

Henri Riekkö

**CAD-MALLIN HYÖDYNTÄMINEN KOORDINAATTIMITTAUSKONEEN
OHJELMOINNISSA**

Opinnäytetyö

Kajaanin ammattikorkeakoulu

TKO5S

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Kevät 2009



Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikka
Tekijä(t) Henri Riecki	
Työn nimi CAD-mallin hyödyntäminen koordinaattimittauskoneen ohjelmoinnissa	
Vaihtoehtoiset ammattipinnot NC-tekniikka Kunnossapito	Ohjaaja(t) Mikko Heikkinen Toimeksiantaja Markku Heikkinen, Kajaanin ammattikorkeakoulu
Aika 9.4.2009	Sivumäärä ja liitteet 65+1
<p>Koordinaattimittauskone on yleistymässä oleva teollisuuden mittalaite, jolla pystytään korvaamaan useita aikaisemmin käytössä olleita mittausmenetelmiä. Tämän insinöörityön tarkoituksena oli selvittää, kuinka mitattavasta kappaleesta luotua CAD-mallia voidaan hyödyntää koordinaattimittauskoneen ohjelmoinnissa. Työssä tutkittu koordinaattimittauskone oli Kajaanin ammattikorkeakoulun omistama Tesa Micro Hite 3D DCC varustettuna PC-DMIS 4,2 -ohjelmistolla.</p> <p>Työn lopputuloksista on hyötyä kaikille, jotka käyttävät Kajaanin ammattikorkeakoulun koordinaattimittauskoneita. Tuloksien avulla voidaan esimerkiksi parantaa opetusta, koska kone on useimmiten opetuskäytössä. CAD-perusteinen ohjelmointi on yleistynyt ohjelmointitapa numeerisesti ohjattujen koneiden yhteydessä, ja opiskelijoille on siksi hyödyllistä saada kokemusta kyseisestä ohjelmointitavasta. Tuloksista voidaan myös tehdä päätelmiä CAD-perusteisen ohjelmoinnin hyödyllisyydestä teollisuuden mittauskoneissa.</p> <p>Työssä tutkittiin, kuinka CAD-malli tuodaan ohjelmistoon, ja kuinka mallin perusteella voidaan tehdä automaattimittausohjelma. Työssä tutkittiin myös erilaisten CAD-tiedostomuotojen soveltuvuutta ohjelmointiin. CAD-perusteisen ohjelmoinnin hyödyllisyyttä testattiin mittaamalla ohjelmointiaikoja ja vertaamalla niitä aikoihin, jotka saatiin käyttämällä opetusohjelmointia. Ohjelmointitapaa testattiin käytännössä tutkimalla 3D-tulostimien tulostarkkuutta.</p> <p>Työn aikana havaittiin, että CAD-mallin perusteella voidaan luoda automaattimittausohjelma tutkitulle koordinaattimittauskoneelle. CAD-perusteinen ohjelmointi havaittiin toimivaksi menetelmäksi, joka on lisäksi useissa tapauksissa nopeampi ohjelmointitapa kuin opetusohjelmointi. Toimiva simulointijärjestelmä vähensi ohjelmointivirheiden riskejä. Tutkituista tiedostomuodoista parhaiten ohjelmointiin sopivia olivat IGES ja STEP.</p> <p>Työn perusteella voidaan sanoa, että CAD-perusteinen ohjelmointi on täysin toimiva ohjelmointijärjestelmä, joka kannattaisi ottaa käyttöön laajemmin myös koordinaattimittauskoneissa. Ohjelmistojen jatkuva kehitys parantaa varmasti CAD-perusteisen ohjelmoinnin suosiota.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Mechanical and Production engineering
Author(s) Henri Riecki	
Title A CAD-model in CMM Programming	
Optional Professional Studies Maintenance NC-technology	Instructor(s) Mikko Heikkinen
	Commissioned by Markku Heikkinen, Kajaani University of Applied Sciences
Date 9.4.2009	Total Number of Pages and Appendices 65+1
<p>A coordinate measuring machine (CMM) is a device for measuring the geometrical characteristics of an object. It has replaced many previously used industrial measuring methods. The purpose of this Bachelor's thesis was to solve how CAD models can be used in programming a numerically controlled CMM. The thesis also studied the advantages and disadvantages that CAD-based programming has when compared to teaching programming, which is the most common programming method for CMMs.</p> <p>The results are useful for all who use the CMM of the Kajaani University of Applied Sciences. The results can, for example, be used to improve teaching. Programming skills are important for engineering students, and CAD-based programming is rapidly becoming a common programming method in most numerically controlled machines. The CMM that was used in this thesis is Tesa Micro Hite 3D DCC, which is equipped with a PC-DMIS 4.2 software.</p> <p>In this thesis it was solved how a CAD model can be imported to PC-DMIS software, and how it can be used in programming. Programming times when using CAD-based programming or teaching programming were measured and compared to each other. It was also solved if there are any differences in the usefulness of different CAD-file formats.</p> <p>The results showed that CAD models are useful in the programming of a CMM. With the help of a CAD model, programming is much faster and easier than teaching programming. Measuring programs can also be tested before measuring, which reduces damages caused by programming errors. CAD-based programming should become more common with CMMs, as it has become common with other types of numerically controlled machines.</p>	
Language of Thesis Finnish	
Keywords	
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

