaatiolla saadaan kuitenkin kaarien ja pintojen lievää vinoutta suoristettua. Suurin ero kaarien kohdalla on ratojen määrityksessä. 0-sarjassa käytettiin ympyränkaari-interpolaatiota, kompensoiduille kappaleille splini-interpolaatiota. Molemmissa lopputulos oli riittävän tarkka – varsinkin, kun ohjauksen tarkkuudeksi määritettiin 0,01 mm.
- Tasojen Y-suuntainen kohtisuoruuksivirhe X-akseliin nähden johtuu X/Y-akseleiden välisestä kulmavirheestä, joka on 23”.
- Kompensoitujen YZ-tasojen virheet pienenevät merkittävästi.
- Kompensaatio X- ja Y-suunnalle voidaan laskea funktioiden avulla.
- Z-suunnan kompensointi vaatisi lisätestejä, samoin C-akselin kääntövirheen todentaminen.

3.2 Kitamura Mycenter, Tasogears Oy

Käytössä oli vanhahko mutta toimiva postprosessori ja CAM-ohjelmisto. Todettiin, että postprosessorissa ilmeni avarruksessa pieni viive, josta seurasi virheilmoitus. Tämä voitiin kuitenkin editoida pois. Karan värinä aiheutti jonkin verran tarkkuus- ja pinnanlaatuvirheitä, joita ei voitu kompensoida.

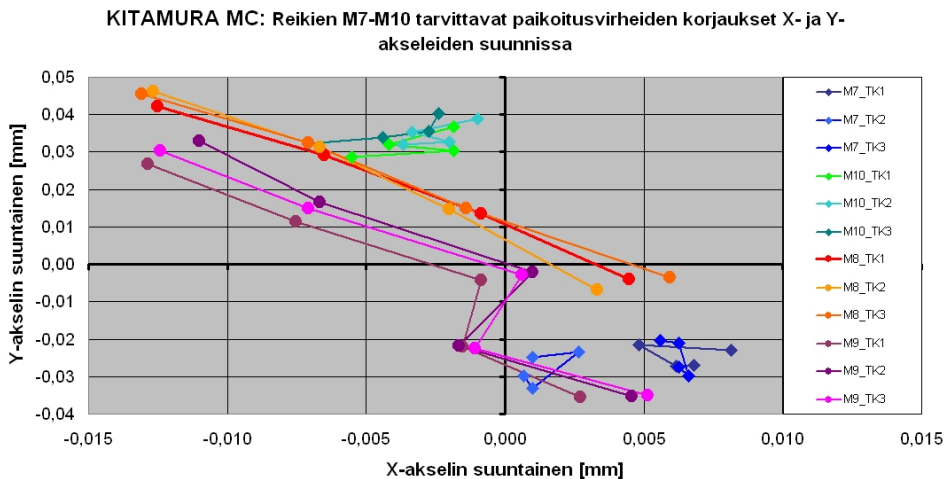
Kappaleet koneistettiin alumiinista EN AW 6082-T6, ja testikappaleiden koko oli 200 x 200 x 120 mm. Vertailutulosten saamiseksi kappaleita koneistettiin aina kolmen sarjoissa lukuun ottamatta kiilaurakappaleita, joissa sarjakoko oli kaksi.

Kitamurassa on takaisinkytkemätön resolveriohjaus, joten sillä ei voitu edes teoreettisesti voi päästä samaan tarkkuuteen kuin sauvaohjatuilla koneilla (kuten Deckel Maho). X-suunta on merkittävästi tarkempi kuin Y-suunta. X-suunnassa kompensaation merkitys havaittiin vähäiseksi. Y-suunnassa kompensaatio paransi tarkkuutta merkittävästi. Tyvikon testikappaleita koneistettiin kaikkiaan kolme sarjaa (lisäksi joulukuussa 2009 testattiin kaarien koneistusta). Kompensaation toimivuutta testattiin myös kappaleella, jossa on kaksi kiilauraa. Nämä kappaleet ovat em. alumiinia. Tasogears koneisti nämä kappaleet itsenäisesti, ts. projektiryhmän jäseniä ei ollut paikalla.

Koska kyseessä oli kolmiakselinen kone, ei testikappaleen tornin piirteillä ole suurta merkitystä, ja ne jätetäänkin tarkastelun ulkopuolelle. Todettakoon kuitenkin, että tornin kylkien piirteet saatiin koneistettua Kitamurailla tarkasti.

3.2.1 Reikäsarjat ja Y-suunnan korjaavat funktiot

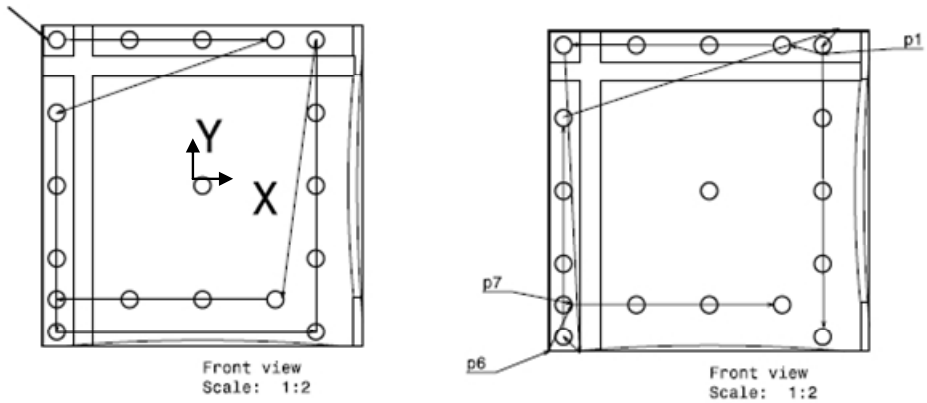
Virheiden systemaattisuus ilmenee kuvasta 37. Siinä 0-sarjan testikappaleiden toisiaan vastaavan reikäsarjan virheet on ilmaistu samalla värisävyllä ja yhdistetty viivoin samassa koneistusjärjestyksessä. M7, M8, M9 ja M10 kertovat, mikä reikäsarja on kyseessä. TK1, TK2 ja TK3 tarkoittavat testikappaleita 1,2 ja 3. Akseleiden asteikoista havaitaan myös, että virheet ovat X-suunnassa Y-suuntaa merkittävästi pienempiä.



Kuva 37. Reikäsarjojen virheiden systemaattisuus.

Reikäsarjat koneistettiin kahteen kertaan ja porrastetusti (ts. eri syvyyksiin) samaan kappaleeseen mutta käyttäen aina vastakkaisia lähestymissuuntia (kuva 38). Tällä haettiin suunnanvaihtovälyksen vaikutusta tuloksiin.

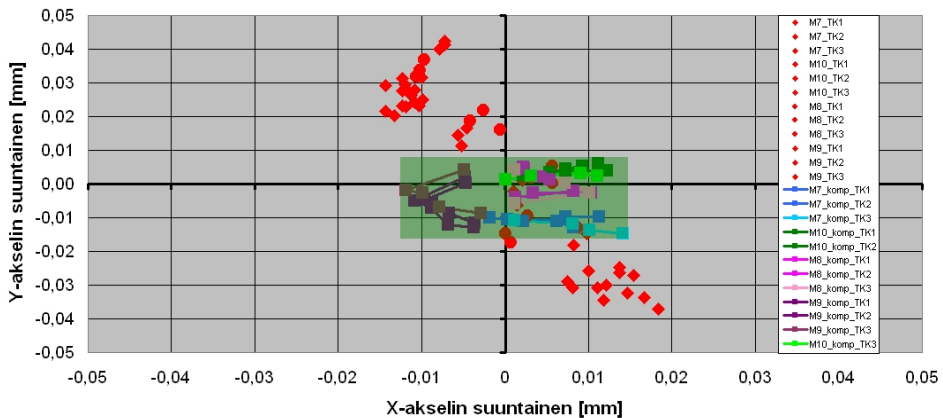
3. Tulokset



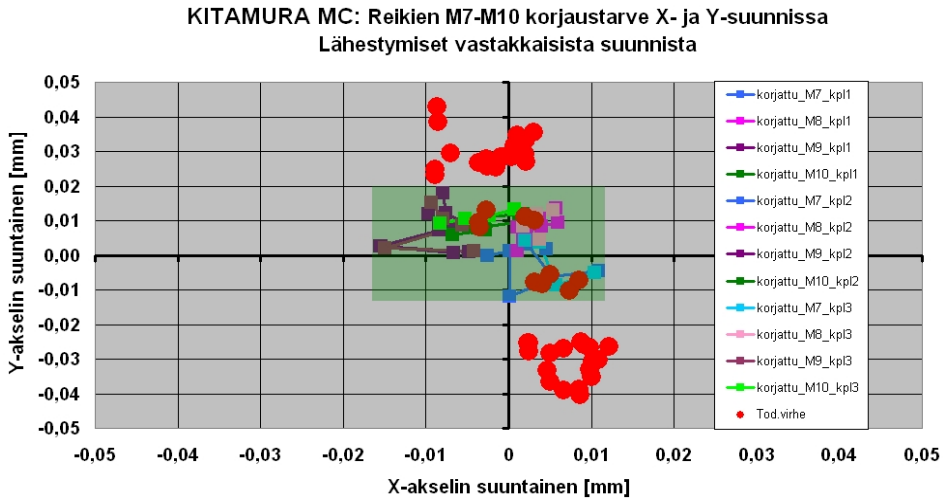
Kuva 38. Reiät koneistettiin vastakkaisista lähestymissuunnista. Origo on kappaleen keskellä.

Seuraavissa kuvissa on esitelty sarjojen tulokset eri lähestymissuunnista. Kuvan 39 tapauksessa pöytä liikkui Y-akselin positiiviseen ja kuvassa 40 negatiiviseen suuntaan. Korjaavat arvot Y-akselille on määritetty lähestymissuuntien mukaan.

KITAMURA MC: Kompensoitujen reikäsarjojen M7-M10 tulokset



Kuva 39. Pöytä liikkuu Y-akselin positiiviseen suuntaan. Kompensoitujen reikäsarjan paikoitusvirheet, kun arvoja verrataan tavoitearvoihin (esimerkiksi 45, 90), mahtuvat vihreään laatikkoon (toleranssi lähes $\pm 0,01$ mm). Punaiset pisteet ovat reikien todelliset paikoitusvirheet, kun niitä verrataan 0-sarjasta laskettuihin, korjaaviin koordinaatteihin (esimerkiksi 45.005, 90.023).



Kuva 40. Pöytä liikkuu Y-akselin negatiiviseen suuntaan. Virheet pienenevät tässäkin Y-suunnassa alle kolmasosaan. Kompensoitujen sarjojen toleranssi on $\pm 0,015$ mm (vihreä laatikko). Kompensoimattomana virhe on pahimmillaan 0,044 mm. Punaiset pisteet ovat reikien todelliset paikoitusvirheet.

Kuvista voidaan havaitaan, että virheet ovat X-suunnassa noin neljä kertaa pienemmät kuin Y-suunnassa. Toleranssi X-suunnassa on ”vakiona” $\pm 0,015$ mm. Reikien kompensoinnilla Y-suunnassa päästään noin kolme kertaa tarkempaan tulokseen eli samaan toleranssiin kuin X-suunnassa.

Reikäsarjojen perusteella voidaan määrittää Y-akselin kompensoitolausekkeet molemmille lähestymissuunnille. Kun pöytä liikkuu Y-akselin positiiviseen suuntaan, saadaan lausekkeeksi

$$y_{k+}(x,y) = -0,0000281x + 1,000345y, \text{ jos } y > 0,$$

$$y_{k+}(x,y) = 0,0000319x + 1,00033y, \text{ kun } y \leq 0,$$

missä x ja y ovat pisteet tavoitekoordinaatit ja

y_{k+} on y:n korjattu koordinaatti.

Kun pöytä liikkuu Y-akselin negatiiviseen suuntaan, saadaan

$$y_{k-}(x,y) = -0,0000533x + 1,00027y, \text{ jos } y > 0$$

$$y_{k-}(x,y) = 0,0000556x + 1,00047y, \text{ kun } y \leq 0.$$

Kuten havaitaan, ovat funktiot lineaarisia, koska mitatut virheet asettuivat lähelle lausekkeiden suoria. Kerroin x-koordinaatin edessä kuvaa suorien lievää vinoutta.

3. Tulokset

Tämä johtuu X- ja Y-akselin välisestä kulmavirheestä (kuva 34). Reikäsarjojen väliin jäävällä alueella kompensaation tarve perustuu oletukseen, jonka mukaan Y-suuntainen virhe kasvaa lineaarisesti etäännyttäessä origosta. Näin ei välttämättä ole, vaan se pitäisi todentaa lisäkokeilla, kuten reikäsarjoilla nykyisten sarjojen väliin jäävällä alueella. Lineaarisuudesta johtuen voidaan X:lle antaa kappaleen alueen (-100...100 mm) ylittäviä arvoja, esimerkiksi 130, tarkkuuden Y-suunnassa muuttumatta. Vertailun vuoksi taulukossa 8 funktioiden avulla laskettuja arvoja on verrattu todennettuihin kompensaatioarvoihin ts. arvoihin, joilla kompensaatio toimii.