TYÖSSÄ KÄYTETYT LYHENTEET JA KÄSITTEET

3D	3-Dimensional, kolmiulotteinen
CAD	Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen suunnittelu
DCC	Direct Computer Control, suora tietokoneohjaus
DMIS	Dimensional Measuring Interface Standard, mittauskoneita varten suunniteltu tiedonsiirron standardi
IGES	Initial Graphics Exchange specification, tiedonsiirron standardi
Off-line -ohjelmointi	Etäohjelmointi, ohjelmointitapa joka ei sido konetta käyttöönsä.
On-line -ohjelmointi	Ohjelmointitapa, jossa ohjelmointi tapahtuu koneelta käsin.
Opetusohjelmointi	Ohjelmointitapa, jossa ohjelman liikeradat määritetään ohjaamalla ohjelmoitavaa konetta manuaalisesti haluttuihin pisteisiin ja tallentamalla kyseiset pisteet osaksi ohjelmaa.
STEP	Standard for The Exchange of Product model data, tiedonsiirron standardi
STL	Stereolitography, tiedonsiirron standardi

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 KONEPAJATEKNISET MITTAUKSET	2
2.1 Mittaukset laadunvalvonnassa	2
2.2 Mittaustekniikan historiaa	2
2.2.1 Laadunvarmistuksen tarpeen synty	2
2.2.2 Pituudenmittaus ja mittausvälineet	3
3 KOORDINAATTIMITTAUSKONE	5
3.1 Koordinaattimittuskoneen runkorakenne	5
3.2 Koordinaattimittauskoneiden tekniikkaa	10
3.2.1 Automaatioaste	10
3.2.2 Mittaushuonekoneet ja verstaskoneet	10
3.3 Aseman mittaus	11
3.4 Mittausanturit ja mittakärjet	14
3.4.1 Koskettavat mittausanturit ja mittakärjet	14
3.4.2 Optiset mittausanturit	19
3.4.3 Laseranturit	20
3.5 Ohjelmointitavat	21
3.5.1 On-line -ohjelmointi	21
3.5.2 Etäohjelmointi	22
4 TESA MICRO HITE 3D DCC -KOORDINAATTIMITTAUSKONE	24
4.1 Yleistä tietoa	24
4.2 Mittausanturit ja mittakärjet	26
4.3 Ohjelmointi	26
4.3.1 On-line -ohjelmointi	27
4.3.2 Etäohjelmointi	28
5 TUTKIMUSJÄRJESTELYT	29
5.1 Tutkimustyön tavoitteet	29
5.2 Tutkimustyön vaiheet	29

6 TUTKIMUSTYÖN SUORITUS	31
6.1 On-line -ohjelmointi ilman CAD-mallia	31
6.2 CAD-mallin syöttäminen ohjelmaan	32
6.3 CAD-mallin hyödyntäminen ohjelmoinnissa.	34
6.4 CAD-mallin hyödyntäminen mittausohjelman tarkistuksessa	36
6.4.1 Simuloinnin käynnistys	36
6.4.2 Simuloinnin avulla tarkistettu mittausohjelma	37
6.5 Automaattinen muodontunnistus	37
6.6 CAD-tiedostoformaattien vertailu	39
6.6.1 IGES-tiedostoformaatti	39
6.6.2 STEP-tiedostoformaatti	40
6.6.3 STL-tiedostoformaatti	41
6.7 Ohjelmointitapojen nopeusvertailu	43
6.8 CAD-perusteinen ohjelmointi käytännössä	46
7 LOPPUTULOKSET	51
7.1 Toteuttamismahdollisuudet	51
7.2 Käyttökelpoiset tiedostomuodot	51
7.3 Ohjelmoinnin suoritus	52
7.4 Käytännön kokeet	56
7.5 Ohjelmointitapojen nopeuserot	56
7.6 Etäohjelmointi	57
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	58
8.1 CAD-perusteisen ohjelmoinnin käyttökelpoisuus	58
8.2 Geometrinen oikaisu mittauksissa	59
8.3 Ohjelmointiaikojen erot	60
8.4 Etäohjelmoinnin käyttö	61
9 YHTEENVETO	63
LÄHTEET	64
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tämä insinööri työ on tehty Kajaanin ammattikorkeakoululle. Insinööri työn aiheena on kolmiulotteisen CAD -mallin hyödyntäminen koordinaattimittauskoneen ohjelmoinnissa.

Kajaanin ammattikorkeakoulu perusti yhdessä Kajaanin ammattiopiston kanssa protopajan keväällä 2008. Protopajan tarkoituksena on lähentää opiskelijoita työelämän toimijoihin. Paja tarjoaa käytettäväksi laitteita, joita yrityksillä itsellään ei ole käytettävissä. Opiskelijat voivat esimerkiksi tehdä asiakastöitä yrityksille näiden laitteiden avulla.

Yksi protopajalle keväällä 2008 hankituista laitteista oli Tesa Micro Hite 3D DCC-koordinaattimittauskone. Kyseessä on numeerisesti ohjattu mittauskone, joka pystyy suorittamaan mittaukset automaattisesti ennalta määritellyn mittausohjelman mukaan. Ohjelmointi suoritetaan PC-DMIS 4.2 -ohjelmiston avulla.

Koordinaattimittauskone on viime aikoina nopeasti yleistynyt mittalaite, joka voi korvata monia perinteisiä mittalaitteita. Koordinaattimittauskoneella mitattaessa määritellään mitattavien pisteiden koordinaatit tasossa tai kolmiulotteisessa mittausvaruudessa. Mittausohjelmisto tulkitsee mittapään asennot ja paikat ja laskee niiden perusteella tarvittavat mittaus tulokset. Koordinaattimittauskoneen voi sanoa olevan yleismittauskone, joka kykenee lähes minkä tahansa muotoisen kappaleen piirteiden mittaamiseen.

Insinööri työn tavoitteena on selvittää, kuinka mitattavasta kappaleesta ennen valmistusta laadittua CAD-mallia voidaan hyödyntää ohjelmoinnissa käytettäessä Tesa Micro Hite -koordinaattimittauskonetta varustettuna PC-DMIS 4.2 -ohjelmistolla. Eräs tärkeä selvityksen kohde on esimerkiksi se, että pystytäänkö koordinaattimittauskoneelle luomaan automaattimittausohjelma CAD-mallin avulla, ehkä jopa ilman fyysistä mittauskonetta. Mahdollisuus käyttää CAD-nimellismallia apuna ohjelmoinnissa voisi parhaassa tapauksessa helpottaa ja nopeuttaa ohjelmointia huomattavasti.