Taulukko 8. Funktioiden avulla lasketut korjaavat arvot y:lle verrattuna todennettuihin kompensointiarvoihin. Mielenkiintoinen havainto on funktioiden avulla laskettujen arvojen ja todennettujen kompensointiarvojen välinen ero, kun jälkimmäisessä pöytä liikkuukin päinvastaiseen suuntaan. Eroiksi saadaan molemmilla liikesuunnilla vakioarvot eli -0,009 ja -0,012 mm.

tavoitearvot, (käytetään funktion laskennassa)

funktion arvo

Pöytä liikkuu Y:n positiiviseen suuntaan				
X	y	komp/y	komp 5/10	ero
45	90	90,022	90,023	0,000
0	90	90,031	90,031	0,000
-45	90	90,040	90,038	0,001
-90	90	90,049	90,049	-0,001
45	-70	-70,029	-70,029	0,000
0	-70	-70,023	-70,023	0,000
-45	-70	-70,017	-70,017	0,000
-90	-70	-70,011	-70,011	0,000
-90	45	45,033	45,030	0,003
-90	0	0,012	0,014	-0,002
-90	-45	-45,003	-45,002	0,000
-90	-90	-90,018	-90,018	0,000
M9: pöytä Y:n negatiiviseen suuntaan				Vällys
70	-90	-90,039	-90,030	-0,009
70	-45	-45,023	-45,014	-0,009
70	0	-0,006	0,003	-0,009
70	45	45,013	45,022	-0,009
70	90	90,026	90,035	-0,009

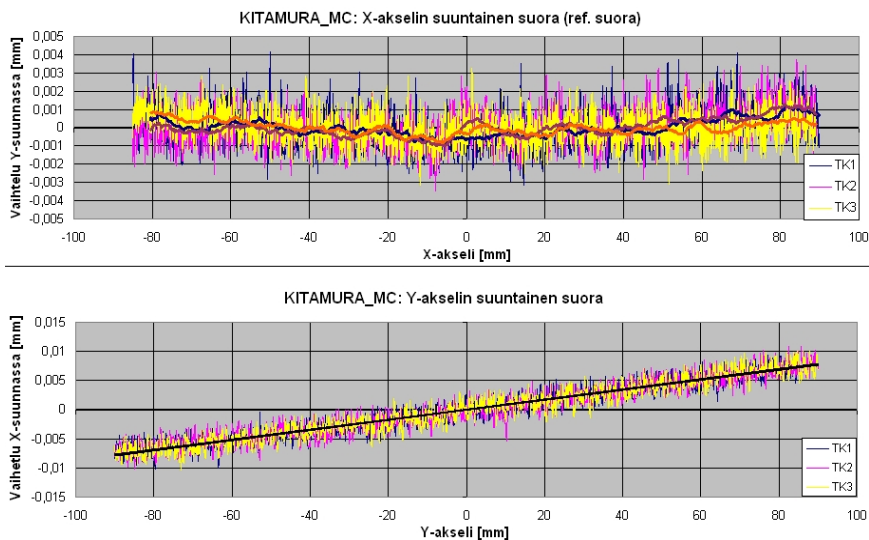
Pöytä liikkuu Y:n negatiiviseen suuntaan				
X	y	komp/y	komp 5/10	ero
45	90	90,016	90,017	-0,001
0	90	90,024	90,022	0,002
-45	90	90,032	90,036	-0,003
-90	90	90,041	90,039	0,001
45	-70	-70,036	-70,037	0,001
0	-70	-70,033	-70,032	-0,001
-45	-70	-70,030	-70,029	-0,001
-90	-70	-70,027	-70,027	0,001
M9: pöytä Y:n positiiviseen suuntaan				Vällys
70	-90	-90,051	-90,040	-0,012
70	-45	-45,040	-45,028	-0,012
70	0	-0,024	-0,013	-0,012
70	45	44,992	45,004	-0,012
70	90	90,005	90,017	-0,012

funktion arvon ja korjaavaan arvon erotus toimivaksi todettu korjaava arvo (kompensoidusta sarjasta)

Laskennallinen vällys, kun lähestytään vastakkaisesta suunnasta. Ts. suunnanvaihtovällys. Vällys ilmenee myös taulukoiden välillä saman pisteen "komp" arvoja toisiinsa vertailemalla.

3.2.2 X- ja Y-akseleiden välinen kohtisuoruus

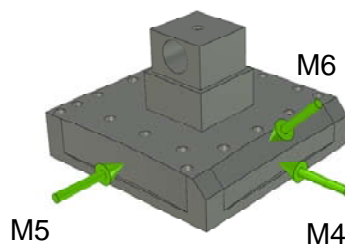
Myös Kitamurailla ilmeni X- ja Y-akseleiden välillä pieni kohtisuoruuskulmavirhe. Eri sarjoissa kulmavirhe on vaihdellut hieman välillä $90,0048^\circ \dots 90,0057^\circ$. Y:n korjaavissa funktioissa kulmavirhe korjataan x-arvon edessä olevalla kertoimella. Kuvassa 41 näkyvät skannaustulokset X- ja Y-akselin suuntaisilta kyljiltä.



Kuva 41. X- ja Y-akseleiden välillä on pieni kohtisuoruusvirhe. Virhe vaihteli eri sarjoissa välillä $17,3 \dots 20,5$ kulmasekuntia ["].

3.2.3 Kaaret ja pinta

Virheiden systemaattisuus ilmenee selkeästi myös kaikissa kaarissa, kun vertaa kolmen kappaleen sarjojen mittaustuloksia toisiinsa.



Kuva 42. Kaaret M4, M5 ja M6.

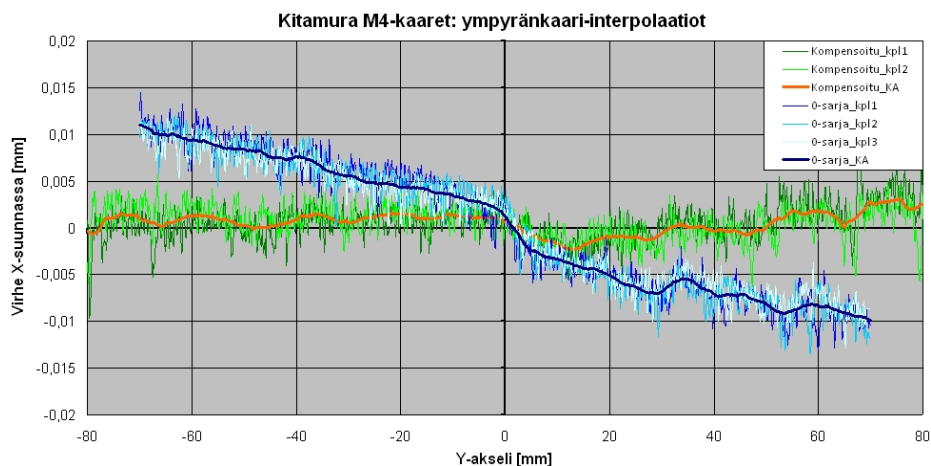
3. Tulokset

Säteeltään 1 m:n kaaret koneistettiin Kitamuran testikappaleisiin kolmella eri tavalla:

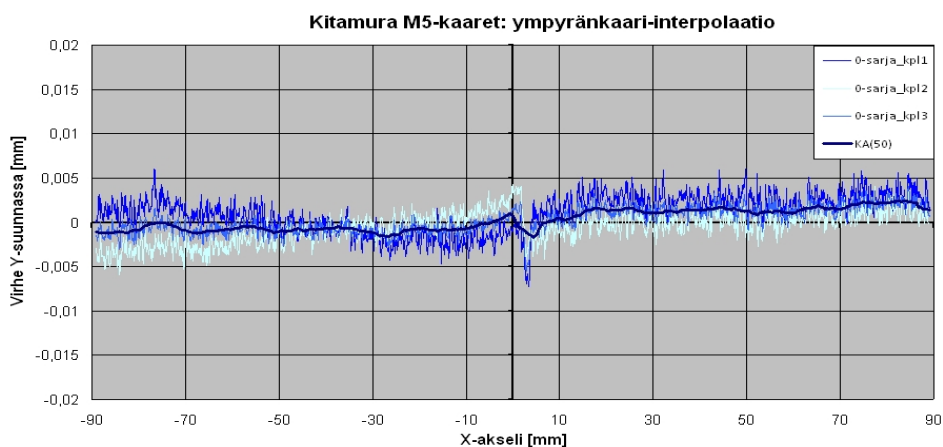
- ympyränkaari-interpolaatiolla, jossa keskipiste ja säde kompensoitiin
- splini-interpolaatiolla, jossa 0-sarjan kaarien muotovirheet korjattiin
- splini-interpolaatiolla, jossa splinikäyrä noudatti optimaalista ympyränkaarta.

Ympyränkaari-interpolaatiossa keskipisteen muutoksella oli korjaava vaikutus. M4-kaarien säde jopa pieneni hieman 0-sarjaan nähden, vaikka kompensaatiossa sädettä hieman suurennettiin. Toisaalta suurisäteisillä kaarilla pienetkin, μm -luokkaa olevat virheet kaarien muodoissa vaikuttivat merkittävästi säteen suuruuden määrittämiseen, joten sille ei voi antaa suurta painoarvoa. 0-sarjan kaaren vinous saatiin korjattua täysin – siis muuttamalla ympyrän keskipisteen koordinaatit (kuva 43). Keskipisteen y-suuntaisen virheen keskiarvo 0-sarjassa oli noin 0,17 mm. Tämä korreloi aiemmin Y-akselin suuntaisesta kompensatiotarpeesta todetun kanssa.

Kompensoimattomien M5-kaarien virheet ovat ympyränkaari-interpolaatiossa Kitamuralla marginaalisen pienet (kuva 44). Toisaalta kaaret ovat mittausten referenssisuoran suuntaiset, joten ne ovat oletustikin suorassa. Korjauksen tarvetta ei 0-sarjan perusteella ollut. Keskipisteen X-suuntainen kompensointiarvo oli 0,018 mm, ja kompensoidun sarjan virheiksi mitattiin -0,018 ja -0,023 eli juuri vastakkaisuuntaisen siirtymän verran. Voidaankin tehdä johtopäätös, että kaarien X-suunnan kompensoinnilla ei saavuteta merkittävää etua, kuten ei reikäsarjoissakaan.



Kuva 43. M4-kaarien virheet ympyränkaari-interpolaatiolla. Ympyrän keskipiste ja säde kompensoitiin. Kompensoidut kaaret (vihreät) ovat suorassa, eli kompensaatio toimi. Näiden kaarien keskimääräinen virhe on merkitty punaisella. Ympyrän Y-suuntaiset paikavirheet olivat kompensoidussa sarjassa välillä 0,017...-0,007 mm ja kompensointiarvo oli 0,168 mm. 0-sarjassa säteen keskiarvo oli 999,8 mm, joten säteen kompensointiarvo oli 1000,2 mm.



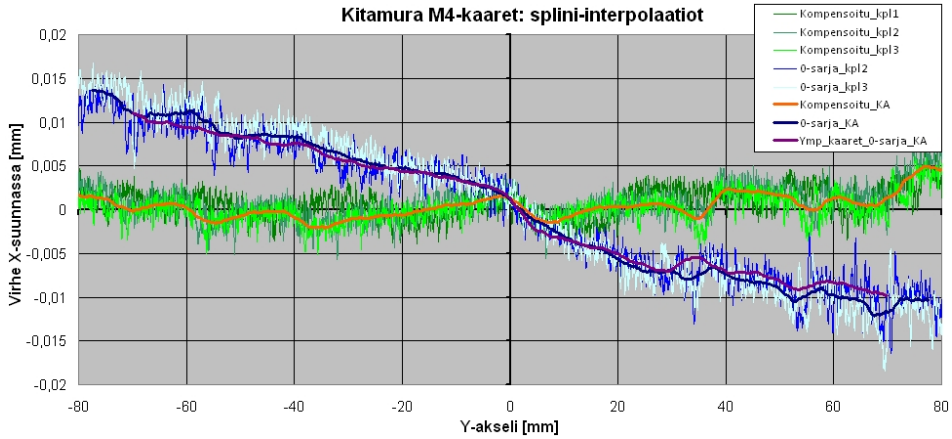
Kuva 44. M5-kaarien virheet ympyränkaari-interpolaatiolla. Jos värähtelyä ja suunnanvaihtoheilaudusta (keskellä) ei huomioida, toleranssi olisi noin $\pm 0,003$ mm. Sininen on kaarien keskimääräinen virhe. Kompensaatiotarvetta ei ole.

Kuten ympyränkaari-interpolaatiossa, myös splini-interpolaatiossa M4-kaaret olivat 0-sarjassa samalla tavoin vinossa (kuva 44). Origin virhe Y-suunnassa oli

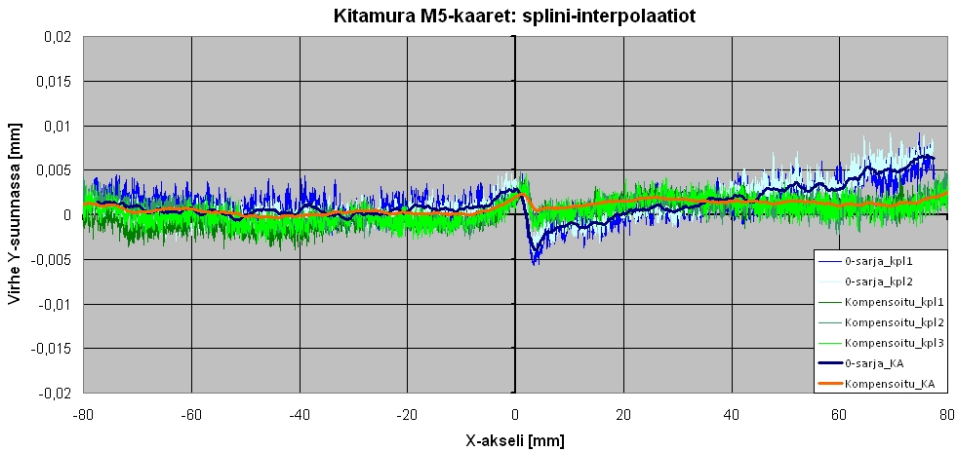
3. Tulokset

-0,136...-0,187 mm, eli vinous voitiin kompensoida, kuten korjattu sarja osoittaa. Säteeksi 0-sarjan kaarille saatiin 999,8...1000,0 mm.

Jos karan värähtelystä johtuva pinnanlaatu jätetään huomiotta, olivat keskimääräiset muotovirheet pieniä kaikissa sarjoissa. Kuten M4-kaarien vinoutta, myös M5-kaarien muotovirheitä, kuten suunnanvaihtovälystä ja kuvan 46 virheiden kasvua X-akselin positiivisella puolella voitiin kuitenkin pienentää.

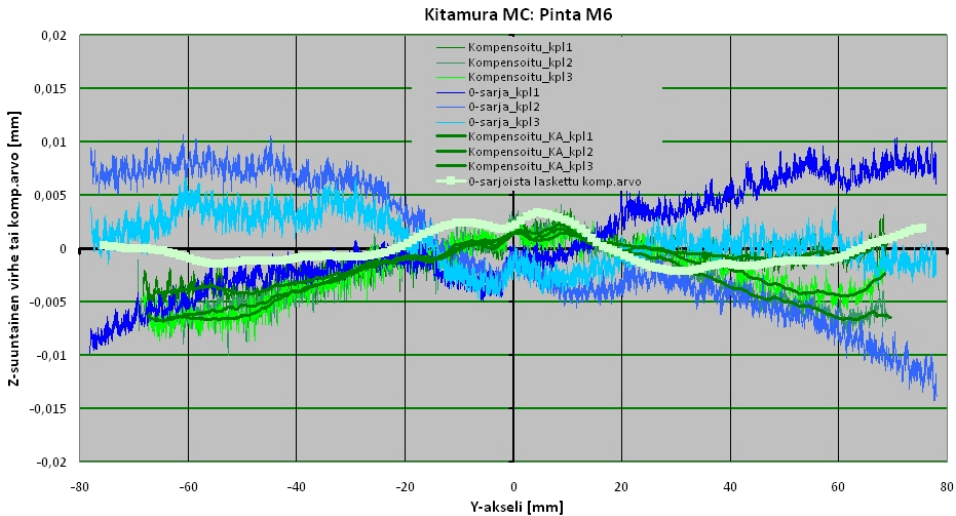


Kuva 45. Splini-interpolaatio M4-kaarilla.



Kuva 46. M5-kaarien virheet, splini-interpolaatio. 0-sarjan (sinisellä) suunnanvaihtovälys näkyy selvästi keskellä, ja sitä kyettiin korjaamaan (vihreät ja niiden keskiarvo oranssi), samoin kuin virheiden lievää kasvua oikealla. Virheet ovat tässäkin sinänsä pieniä, ja kaaret ovat lähes suorassa. 0-sarjan säteeksi saatiin 1000...1001,3 mm, ja origon x-suuntainen virhe on välillä -0,015...-0,034 mm.