Lopputuloksista on hyötyä kaikille mittauskonetta käyttäville tahoille, kuten Kajaanin ammattikorkeakoululle, Kainuun ammattiopistolle sekä protopajan asiakkaille. Lopputuloksista voidaan päätellä myös CAD-mallin käytön hyödyllisyyttä yleisesti teollisuuden käytössä olevien mittauskoneiden ohjelmoinnissa.

2 KONEPAJATEKNISET MITTAUKSET

2.1 Mittaukset laadunvalvonnassa

Koko teollisuuden historian ajan on ollut tärkeää, että asiakas saa tarpeisiinsa riittävän laadukkaan tuotteen. Tämä on taattu laadunvarmistuksella. Laadunvarmistukseen olennaisena osana kuuluvat erilaiset mittaukset ja tarkastukset. Mittaaminen itsessään ei riitä laadun parantamiseen, mutta mittaamisen avulla valmistusprosessin toimivuudesta saadaan tietoa, ja sen perusteella valmistusprosessia voidaan tarvittaessa kehittää. [2, s. 9.][4, s. 1.]

Laatu määritellään usein siten, että valmistettava tuote on yhteensopiva olemassa olevien vaatimusten ja normien kanssa. Fyysisen tuotteen mittojen ei yleensä tarvitse olla absoluuttisesti mittatarkkoja, vaan mitoille sallitaan tietyt poikkeamat, toleranssit. Mittaaminen on tärkeä osa laadunvalvontaa. Mittaamisen avulla voidaan selvittää, ovatko tuotteen mitat asetettujen toleranssien sisällä. Laadunvalvonnassa saatuja tietoja voidaan hyödyntää laadunohjauksessa. Laadunohjauksessa mittaamalla saatua palautetietoa voidaan käyttää valmistusprosessin parantamiseen, jolloin saadaan aikaan parempaa laatua ja parempia tuotteita. Mittaamiseen on aikojen saatossa kehitetty erilaisia tekniikoita. [2, s. 16–30.]

2.2 Mittaustekniikan historiaa

2.2.1 Laadunvarmistuksen tarpeen synty

Teollistumisen alkuvaiheessa ei tunnettu kunnolla käsitettä vaihtokelpoisuus. Periaatteessa keskenään samanlaisten tuotteiden osat eivät olleet keskenään vaihtokelpoisia, koska osat oli valmistettu sovittamalla ne vain tiettyyn kokoonpanoon. Esimerkiksi samantyyppisten ase-

den lukot poikkesivat mitoituksiltaan toisistaan; kukin lukko sopi paikalleen vain siihen kivi-
vääriin, mihin se oli valmistusvaiheessa sovitettu. [2, s. 9.]

Lähinnä sodankäynnin tarpeiden takia alettiin 1700-luvulla suunnitella kokoonpanojen osat
vaihtokelpoisiksi. Tämä mahdollisti nopean sarjatuotannon. Vaihtokelpoisuuden mahdollis-
tamiseksi oli laadittava mitoittamiseen, tolerointiin ja mittaukseen järjestelmiä, joilla varmistee-
taan osien yhteensopivuus. [2, s. 9.]

Uudet tarkkuusvaatimukset vaikuttivat siten, että tuotantotekniikka alkoi kehittyä nopeasti.
Valmistuksessa käytettävien koneiden tarkkuutta oli parannettava jotta niiden avulla pystyt-
täisiin valmistamaan riittävän mittatarkkoja tuotteita. Luonnollisesti myös laadunvarmistuk-
seen käytettäviä välineitä, kuten erilaisia mittalaitteita, oli kehitettävä. [2, s. 10.]

2.2.2 Pituudenmittaus ja mittausvälineet

Useimmat mittaukset tuotantotekniikassa mittaavat joko pituutta tai jotakin pituuden joh-
dannaista. Tarkkoja pituudenmittauksia varten oli jo 1600-luvulla käytössä alkeellinen työn-
tömitta. Mikrometriruuvien ensimmäiset versiot tulivat teollisuuden käyttöön 1700-luvulla.
1800-luvun puolivälissä käytössä oli jo jossakin määrin myös erilaisia mikroskooppeja ja
komparaattoreita. [2, s. 13.]

Vuonna 1855 Englannissa kehitettiin 1-akselinen mittauskone, joita voidaan pitää ensimmäi-
senä koordinaattimittauskoneena. Tällaisen koneen avulla pystyttiin mittaamaan peräti tuu-
man miljoonasosan tarkkuudella. Koneen avulla voitiin mitata kierteiden mittaukseen tarkoi-
tettuja tulkkeja. Näiden tulkkien avulla pyrittiin standardoimaan kierteen nousu siten, että
missä päin maailmaa tahansa valmistettu mutteri sopisi missä päin maailmaa tahansa valmis-
tettuun pulttiin, joka on samankokoinen ja saman standardin mukainen. [1, s. 17.]

1900-luvun vaihteessa tapahtui taas suuri mittaustekninen edistysaskel, kun Ruotsissa kehi-
tettiin mittapalasarja. Mittapalasarjaan kuului sarja fyysisiä mittanormaaleja. Mittapalasarjan
avulla voitiin suorittaa tarkkoja pituudenmittauksia. Eräs tärkeimmistä mittapalasarjan eduis-

ta oli mahdollisuus tarkkuuden siirtämiseen. Mittauksia pystyttiin nyt jäljittämään ja toistamaan entistä paremmin. [2, s. 12, 13.]

Seuraava edistysaskel mittaustekniikassa oli optisten mittauslaitteiden yleistyminen konepajoissa. Optisten mittalaitteiden, kuten erilaisten komparaattorien ja mikroskooppien avulla mittaukset olivat tarkkoja ja toistettavia, mikäli mittausolosuhteet pysyivät stabiileina. Mittalaitteille oli siis järjestettävä tilat, joissa lämpötila, ilmankosteus ja muut mittauksiin vaikuttavat tekijät eivät päässeet vaihtelemaan liikaa, mittaushuoneet. [2, s. 14.]

Ensimmäiset kolmiulotteiseen mittaukseen kykenevät koordinaattimittauskoneet valmisti sveitsiläinen SIP vuonna 1930. Koneen avulla voitiin jo määrittää mitattavan kappaleen jonkin pisteen X- Y- ja Z-koordinaatit. Tästä alkoi 3-koordinaattimittauskoneiden yleistyminen. 1960-luvun vaihteessa erilaisia koordinaattimittauskoneita oli käytössä maailmanlaajuisesti noin 900 kappaletta. Koneet olivat tässä vaiheessa vielä käsikäyttöisiä. Suomeen ensimmäiset koordinaattimittauskoneet tulivat 1970-luvulla. NC-ohjaus mittauskoneissa on yleistynyt tietotekniikan kehittymisen myötä. [1, s. 18–24.]

Laser-interferometriaan perustuvia mittauslaitteita alkoi tulla käyttöön 1960-luvulla, järjestelmä yleistyi 1970-luvulla. Kyseistä mittausmenetelmää käytetään esimerkiksi kalibroinnissa. Myös työstökoneiden tarkistus on tärkeä laser-interferometrinen mittauksen käyttökohde. [2, s. 14, 199.]