Pinnan Z-suuntainen vinous vaihteli 0-sarjassa, kuten kuvasta 47 havaitaan. Kolmen 0-sarjan kappaleen virheet näkyvät kuvassa sinisen eri sävyillä ja niiden keskiarvona lasketut kompensatioarvot ovat vaalealla käyrällä. Kompensaation tulokset ovat kuvassa vihreän sävyillä ja toistuvat lähes identtisinä eli toistotarkuus parani ja kaaret ovat lähes suorassa.



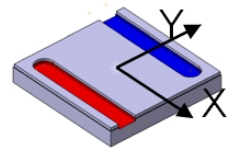
Kuva 47. M6-pinnan virheet. 0-sarjan (siniset) muotovirhe on systemaattinen, mutta kaarien "vinous" vaikuttaa satunnaiselta. Kompensoidussa sarjassa vinous (vihreä väri) saatiin pois, mutta lievä muotovirhe esiintyy yhä. Korjatun sarjan toleranssi on kuitenkin lähellä arvoa $\pm 0,005$ mm ja kompensoimattoman sarjan arvoa $\pm 0,01$ mm.

3.2.4 Testikappale: kiilaura

Luvussa 3.2.1 mainittujen funktioiden Y-suuntaista toimivuutta testattiin kappaleella, jossa oli kaksi kiilauraa. X-suunnassa virheet olivat pieniä, eikä kompensatiolla saavutettu merkittävää etua. Urat koneistettiin porrastetusti. Syvimmällä oli kompensoitu ura ja sen päällä 0,5 leveämpi, korjaamaton ura. Kompensaatiolaskennassa huomioitiin lähestymissuunnat ja suunnanvaihdot (kuva 48).

3. Tulokset

Lasketaan kompensoidut Y:n arvot kiilaurien pisteille									
Kiilaura nro	Pöytä liikkuu Y+ suuntaan			Kommentit	Pöytä liikkuu Y- suuntaan			Kommentit	
	X	Y	Y-komp		X	Y	Y-komp		
1	-120	55	55,022	piste1: LP_Y+					
1	70	55	55,017	piste2: LP_Y+					
1					70	70	70,015	piste3_läh Y- [Kaaren KP]	
1					70	85	85,019	piste4_läh Y-	
1					-120	85	85,029	piste5_läh Y-	
2					120	-55	-55,019	piste1_läh Y-	
2					-70	-55	-55,030	piste2_läh Y-	
2	-70	-70	-70,025	piste3: LP_Y+ [Kaaren KP]					
2	-70	-85	-85,030	piste4: LP_Y+					
2	120	-85	-85,024	piste5: LP_Y+					



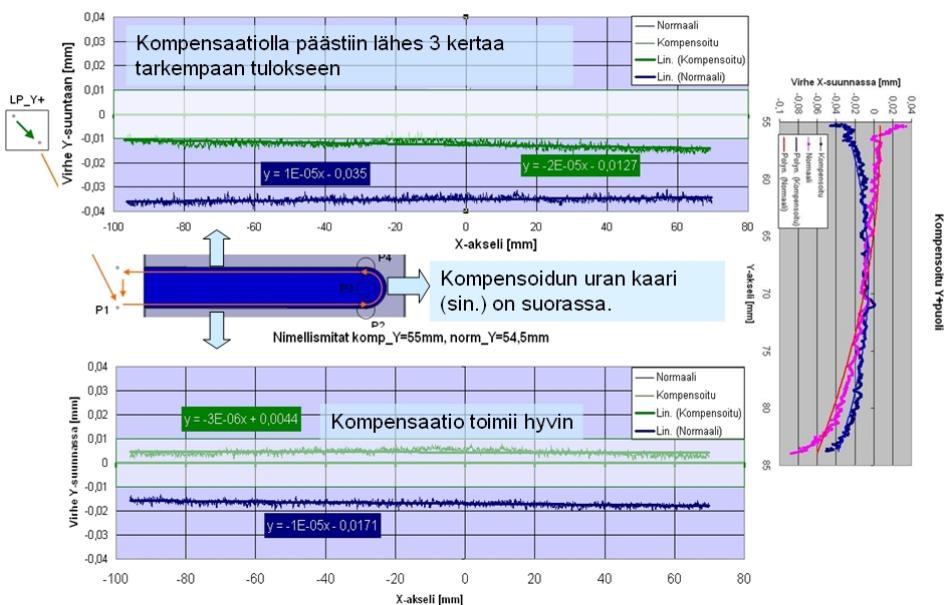
Kuva 48. Kiilauran kompensointiarvot.

Y:n positiivisella puolella olevan kiilauran tarkkuutta pystyttiin merkittävästi parantamaan. Uran tarkkuus Y-suunnassa parani noin kolminkertaiseksi $-0,035$ mm:stä $0,012$ mm:iin ja $-0,017$ mm:stä $0,004$ mm:iin. Myös korjatun kiilauran päädyn puoliympyrän muoto on kompensoimatonta tarkempi. Kaaren keskellä näkyy pieni suunnanvaihtovälitys. Kuten kuva 46 osoitti, X-suuntaista välystä voisi periaatteessa kompensoida, mutta se edellyttäisi kaaren jakamista neljäsosaympyröiksi, kuten kuvassa 14. Ensimmäisen kiilauran tulokset on esitetty kuvassa 49.

Kiilaura, tulokset kiilaurasta 1.

Kitamura Mycenter

Nimellismitat: komp_Y=85mm, norm_Y=85,5mm

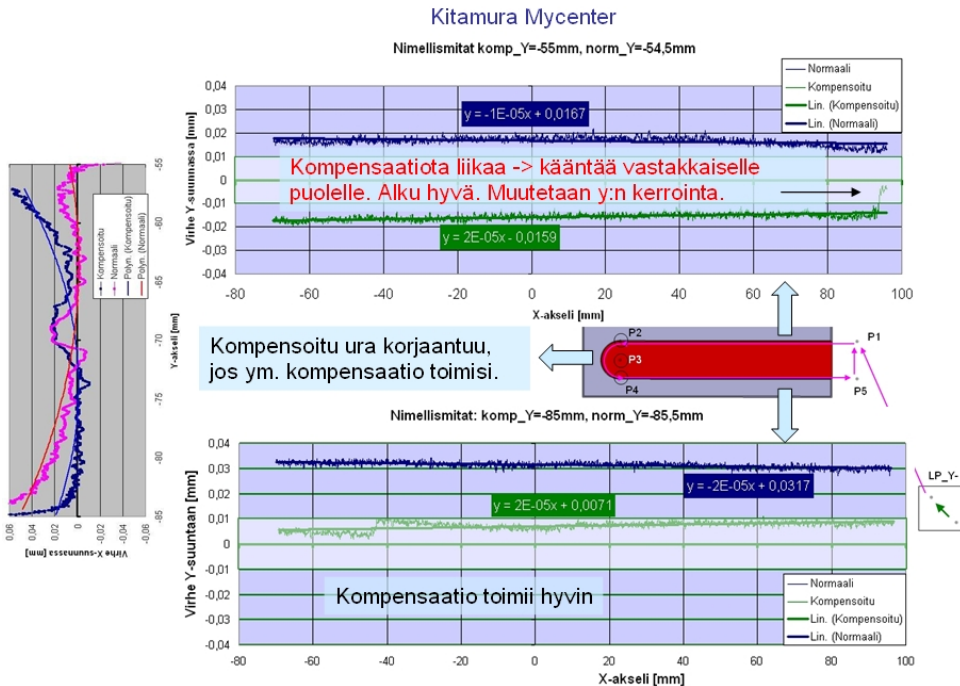


Kuva 49. Tulokset ensimmäisestä kiilaurasta. Kompensatio toimii hyvin. Tavoitteena oli päästä kuvissa olevalle vaalealle alueelle eli toleranssiin $\pm 0,01$ mm. Samoin uran kaarissa päästiin tarkempaan lopputulokseen.

Toisen kiilauran alimmaisen seinämän paikkatarkkuus parani 0,032 mm:stä 0,007 mm:iin. Ylempi seinämä kompensoituu liikaa eli 0,017 mm:stä -0,016 mm:iin, joten virhe ei ilmeisesti kasva täysin lineaarisesti y:n funktiona, kuten oletusarvona oli. Kaiken kaikkiaan tuloksia voidaan kuitenkin pitää erittäin hyvinä. Tämän kiilauran tulokset näkyvät kuvassa 50.

3. Tulokset

Kiilaura, tulokset kiilaurasta 2.



Kuva 50. Tulokset toisesta kiilaurasta. Kompensaatio toimii hyvin alimpaan seinämään. Ylempi seinämä kompensoituu liikaa – muutoin kaarikin saataisiin vielä tarkemmaksi.

3.2.5 Yhteenveto Kitamura Mycenterin tuloksista

- Kitamuran virheet ovat selkeästi systemaattisia.
- X-suunnassa Kitamura on merkittävästi tarkempi kuin Y-suunnassa. Toleranssi X-suunnassa on $\pm 0,015$ mm.
- Y-suunnassa kompensaatiolla päästään suurimmaksi osaksi toleranssiin $\pm 0,01$ mm, mitä täytyy pitää erinomaisena tuloksena. Enimmillään virhe oli kompensoiduissa piirteissä $\pm 0,016$ mm, joka sekin on jo hyvä tulos. Korjaamattomana virheet ovat pahimmillaan hieman yli 0,04 mm.
- X- ja Y-akselin välinen kulmavirhe on välillä 17,3...20,5”.
- Kaaren (M4) ja pinnan (M6) vinous saatiin suoristettua. Sinänsä ympyränkaari-interpolaatio toimii, mutta Y-suuntainen kaaren keskipisteet paikkavirhe vaatii korjausta. X-suunnassa kaaret ovat lähes suorassa (M5). Myös lieviä muotovirheitä (kuten suunnanvaihtovälitys) voidaan korjata.

- Kompensaatiofunktiot paransivat merkittävästi tarkkuutta kiilaurallisessa testikappaleessa yhtä särmää lukuun ottamatta.

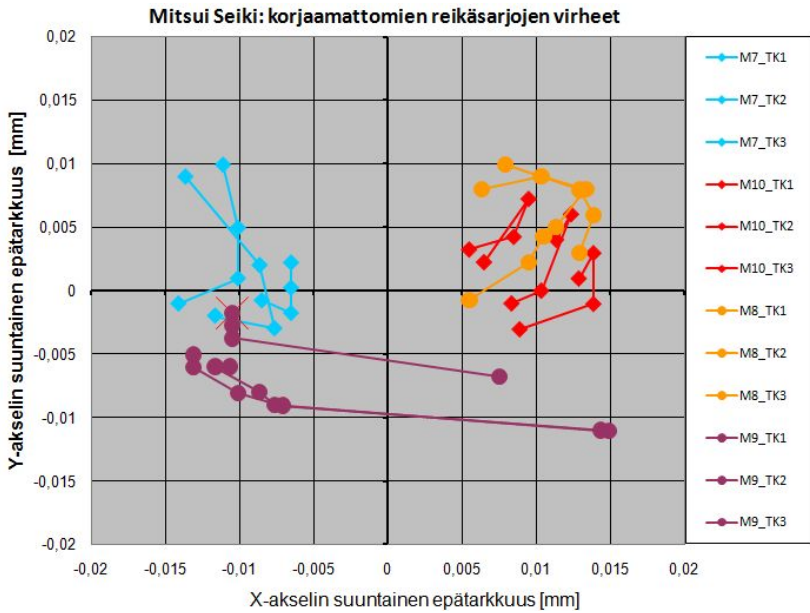
3.3 Mitsui Seiki HR-5B (Oulun yliopisto)

Mitsui Seiki on vaakakarainen, kolmiakselinen kone, jossa on lisäksi asteen porrastuksella kääntyvä indeksipöytä. Testikappaleiden tulosten mukaan Mitsuilla päästään toleranssiin $\pm 15 \mu\text{m}$, paitsi suurisäteisten ($r = 1 \text{ m}$) kaarien koneistuksessa, joissa ilmeni yllättävää ohjauksen epätarkkuutta.

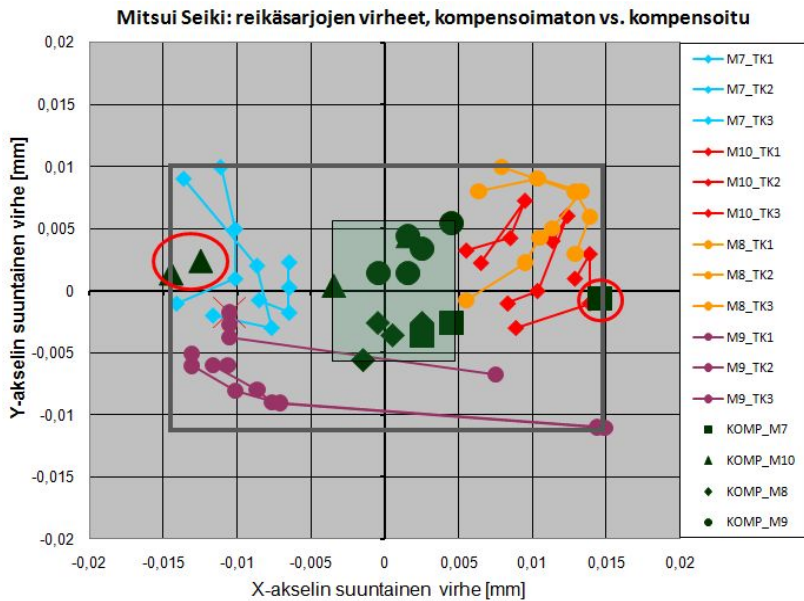
Kuvassa 51 on esimerkkinä Mitsuilla koneistettujen kolmen 0-sarjan kappaleiden reikäsarjojen virheet. Virheiden systemaattisuus ilmenee väreistä, sillä kappaleiden toisiaan vastaava sarja on ilmaistu samalla värillä ja yhdistetty viivoin samassa koneistusjärjestyksessä. Muista testikoneista poiketen virheet ovat X-suunnassa ($-15 \mu\text{m} \dots 15 \mu\text{m}$) suurempia kuin Y-suunnassa ($-10 \mu\text{m} \dots 10 \mu\text{m}$), kuten kuvassa 52 suurimpien virhearvojen kautta kulkeva harmaa suorakaide osoittaa. Myös aiempien Mitsuilla suoritettujen BAS- ja DBB-testien mukaan koneen tarkkuus Y-suunnassa on parempi kuin X-akselin suunnassa.

Korjaus tehtiin kunkin reiän keskimääräiselle virheelle ja kompensoitu reikäsarja koneistettiin. Korjatussa sarjassa virheet puolittuivat Y-suunnassa 0,01 mm:stä 0,005 mm:iin, kuten kuvan 53 keskellä sijaitseva vihreä suorakaide havainnollistaa. Myös X-suunnassa kolmea punaisella rengastettua poikkeusta lukuun ottamatta virheet pienenivät kolmasosaan. Reikäsarjojen perusteella voitiin myös arvioida origoksi valitun reiän M11 paikkaa. Kompensoimattomissa sarjoissa M11 reiän paikkavirhe oli X-suunnassa $3 \dots 4 \mu\text{m}$ ja Y-suunnassa $-2 \dots -5 \mu\text{m}$. Kompensoidussa kappaleessa virhe Y-suunnassa oli 0 ja X-suunnassa $3 \mu\text{m}$.

3. Tulokset

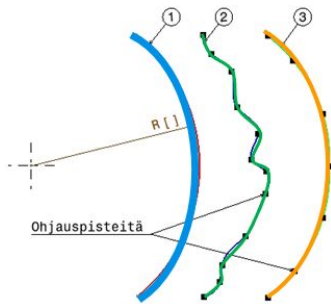


Kuva 51. Reikäsarjojen virheiden systemaattisuus, Mitsui Seiki.



Kuva 52. Mitsuiin korjaamattomien ja kompensoitujen (vihreät merkit) reikäsarjojen tulokset. X-suunnassa seitsemästätoista reiästä neljästätoista virheet pienivät kolmasosaan. Y-suunnassa kaikki virheet puolittuivat.

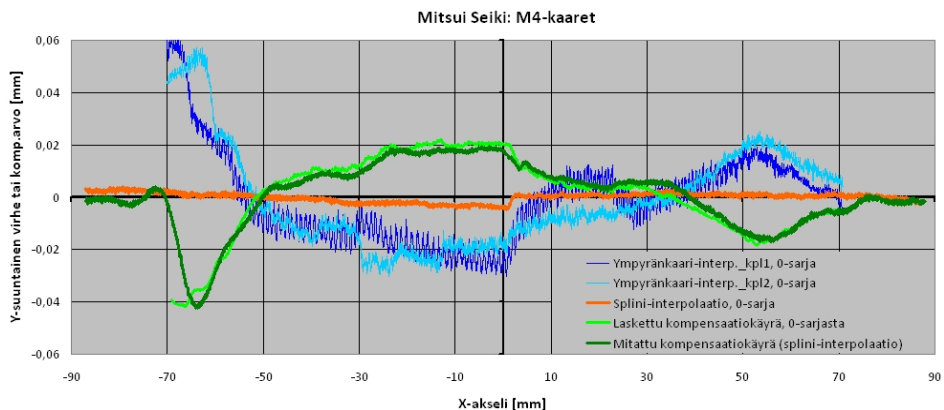
Ohjaus ei kykene ympyränkaari-interpolaatioon suurisäteisillä kaarilla. Sen sijaan splini-interpolaation ohjaus toteuttaa tarkasti. Siinä kaari jaettiin useampaan osaan, ja se koostui sekä suorista että ympyränkaarista. Kaaret koneistettiin seuraavin tavoin:



1. ympyränkaari-interpolaatiolla (annetaan keskipiste ja säde)
2. laskemalla kompensoidut arvot (ohjauspisteet ja splini-käyrä) 1:ssä ilmenneille virheille ja koneistamalla ”pätkissä”
3. seuraamalla ideaalista ympyränkaarta ”pätkissä” (ohjauspisteet ja splini).

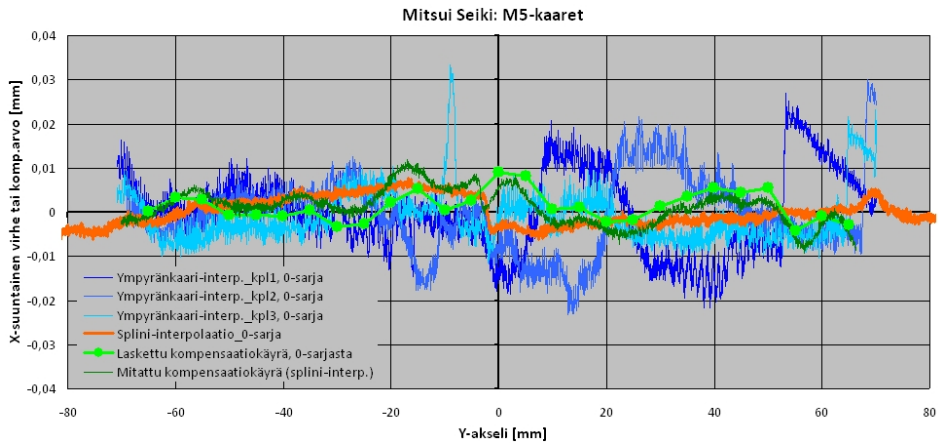
Kuva 53. Ympyränkaari-interpolaation kaarien koneistaminen.

Kuvissa 54 ja 55 näkyy sinisellä ympyränkaari- ja oranssilla splini-interpolaation tulokset. Vaaleanvihreä käyrä on 0-sarjan ympyränkaari-interpolaation virheiden mukaan laskettu tarvittava korjaus ja tummanvihreä splini-interpolaatiolla toteutettu kompensaatio sille. Kuten kuvasta havaitaan, ovat vihreät käyrät lähes päällekkäin ja oranssin käyrän virheet pieniä. Splini-interpolaatiolla päästään siis tarkkoihin tuloksiin.



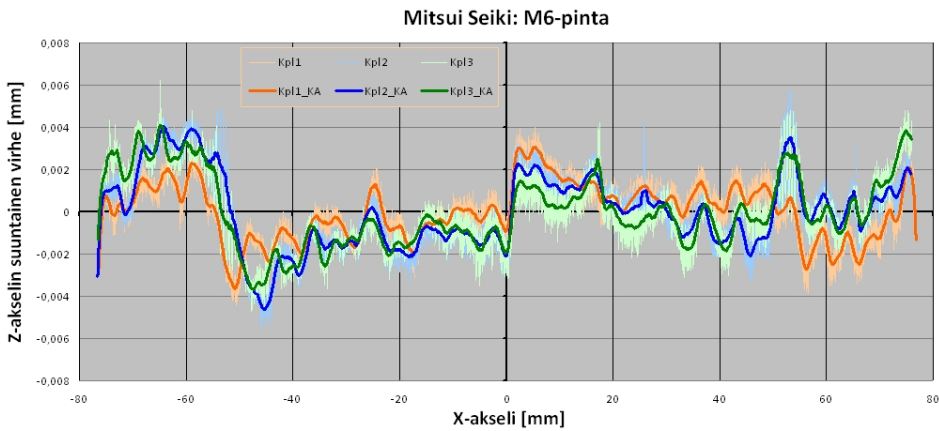
Kuva 54. X-akselin suuntaisten kaarien tulokset ympyränkaari- ja splini-interpolaatiossa, joista jälkimmäisellä päästään kymmenen kertaa tarkempaan tulokseen ja toleranssiin $\pm 4 \mu\text{m}$.

3. Tulokset



Kuva 55. Y-suuntaisilla kaarilla splini-interpolaation toleranssi on $\pm 6 \mu\text{m}$ ja ympyränkaari-interpolaation $\pm 25 \mu\text{m}$.

Pinta koneistettiin 12 mm:n pallopääterällä ja osissa, eli NC-koodi rakentui viivojen- ja kaarien pätkistä. Kuvassa 56 näkyy pinnan Z-akselin suuntaiset virheet. Koneistuksen tarkkuudeksi saatiin $\pm 5 \mu\text{m}$ eli käytännössä sama kuin muissakin splini-interpolaatioissa Mitsulla.



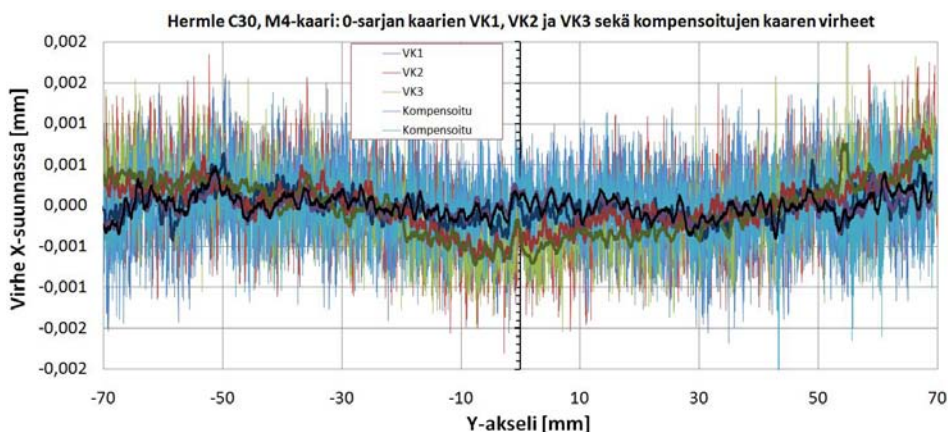
Kuva 56. Pinnan Z-suuntainen virhe. Virheet ovat selkeästi systemaattisia.

Yhteenvedona mainittakoon, että Mitsulla päästiin kompensatiolla noin kaksi kertaa tarkempaan lopputulokseen reikäsarjoissa ja jakamalla kaaret osiin peräti kymmenen kertaa tarkempiin tuloksiin. Syytä sille, miksi ohjaus on epätarkka ympyränkaari-interpolaatioissa ja suurisäteisillä kaarilla, ei tiedetä. Ohjauksena

on ikääntynyt Fanuc 11M. Reikäsarjojen kompensaatiossa päästiin lähes poikkeuksetta tarkkuuteen $\pm 5\mu$, joka vastaa Yasda YBM-850V-tarkkuuskoneistuskeselellä saavutettavaa tarkkuutta. Tuloksia koneiden välillä on vertailtu kuvassa 58. Syy sille, miksi kolmessa reiässä seitsemästätoista tulokset eivät X-suunnassa parantuneet, voi juontua esimerkiksi odottamattomasta suunnanvaihdosta tms. koneistuksen aikana.

3.4 Herme C30 (VTT), Hermle C40 (Oulu PMC osuuskunta) ja Yasda YBM-850V (Oulun yliopisto)

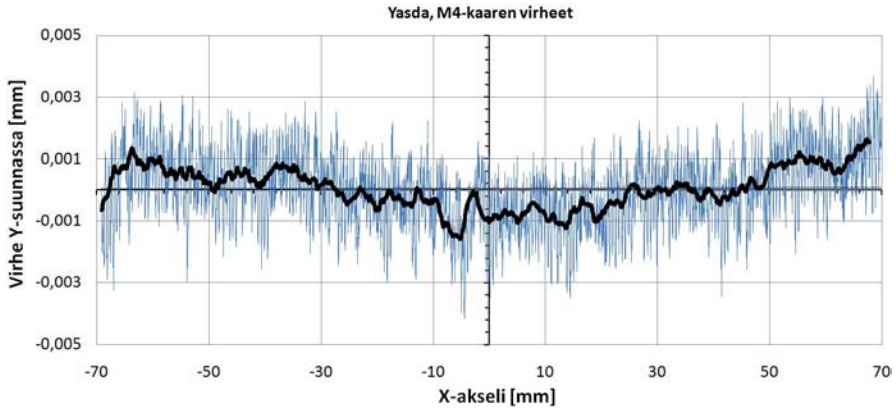
Hermlet ja Yasda edustavat tarkkuustyöstökonekanta. Niiden virheet olivat ”vakiona” pieniä verrattuna muiden testikoneiden tuloksiin, joten menetelmän kehityksen kannalta näillä työstökoneilla oli vain vähän painoarvoa. Kuvassa 57 näkyy esimerkki Hermle C30:n kaaren virheistä. Virheiden suuruusluokka on alkuankin mitättömän pieni, $\pm 1,5 \mu\text{m}$, eli saman verran kuin mittauskoneen tarkkuus. Voinee sanoa, että kompensoidut kappaleet (virheet mustalla) noudattavat optimaalista rataa hieman kompensoimattomien kappaleiden kaaria (virheet punainen ja vihreä) tarkemmin. Näin on ainakin oikeassa reunassa ($Y = n. 65 \text{ mm}$), ja suunnanvaihtovälystä ei keskellä havaitse ($Y=0$). Taulukoissa 2 ja 3 esitettiin C30:n tuloksia reikäsarjoista.



Kuva 57. Esimerkki Hermle C30:n M4-kaaren tuloksista.

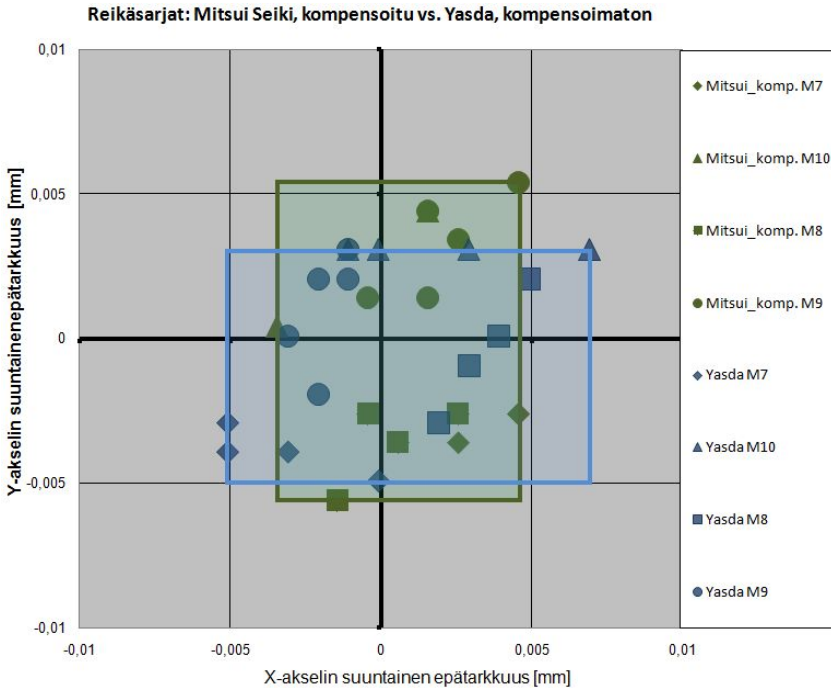
Muotovirheitä ei Yasdallakaan voida nykyisellään kompensoida, sillä ne ovat Hermle C30:n ja C40:n kanssa samaa luokkaa, kuten kuva 58 samasta M4-kaaresta osoittaa. Akseleiden järjestys on Hermleen verrattuna päinvastainen.

3. Tulokset



Kuva 58. Yasdan M4-kaaren virheet.