3 KOORDINAATTIMITTAUSKONE

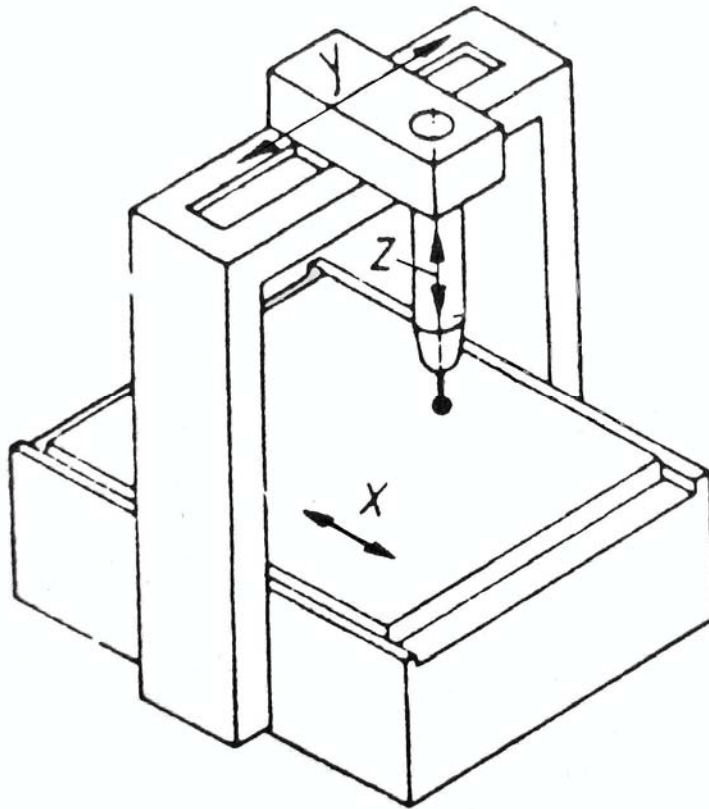
Koordinaattimittaus tarkoittaa mittaustapaa, jossa mitattavien pisteen koordinaatit määritetään tila-avaruudessa tai tasossa. Tila-avaruuden muodostaa se alue, jolla koordinaattimittauskoneen mitta-anturi kykenee liikkumaan ja suorittamaan mittauksia. Mitattavien pisteiden avulla muodostetaan kappalegeometria. Koordinaattimittaus voidaan suorittaa useilla eri tavoilla. Esimerkiksi seuraavia koordinaattimittaustapoja voidaan käyttää: GPS, fotogrammetria, laserkeilain, laserseurain, laserskanneri, viistokuvamittaus, röntgenmittaus ja koordinaattimittauskone. [1, s. 16.][8.]

Koordinaattimittauskone on mittalaite, jonka yleisimmissä sovelluksissa mitta-anturia liikuttavat luistit kulkevat tarkasti suunnattuja johteita pitkin. Mittauskoneessa on yleensä kaksi tai kolme pääakselia. Akseleiden suuntaus vaihtelee. Mittaus tapahtuu joko koskettavan mittakärjen avulla tai optisesti. [4, s. 4.][8.]

3.1 Koordinaattimittauskoneen runkorakenne

Koordinaattimittauskoneet voidaan runkorakenteensa perusteella jakaa viiteen erilaiseen päätyyppiin, portaali-, silta-, puomi-, pylväs- piirroituskone- ja yhdistelmätyyppinen koordinaattimittauskone. [1, s. 45.]

Portaalityyppinen koordinaattimittauskone (kuva 1) kuuluu yleisimpiin rakenteisiin. Tämän tyyppisessä runkorakenteessa ylikulkusiltaa muistuttava portaali liikkuu koneen mittausalueen pisimmän akselin suunnassa. Portaaliilla liikkuu luisti, johon puolestaan kiinnittyy mittausanturi. [1, s. 47, 48.]