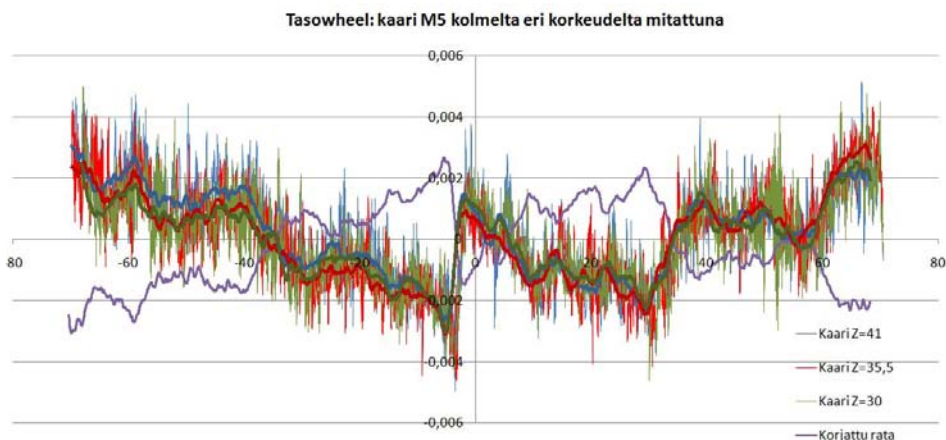
Kuvassa 59 on verrattu Yasdan korjaamattomien reikäsarjojen tuloksia Mitsuiin kompensoituun sarjaan. Tuloksista on jätetty pois kuvassa 59 näkyvät kolme ympyröityä reikää.



Kuva 59. Yasdalla koneistettu 0-sarja (sininen) ja Mitsuilla koneistettu kompensoitu reikäsarja (vihreä). Tarkkuus on molemmissa samaa luokkaa.

4. Johtopäätökset ja yhteenveto

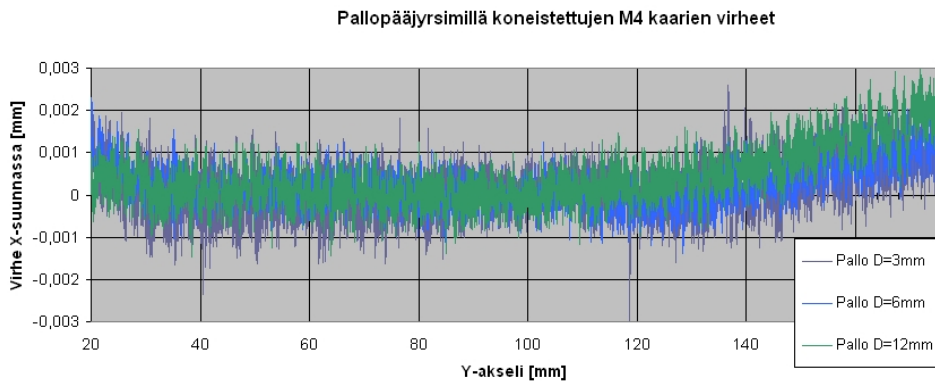
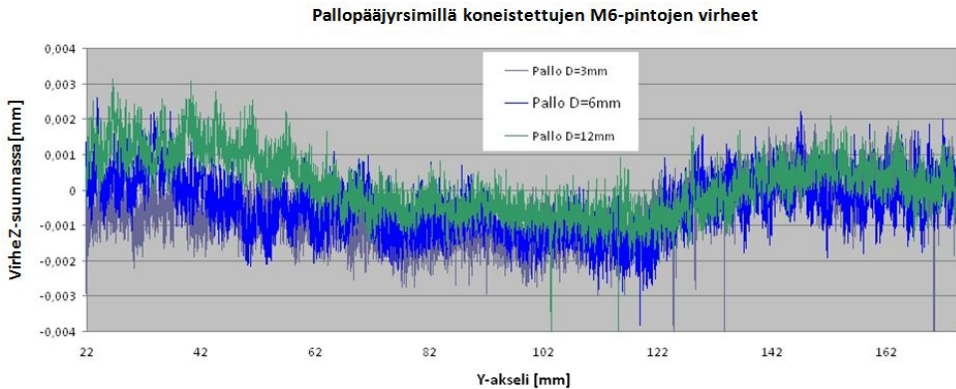
Kompensaatiotuloksia tutkittaessa itsekriittisyys ja virheiden huomioiminen on tärkeässä asemassa. Erityisesti referenssipiirteiden oikea valinta ja lähestymissuuntien huomioiminen antavat tulosten hyödyntämiselle luotettavuutta. Referenssipiirteiden valinnalla turhat koordinaatiston kierrot jäivät pois. Lähestymissuuntien vaikutus näkyi muun muassa suunnanvaihtovälysten kompensoinnissa, ja siten pöydän eri liikesuunnille tarvittiin omat kompensointikartat. Kuvassa 60 näkyy esimerkki suunnanvaihtovälüksestä ja radasta, joka tarvittiin välükseen korjaamiseksi. Vaikka välys oli pienehkö, korjaus onnistui, kuten kuva 46 osoitti. Lämpötilan vaikutuksen todistaminen tarkoilla työstökoneilla, kuten Hermletillä ja Yasdalla, eliminoi muutaman mikrometrin virheet kokonaan. Tästä syystä Hermle C30, Hermle C40 ja Yasda jätettiin pääasiallisen Tyviko-menetelmän kehityksen ulkopuolelle.



Kuva 60. Kaareissa näkyy selvästi suunnanvaihtovällys. Kompensoiva arvo on esitetty violetilla.

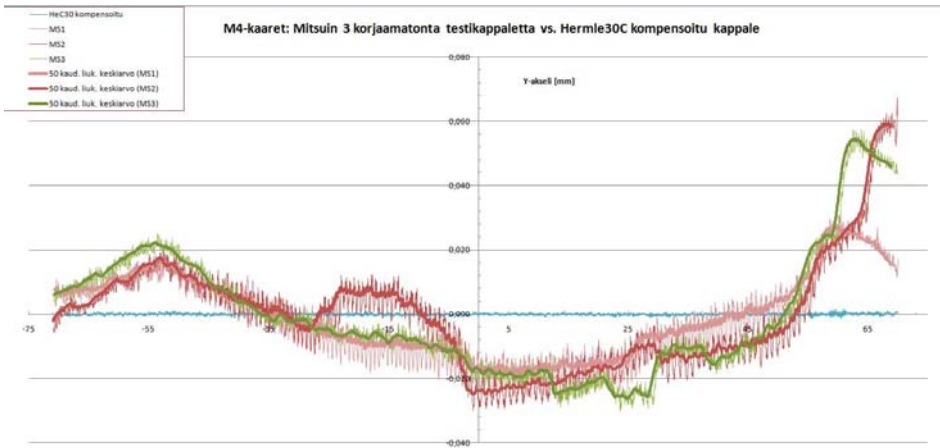
4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Kaaret koneistettiin Hermle C30:llä käyttäen kolmea erikokoista pallopääjyrsintä ($\text{Ø}3$, $\text{Ø}6$ ja $\text{Ø}12$ mm). Kokeella pyrittiin selvittämään terän koon vaikutusta koneistuksen laatuun ja saavutettavaan tarkkuuteen. Kaarien suuresta säteestä (1 m) johtuen terän halkaisijalla ei näyttänyt olevan selkeää vaikutusta työstöjälkeen, kuten seuraava kuvasarja 61 osoittaa. Toisaalta koordinaattimittalaitteen mittauspäällä ($\text{Ø} 2$ mm) ei esimerkiksi pinnankarheiden Ra-arvoja tietenkään voitu todentaa, koska pintojen laaksoja ei pystytty mittaamaan. Pinnan laatua voitiin kuitenkin arvioida visuaalisesti, eikä siinä näyttänyt olevan eroavuuksia.



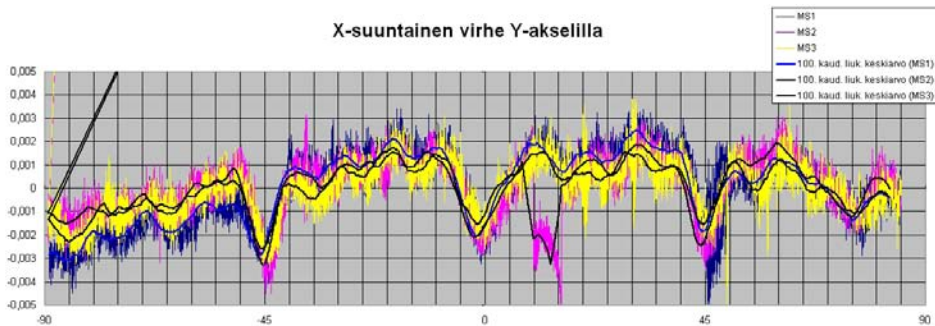
Kuva 61. Kolmella erikokoisella pallopääjyrsimellä koneistetut kaaret, Hermle C30.

Virheiden suuruusluokka tarkan ja epätarkemman koneen välillä käy ilmi kuvasta 62. Siinä on vertailtu saman kaaren tuloksia toisiinsa Mitsui Seikin ja Hermle C30:n välillä. Hermlen virheet näkyvät sinisellä.



Kuva 62. M4-kaarien virheet, Mitsui Seiki (punainen ja vihreä) ja Hermle C30 (sininen).

Joskus virheiden tulkinta voi olla harhaanjohtavaa. Kuvassa 63 esimerkki on Mitsui Seikillä koneistettujen testikappaleiden kyljistä. Akselilla vaikuttaisi olevan koloja, mahdollisesti törmäyksestä johtuvia. Reikäsarjojen koneistuksen materiaalia muovaava vaikutus näkyi tämän sarjan tuloksissa, eikä kyseessä siis ole systemaattinen virhe vaan kyseisestä geometriasta riippuva ominaisuus.



Kuva 63. X-suuntainen "virhe" Y-akselilla (Mitsui Seiki).

Tieteellisesti merkittävien ja luotettavien tulosten aikaansaamiseksi on suoritettava toistuvia koesarjoja, ennen kuin tulosten tarkastelu täyttää tutkimustoiminnalle asetetut kriteerit. Jokaisella esimerkkikoneella on pyritty koneistamaan aina kolmen kappaleen sarja samoilla asetuksilla. Esimerkiksi lastuamisarvoilla on keskeinen vaikutus lastuamisvoimiin, pinnanlaatuun, lastunmuodostukseen,

4. Johtopäätökset ja yhteenveto

työkalun kulumiseen, värinöihin ym. ja siten monella tavalla välillisesti saavutettavaan pinnanlaatuun ja mittatarkkuuteen (Valtonen 2009). Oikeiden arvojen valinta oli ratkaisevan tärkeää lopputuloksen kannalta. Systemaattiset virheet ilmenivät selkeimmin ikääntyneillä koneilla, kuten Mitsui Seikillä ja Kitamura Mycenterillä.

Yhteenvetona projektista voidaan todeta seuraavaa:

- Tyviko-menetelmä selvästi parantaa CNC-koneiden tarkkuutta.
- Menetelmä on erityisen käyttökelpoinen vanhemmille koneille.
- Uusissa ja muutoin tarkoissa koneissa mittauksiin käytetty koordinaattimittakone asettaa omat rajoituksensa (nominaalimittatarkkuus).
- Virhelähteet on tunnettava hyvin.
- Työstöarvoissa, työkaluissa ja mittavälineissä vakioiminen luo edellytykset tulosten vertailukelpoisuudelle.
- Lähestymissuunnilla on ratkaiseva vaikutus tuloksiin.

Virhelähteiden huomioiminen antaa kuvan siitä, että tutkimusta tehdään kaikilla osa-alueilla kohdetta kriittisesti tarkastellen. Ohjausryhmä on tehnyt selviä priorisointeja, mikä on edesauttanut projektin edistymistä huomattavasti. Projekti eteni toteutussuunnitelman mukaisesti, ohjausryhmän päätöksiä ja suosituksia seuraten.

Tyviko-menetelmän luotettavuus voidaan todentaa korjaamalla tietyssä piirteessä esiintyvät virheet koneistamalla vain sen piirteen kompensoidut parametrit useammalle kappaleelle. Tämä nopeuttaa merkittävästi menetelmän testaamista ja luotettavuuden toteamista. Kun todennetut systemaattiset virheet on saatu korjattua, laaditaan virheiden perusteella virhekartat.

Ohjausryhmän aktiivisuuden myötä tulosten hyödyntäminen teollisuusympäristössä on noussut yhdeksi avaintehtävistä jatkossa. Projekti eteni teknisesti, taloudellisesti ja ekonomisesti projektisuunnitelman mukaisesti. Erityisen aktiivinen ohjausryhmä edesauttoi ja ohjasi projektin etenemistä myönteisesti. Projektisuunnitelmassa esitetyt tavoitteet saavutettiin.

Mahdollisissa jatkotutkimuksissa ja/tai -projekteissa esitetään keskittyttävän seuraaviin seikkoihin:

1. Tutkitaan virheitä X/Y-tasossa, laaditaan virhekartat ja testataan karttojen toimivuus satunnaisissa pisteissä.

2. Laaditaan ohjelma, joka lukee myös lähestymissuunnan ja korjaa koordinaatit koodista.
3. Otetaan Z-akseli paremmin mukaan ja täydennetään karttaa kolmiulotteiseksi.
4. Täydennetään ohjelma kattamaan Z.
5. Vähintään neliakselisilla koneilla tehdään testit neljälle akselille.
6. Täydennetään ohjelmaa.

Erityisen tärkeää olisi luoda menetelmästä sovellutus, jossa mitatut virheet voidaan mahdollisimman helposti muuntaa koneessa tai koneissa hyödynnettäväksi dataksi. Tämä vaatii ratkaisua joka on riippumaton erityisasiantuntijoista eli että kompensoinnin voivat tehdä koneenkäyttäjät tai ohjelmoijat.

5. Some results of Tyviko method when used in industrial CNC

5.1 The main results of Tyviko method:

1. Tyviko method can improve the precision of CNC-machines over 50% or more.
2. The method extends lifetime of an older machine, postponing the need for new investment with years.

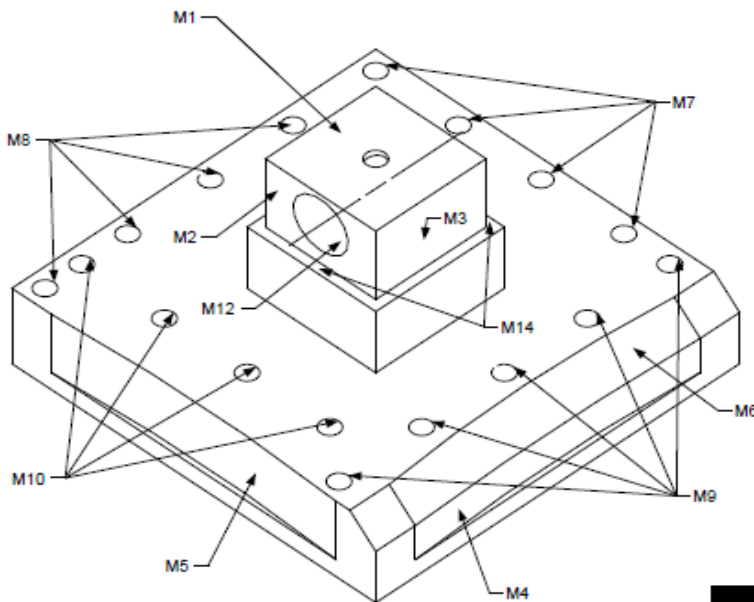


Figure 64. Used test piece.

5. Some results of Tyviko method when used in industrial CNC

The following examples, from three different machine tools, are the achievable positioning accuracy for the *sets* of holes (numbers 7, 8, 9 and 10 in the picture). Every time at least three test pieces were machined and measured for having comparative and quantitative results.