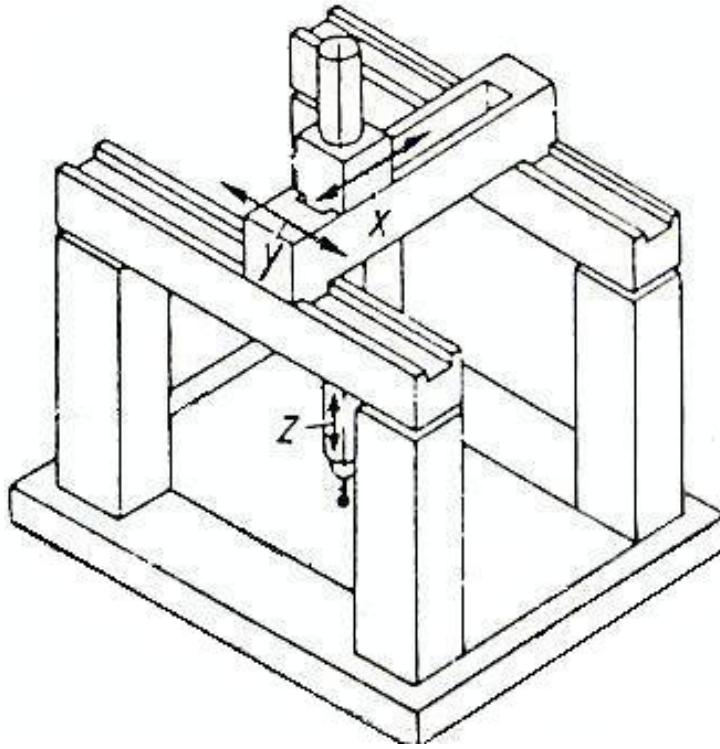
Kuva 1. Portaalityyppisen koordinaattimittauskoneen rakenne. [6, s. 449.]

Portaalityyppinen koordinaattimittauskone on yleensä rakenteeltaan verraten jäykkä. Jäykkyyteen vaikuttaa molemmilta puolilta tuetun portaalin lisäksi massiivinen, usein diabaasi-kivestä valmistettu mittausalusta. Vaikka rakenteen jäykkyys parantaakin tarkkuutta, on portaalityypisellä mittauskoneella yksi erityisen heikko kohta, portaalin käyttö. Käyttö on usein järjestetty siten, että portaalialia liikutellaan vain toiselta puolelta toisen puolen tukeutuessa luistiaan vasten. Tämä voi aiheuttaa suuntavirhettä mittaukseen, mikäli luistien ja portaalin kiinnityksessä on vähänkään välystä. Joissakin koneissa ongelma on ratkaistu järjestämällä käyttö keskeisesti. [1, s. 48.]

Portaalityyppisiä koneita on olemassa eri kokoluokissa. Portaalien liikematka on yleensä välillä 800 – 1200 mm. Suurimmissa koneissa liikematka voi olla jopa yli 10 metriä ja pienimmissä noin 300 mm. [2, s. 232.]

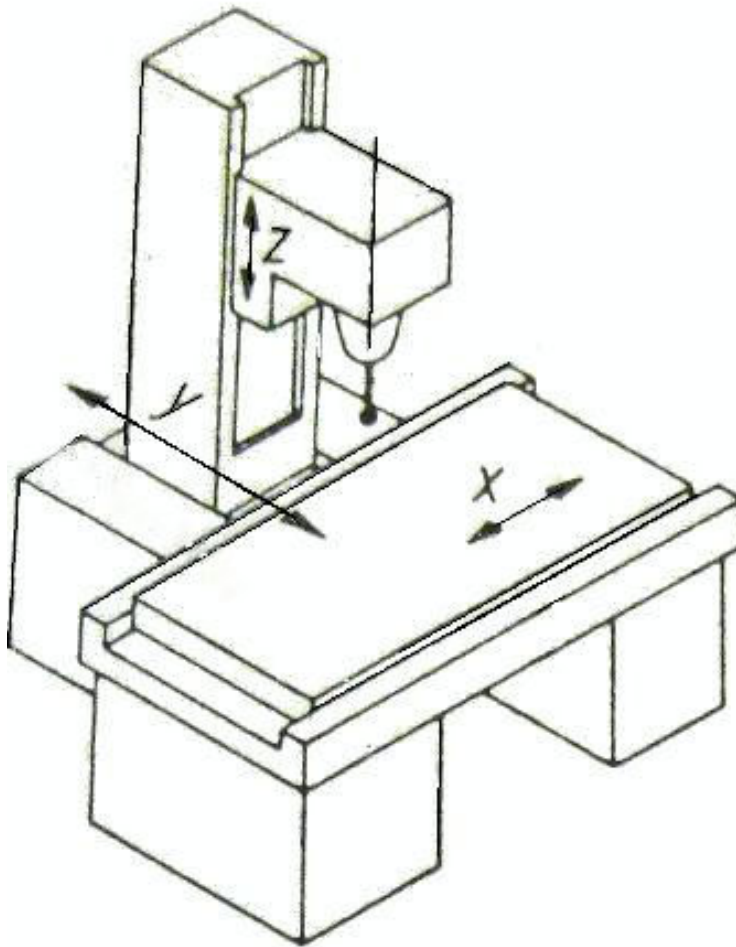
Siltatyyppinen koordinaattimittauskone (kuva 2) muistuttaa rakenteeltaan hieman portaalityyppiä. Usein rakenteesta kuitenkin puuttuu mittauskoneen runkoon kiinnitetty mittausalusta. Portaalityyppiseen koneeseen verrattuna siltatyyppisessä koneessa on pienempi rakenteen