The first test machine was a three axis vertical milling machine (year 1993) that has been used in 2–3 shifts. The main material has been aluminium and hardened, gear steel.

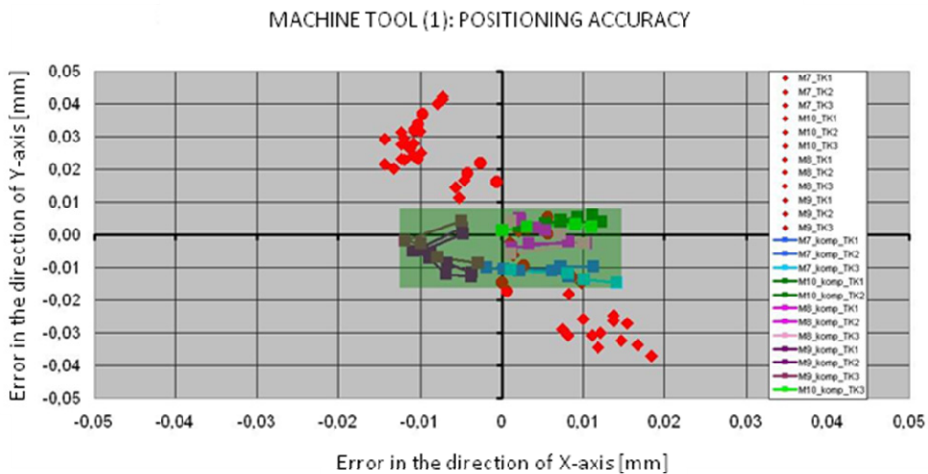


Figure 65. Accuracy before and after compensation with vertical machine (1993)..

In figure 64 X-axis is horizontal and Y-axis vertical. The red dots are before compensation (i.e. before using the Tyviko -method) and the green box is after compensation. The results show that the precision improvement along the Y-axis is from $\pm 0,045$ (original test pieces) mm to under $\pm 0,015$ mm (compensated test pieces) and along the X-axis from $\pm 0,02$ mm (original) to under $\pm 0,015$ mm (compensated). The precision of this machine was $\pm 0,01$ mm when new.

The second machine was a 5-axis vertical milling machine tool, where 4-axes are at the milling head and the 5th is the turning table. The table is 2 000 mm in diameter. The machine has only been used to make very large gears from hardened steel 18CrNiMo6-7 (HRC 63). It has been used mainly in two shifts and it was bought the year 2000.

5. Some results of Tyviko method when used in industrial CNC

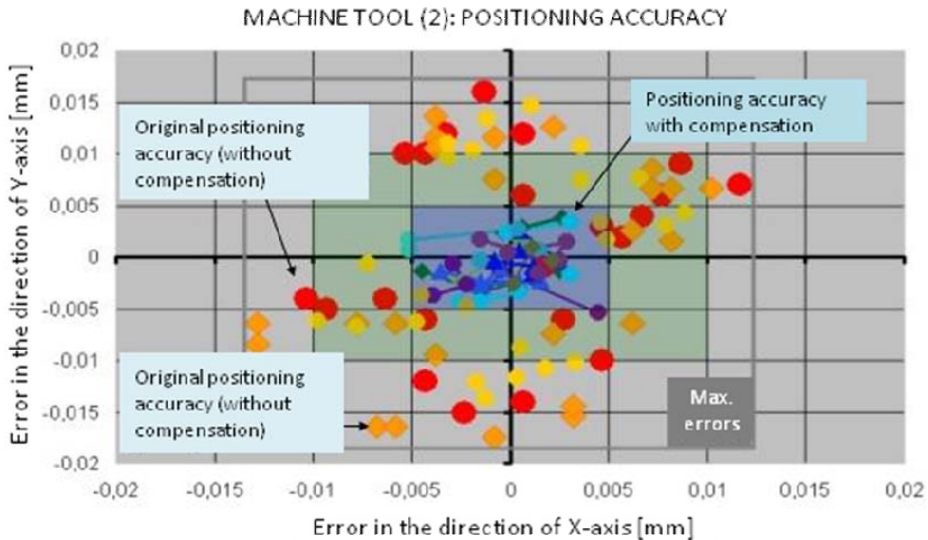


Figure 66. Accuracy before and after compensation with vertical milling machine (2000).

In figure 65 X-axis is horizontal and Y-axis vertical. The red, orange and yellow dots are before compensation (i.e. before using Tyviko-method) and the blue box is after compensation. The results show that the precision improvement along the Y-axis is from $\pm 0,017$ mm to under $\pm 0,005$ mm and along the X-axis from $\pm 0,014$ mm under $\pm 0,005$ mm. The precision of this machine was $\pm 0,005$ mm when new.

Third machine was a horizontal milling machine tool which has been used mainly in drilling steel alongside many other materials and purposes encountered in education use. It has 3-axes and an index table. It is from the year 1987.

5. Some results of Tyviko method when used in industrial CNC

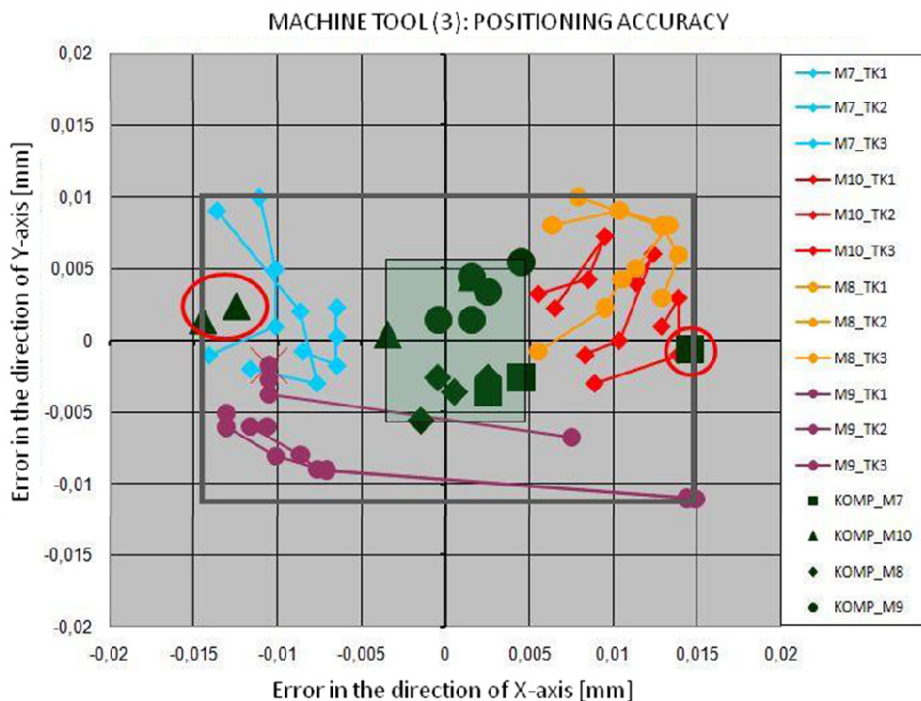


Figure 67. Accuracy before and after compensation with horizontal milling machine (1987).

In figure 66 X-axis is horizontal and Y-axis vertical. The red, yellow, blue and purple dots are before compensation (i.e. before using Tyviko-method), the green dots and box is after compensation. The results show that the accuracy improvement along the Y-axis is from $\pm 0,012$ mm to under $\pm 0,006$ mm and along the X-axis from $\pm 0,015$ mm under $\pm 0,005$ mm. Precision of this machine was $\pm 0,005$ mm when new. The two dots that are outside the green box are probably due to using both circular arch interpolation and spline interpolation.

The results actually show that using Tyviko an old machine tool can be made in almost as good as new in precision and therefore elongate its lifetime e.g. no need for new investment in years.

5.2 Creating of machine tool -specific error map

A 3D vector space i.e. an error map can be constructed from measurement data.

5. Some results of Tyviko method when used in industrial CNC

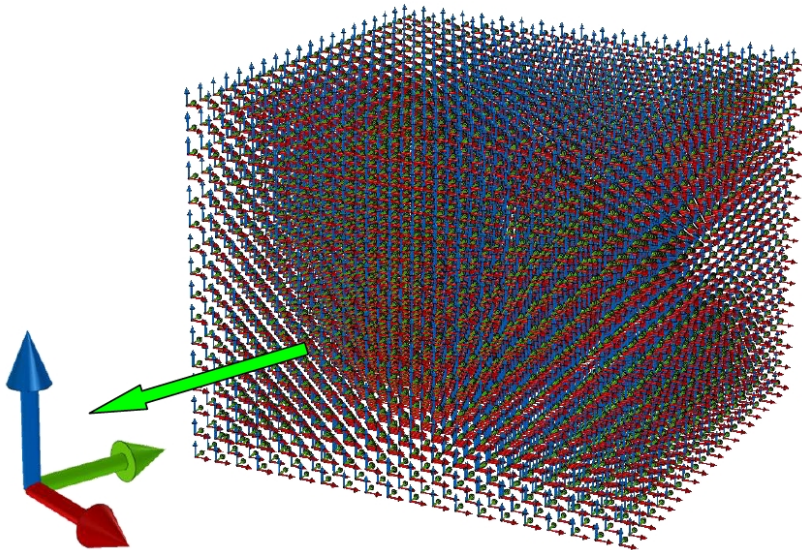


Figure 68. Error compensation of any freeform part by using a map.

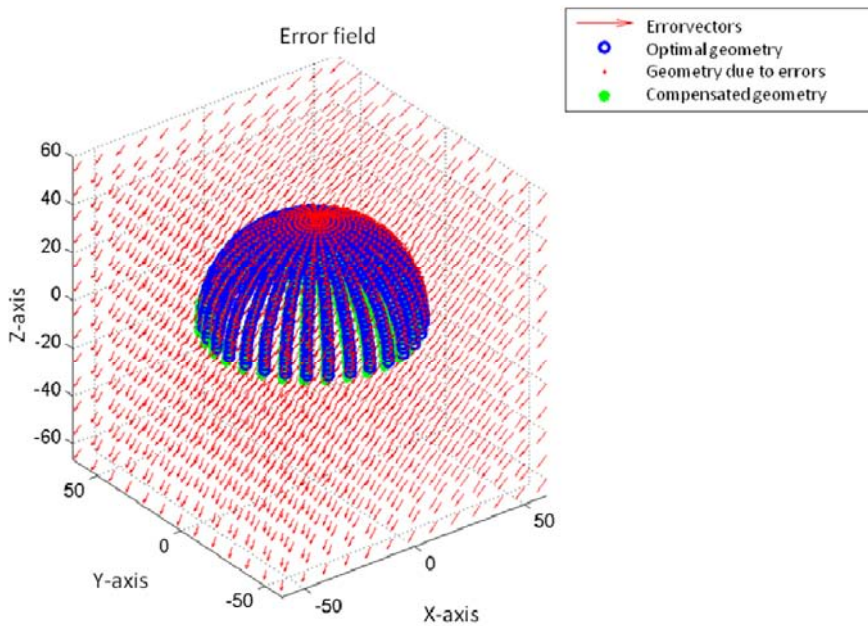


Figure 69. 3D error map.

Any given geometry of a part can be compensated. This culminates the aim of Tyviko – a software-based error correction. In a figure above error vectors are in red, optimal (target) geometry is shown in blue, red dots express the geometry due to errors and green dots express the compensated geometry.

5.3 Conclusions

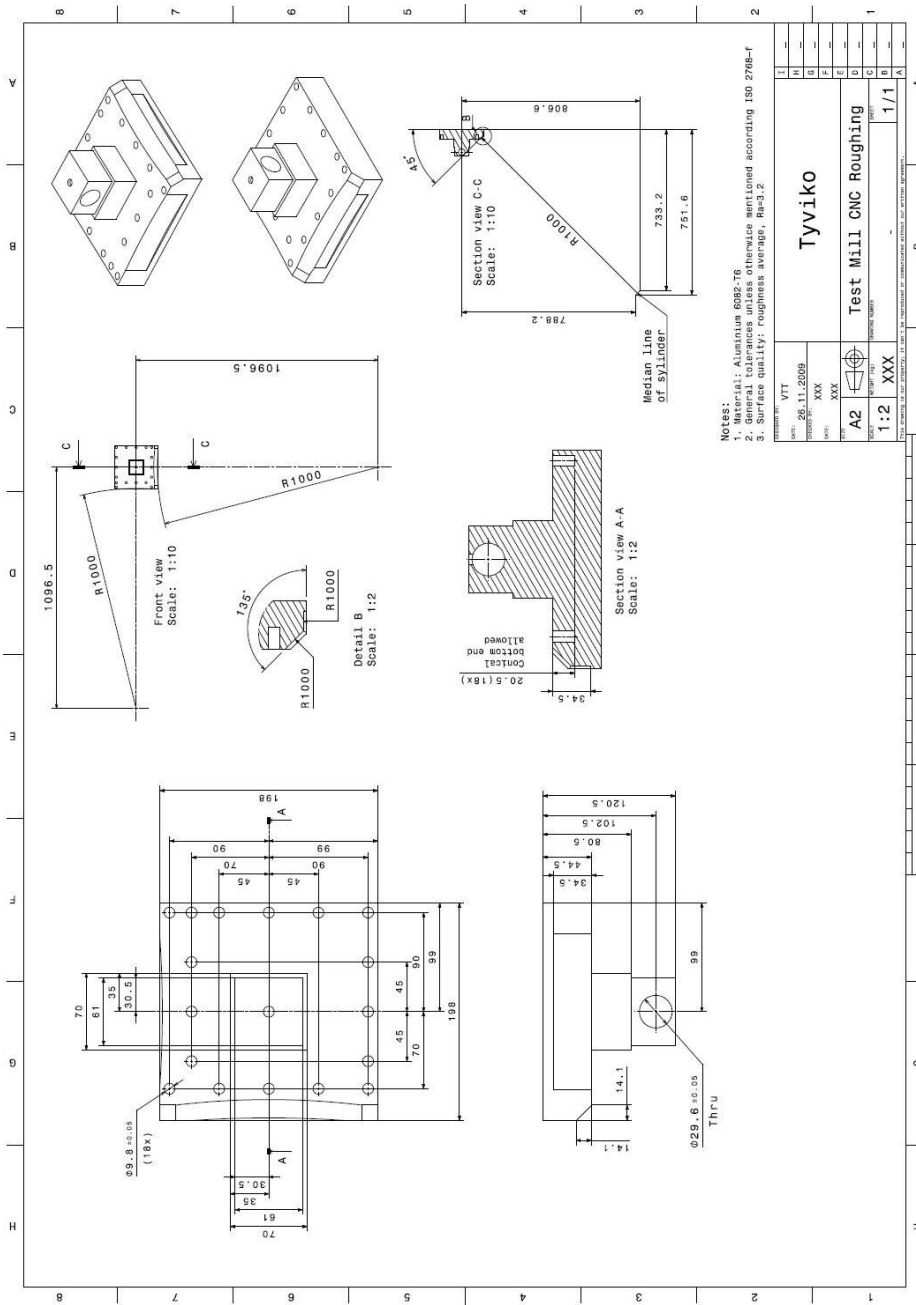
- The Tyviko method clearly improves the accuracy of CNC-machines.
- The method is particularly useful for older machine tools. = extension of lifetime = new investment is not needed in years.
- Furthermore, in new and (ultra) precision machines, the resolution power of the coordinate measuring machine might set the limits of improving the accuracy (nominal measuring accuracy).
- The error origins must be known.
- In machining parameters, tools and measuring instruments, standardization creates the conditions for the comparability of results.
- Directions of approaching have a decisive influence on the results.

Reliability of the Tyviko method can be verified faster by correcting known errors only in a certain character of the test piece. When, the compensated parameters of this character are calculated only this corrected character is machined to several test pieces (min. three pieces) and pieces are measured and compared. This will significantly speed up the testing of method and the reliability of the diagnosis. Once verified systematic errors have been compensated, an error map can be formed.

Lähdeluettelo

- Bohez, E. (2002) Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining. *Computer-Aided Design*, 34(4): 391–403. ISSN 0010-4485.
- Eberly D: <http://www.geometrictools.com/Documentation/LeastSquaresFitting.pdf>.
- Franke, R. (1982) Scattered Data Interpolation: Test of some Methods. *Mathematics of Computation*, 38(157): 181–200. ISSN: 0025-5718.
- Karjalainen, J. (2009) Radan määrittäminen ja korjaukset. Esitelmä, Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. 24 s.
- Kumar, B. & Kumar, A. (2003) Analysis of geometric errors associated with five-axis machining centre in improving the quality of cam profile. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(6): 629–63. ISSN 0890-6955.
- Rahman, M. (2004) Modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy in a software way. Doctoral thesis, Department of Mechanical Engineering, Oulu University, 124 s. ISBN 951-42-7332-X.
- Rahman, M. (1994) Improving Positioning Accuracy in Five-Axis Milling by Compensating Misalignment in Rotational Axes. M.Sc thesis, Department of Mechanical Engineering, Oulu University. 67 s.
- Rahman, M., Heikkala, J. & Lappalainen, K. (2002) A study and analysis of machine tools errors with static and dynamic measurements. 4th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, (IDDME 2002). Clermont-Ferrand, France, May 14–16.
- Rahman, M., Heikkala, J. & Lappalainen, K. (2000) Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory. *International Journal Machine Tools and Manufacture*, 40(10): 1535–1546. ISSN 0890-6955.
- Rahman, M., Heikkala, J., Lappalainen, K. & Karjalainen, J. (1997) Positioning accuracy improvement in five-axis milling by post processing. *International Journal Machine Tools and Manufacture*, 37(2): 223–236. ISSN 0890-6955.
- Shepard, D. (1968) A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *ACM Annual Conference/Annual Meeting. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference*: 517–524. Doi: 10.1145/800186.810616.
- Valtonen, M. (2009) Lastuavan työstön tarkkuusvirheistä, syistä ja mahdollisista korjaus-toimista. Oulun yliopisto, Tuotantotekniikan laboratorion sisäinen muistio.

Liite A: Rouhintapiirustus testikappaleelle (200 x 200 x 120)



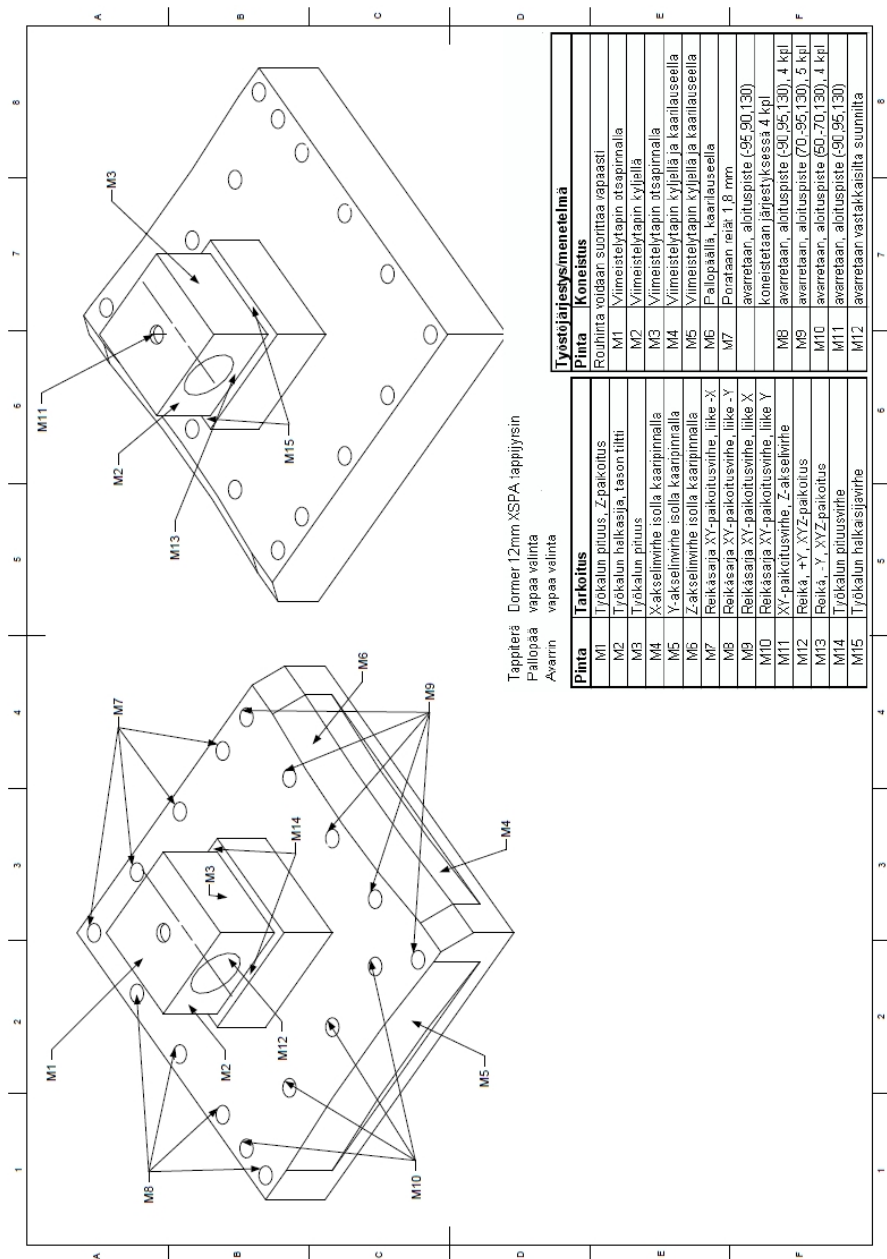
Notes:

- Material: Aluminum 6062-T6
- Surface finish: Ra 3.2
- Surface quality: roughness average, Ra3.2

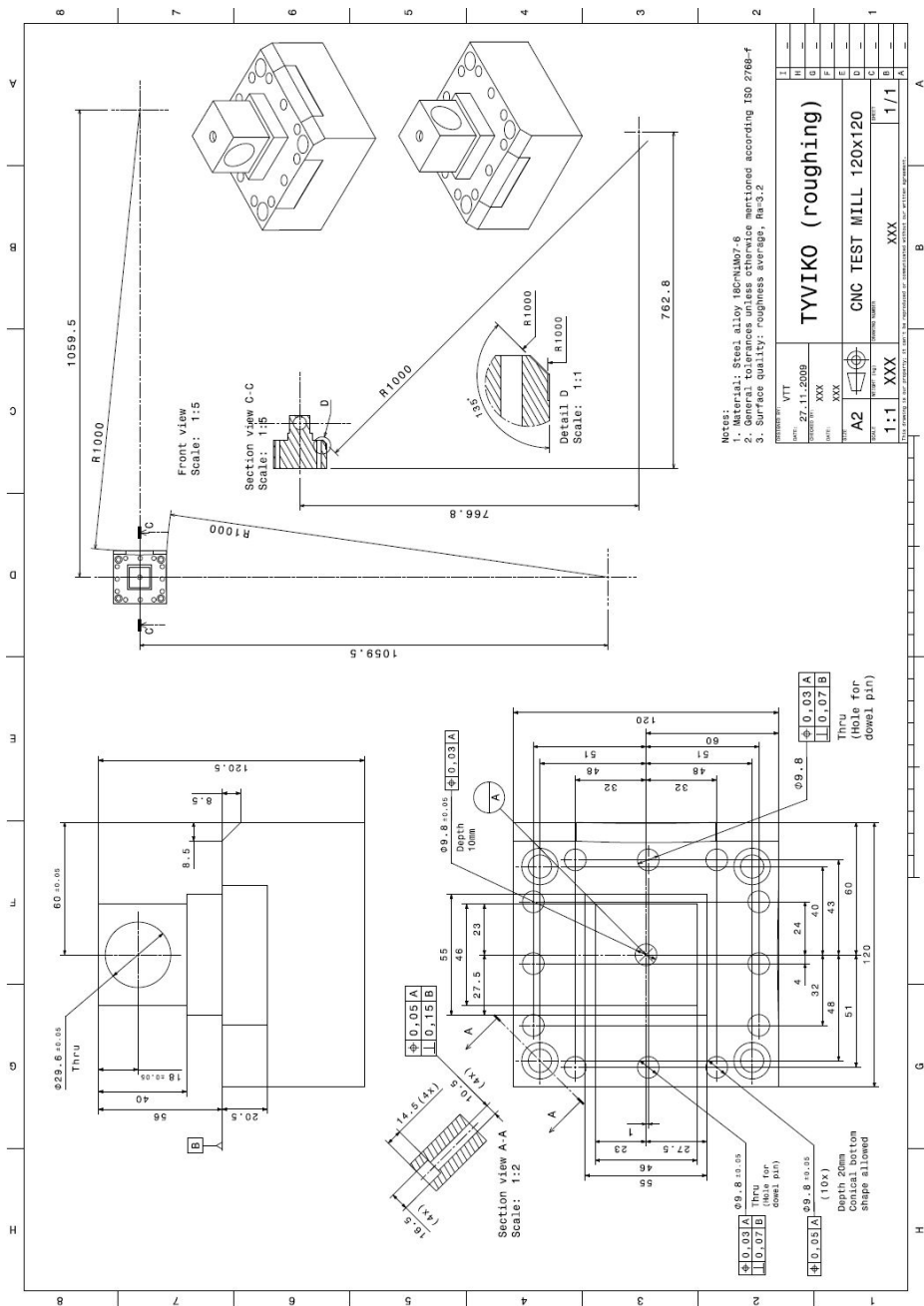
PROJECOR:	VTT
DATE:	26.11.2009
DESIGNER:	XXX
CHECKER:	XXX
SCALE:	1:2
PROJ. NO.:	XXX
REV. NO.:	1/1

TYVIKO
Test Mill CNC Roughing

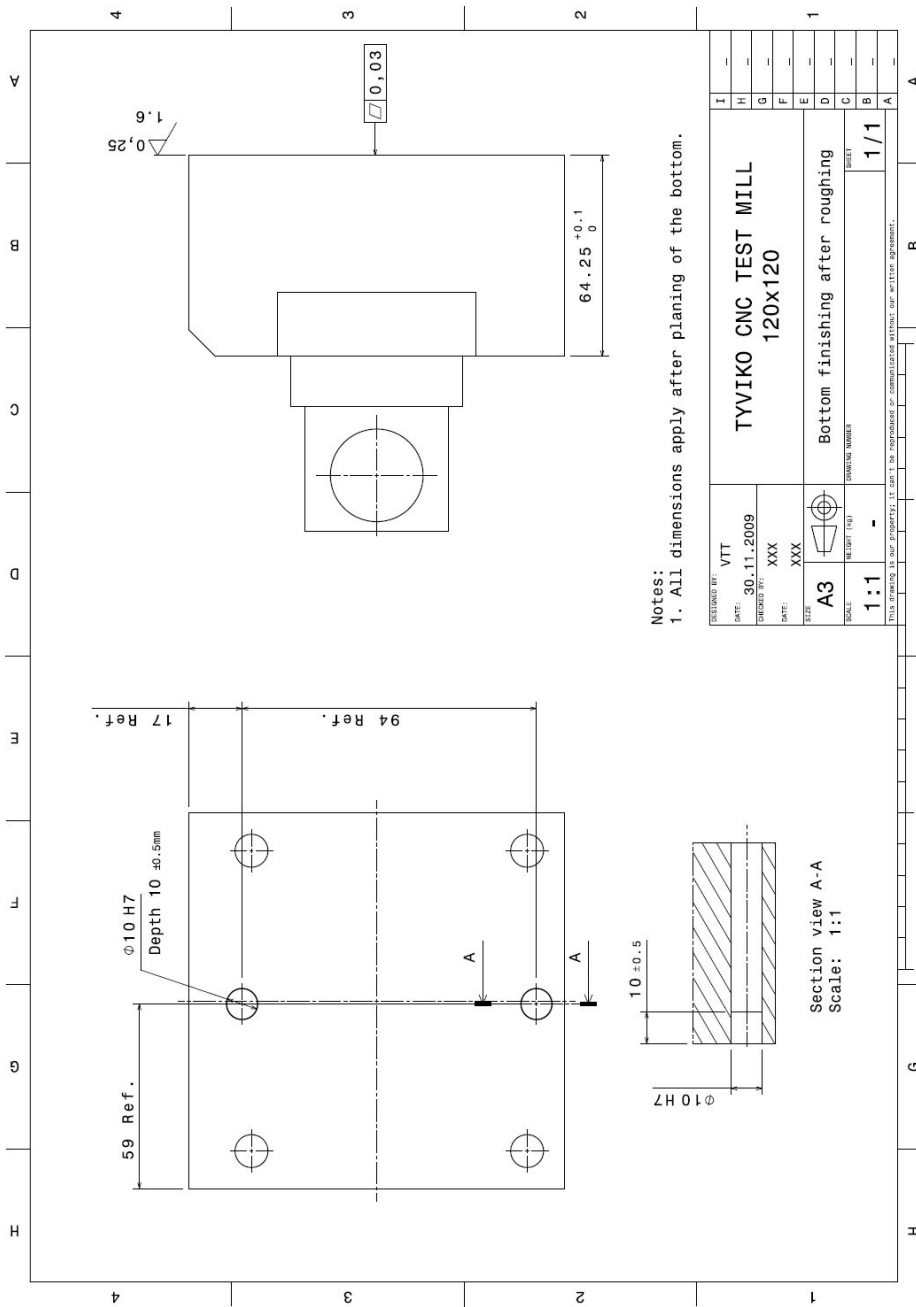
Liite B: Testikappaleen piirteet (200 x 200 x 120)



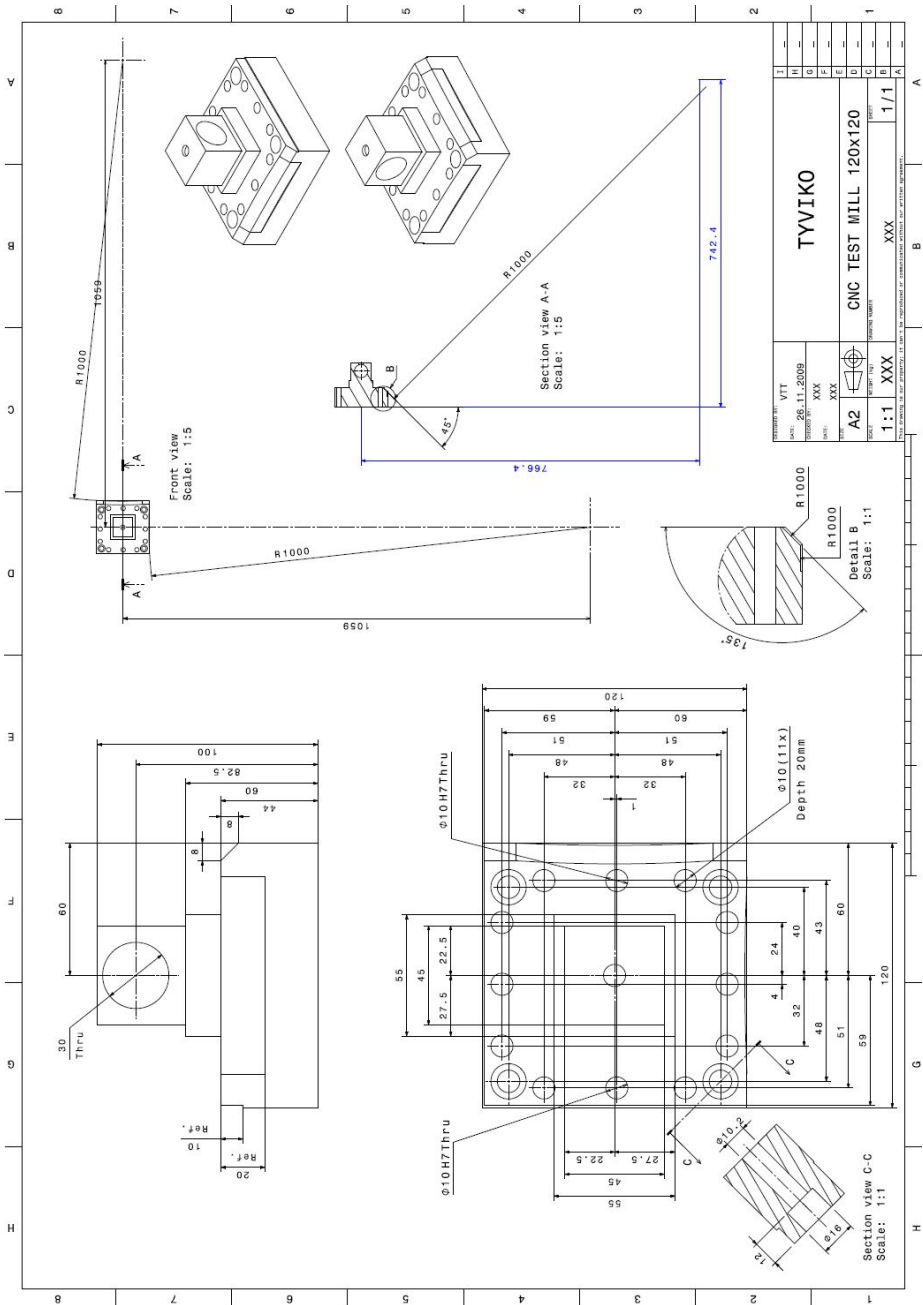
Liite C: Rouhintapiirustus testikappaleelle (120 x 120 x 120)



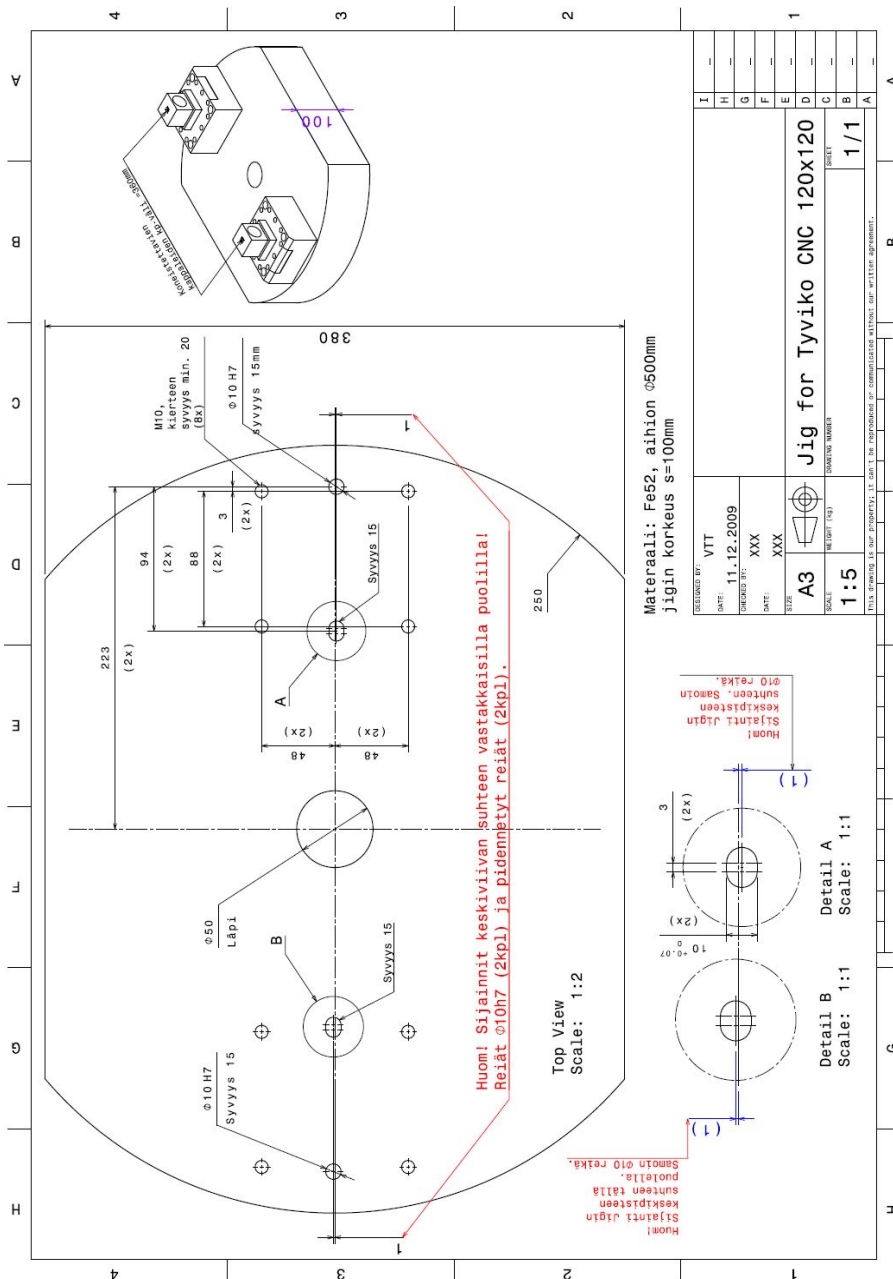
Liite D: Pohjan viimeistely testikappaleelle (120 x 120 x 120)



Liite E: Testikappaleen mitat (120 x 120 x 120)



Liite F: Kappaleiden kiinnitysjiigin työpiirustus (120 x 120 x 120)





Tekijä(t) Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen, Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen, Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen		
Nimeke Tyviko-projektin loppuraportti		
Tiivistelmä Tyviko-projekti keskittyi NC-työstökoneissa esiintyvien systemaattisten virheiden korjaamiseen. Korjaaminen perustuu koneen tiedonsiirrossa olevan datan kompensoimiseen tehtyjen mittausten perusteella. Kompensaatiolla ja/tai tarkkuuden parantamisella voi olla kaksi tarkoitusta, joista molemmilla on selkeä hyöty teollisuudelle: saavuttaa entistä parempi tarkkuus jo tarkoille koneille ja siten mahdollistaa tarkkuus- tai mikromekaanisten osien entistä tarkempi valmistus tai pidentää koneiden elinikää. Molemmissa tapauksissa taloudellinen merkitys yritykselle korostuu, varsinkin kun Tyviko-menetelmän implementointi on varsin edullista. Tässä vaiheessa kustannuksiksi on laskettu (mikäli menetelmä tuoteistettaisiin) noin 15–20 k€/kerta. Näin ollen mikäli esimerkiksi työstökoneen elinikä voidaan pidentää seitsemästä vuodesta yhteentoista vuoteen, tulee keskihintaiselle työstökoneelle kaksivuorotyössä takaisinmaksuajaksi noin kolmesta viiteen kuukautta laskutavasta riippuen. Projekti toteutettiin teknisesti ja taloudellisesti projektisuunnitelman mukaisesti. Erityisen aktiivinen ohjausryhmä edesauttoi ja ohjasi projektin etenemistä myönteisesti. Projektisuunnitelmassa esitetyt tavoitteet saavutettiin. Teknisesti voitiin osoittaa, että mittaamalla koneistuskeskuksen systemaattiset virheet ja ohjaamalla koneita laskennallisen kompensaation mukaisesti, koneen tarkkuutta voidaan oleellisesti parantaa. Toisessa esimerkkiponeessa tarkkuus parani uutta vastaavaksi ja toisessa niin tarkaksi, että mittauskoneella saavutettava toleranssi asetti rajat analyysille. Koneet olivat yhdeksän ja kuusitoista vuotta vanhoja. Vieläkin iäkkäämmällä, vuonna 1987 hankitulla koneella ylettiin lähes tarkkuustyöstökoneen vastaaviin tuloksiin. Täten menetelmän taloudellinen hyöty voitiin selkeästi todentaa.		
ISBN 978-951-38-7655-5 (nid.) 978-951-38-7656-2 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 34372
Julkaisu-aika Lokakuu 2010	Kieli Suomi, englanti	Sivuja 74 s. + liitt. 6 s.
Projektin nimi Työstövirhekompensoatio (Tyviko)		Toimeksiantaja(t)
Avainsanat Machine tool compensation, accuracy, lifetime		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374

Author(s) Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen, Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen, Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen		
Title Short results of Tyviko project		
Abstract Tyviko project focused on the systematic error compensation of NC machine tools via software. The method is based on machining a test piece, measuring it, forming an error map and using the map for correcting the tool paths of the program to compensate existing errors. Results: <ol style="list-style-type: none"> 1. The Tyviko method can improve the precision of CNC-machines by over 50% or more. 2. The method extends lifetime of older machinery by postponing the need for new investment for years. Conclusions: <ul style="list-style-type: none"> - The Tyviko method clearly improves the accuracy of CNC-machines. - The method is particularly useful for older machine tools = extension of lifetime = new investment is not needed in years. - Furthermore, in new and (ultra) precision machines, the resolution power of the coordinate measuring machine might set the limits of improving the accuracy (nominal measuring accuracy). - The error origins must be known. - Standardization of machining parameters, tools and measuring instruments creates comparability of results. - Approaching direction has a significant influence to the results. Technically, it was shown that by measuring the systematic errors of machine tools and numerically calculating new, compensated parameters, accuracy of machine tools could be substantially improved. Accuracy of the one, tested machine tool became equivalent with a new one and with another machine tool resolution of the measuring machine set the limits of improving accuracy furthermore. Machine tools were 9 and 16 years old. The testing of the method in the even older machine tool (from 1990), achieved accuracy was almost at the same as in a precision machine tool. Thus the economic benefits of the method could be clearly evidenced.		
ISBN 978-951-38-7655-5 (soft back ed.) 978-951-38-7656-2 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 34372
Date October 2010	Language Finnish, English	Pages 74 p. + app. 6 p.
Name of project Työstövirhekompensaatio (Tyviko)		Commissioned by
Keywords Machine tool compensation, accuracy, lifetime		Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374

VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2540 Raimo Lovio & Sirkku Kivisaari. Julkisen sektorin innovaatiot ja innovaatiotoiminta. Katsaus kansainväliseen kirjallisuuteen. 2010. 50 s.
- 2541 Paul Buharist, Erkki Haramo, Katri Kallio, Tuukka Kostamo & Heli Talja. Moniäänisyyttä asiantuntijaorganisaation johtamiseen – Case VTT. Dialogi-hankkeen loppuraportti. 2010. 117 s.
- 2542 Pekka Koponen, Marja-Leena Pykälä, Janne Peltonen & Pasi Ahonen. Interfaces of consumption metering infrastructures with the energy consumers. Review of standards. 2010. 105 p.
- 2543 Henrik Huovila, Jari Korpi, Jari Kortström, Ville Kotovirta, Riitta Molarius, Päivi Mikkonen, Päivi Mäntyniemi, Minna Nissilä, Jenni Rauhala, Tapio Tourula, Nina Wessberg & Jussi Yliaho. Uhkatilanteiden hallinta. Hälytys-, tilannekuva- ja varoitussjärjestelmän kehittäminen. 2010. 94 s. + liitt. 32 s.
- 2544 Arto Usenius, Antti Heikkilä, Tiecheng Song, Jorma Frödblom & Timo Usenius. Joustavat ja itseoppivat tuotantojärjestelmät sahateollisuudessa. 2010. 217 s.
- 2545 Pasi Ahonen. TITAN-käsikirja. VTT:n päätuloksia Tekesin Turvallisuusohjelman TITAN-projektissa. 2010. 152 s.
- 2546 Riikka Holopainen, Sirje Vares, Jouko Ritola & Sakari Pulakka. Maalämmön ja -viilennyksen hyödyntäminen asuinkerrostalon lämmityksessä ja jäähdytyksessä. 2010. 56 s.
- 2547 Painetut hybridisysteemit. Teknologian tila ja kaupallistamisen mahdollisuudet Suomessa. Jukka-Tapani Mäkinen (toim.). 2010. 95 s.
- 2548 Ari Laitinen, Veijo Nykänen & Satu Paiho. Jäähallin kylmäkoneistojen hankintaopas. 2010. 109 s. + liitt. 78 s.
- 2549 Yrjö Neuvo, Masaki Kitagawa, Aija Leiponen, Richard Mathies, Duc-Truong Pham, Josef Spitzer & James Spohrer. VTT Scientific Advisory Board Final Report 2009–2010. 2010. 27 p. + app. 8 p.
- 2550 Turpeen tuotanto ja käyttö. Yhteenveto selvityksistä. Arvo Leinonen (toim.). 2010. 104 s.
- 2551 Auli Kuusela-Lahtinen, Ulla-Maija Mroueh, Pasi Vahanne, Terhi Kling, Anu Kapanen, Maarit Priha, Eevaliisa Laine & Esko Rossi. Ympäristö- ja terveysriskien arviointimenetelmien vertailu. 2010. 130 s. + liitt. 52 s.
- 2552 Eija Kaasinen, Mari Ainasoja, Elina Vulli, Heli Paavola, Riina Hautala, Pauliina Lehtonen & Esa Reunanen. User involvement in service innovations. 2010. 64 p.
- 2553 Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen, Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen, Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen. Tyviko-projektin loppuraportti. 2010. 74 s. + liitt. 6 s.