yläosaan sijoittuva massa. Siltatyypisen mittauskoneen suurimmissa sovelluksissa esimerkiksi mittaushallin lattia voi toimia mittausalustana, ja kone voi suorittaa mittauksia jopa henkilöauton korin kokoisille kappaleille. Siltarakenteen etu on juurikin mahdollisuus suurten kappaleiden mittaamiseen. [1, s. 46, 51.]



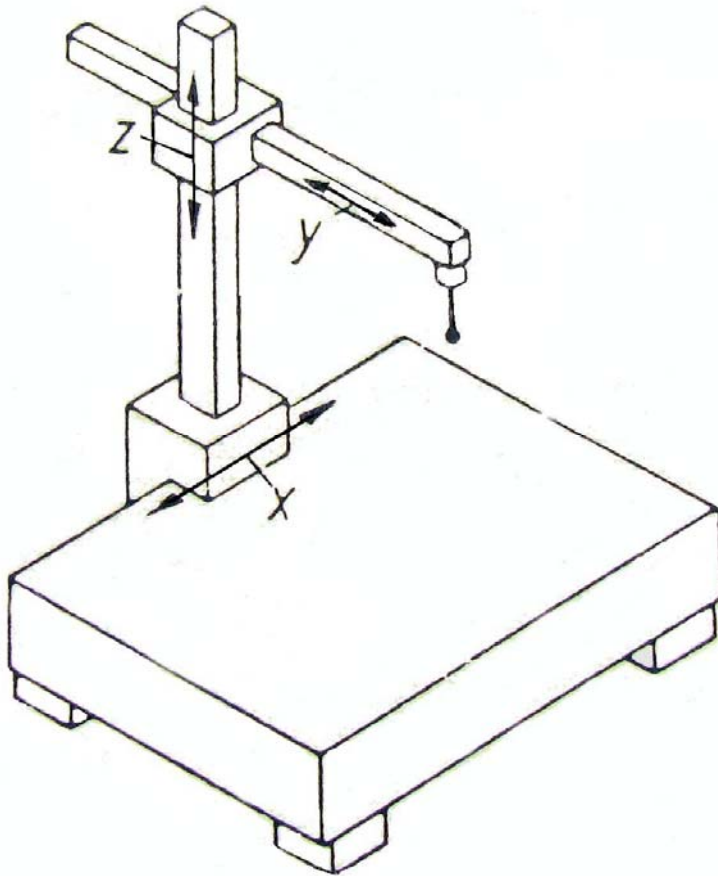
Kuva 2. Siltatyypisen koordinaattimittauskoneen rakenne. [6, s. 449.]

Puomityyppinen koordinaattimittauskone (kuva 3) muistuttaa rakenteeltaan hieman perinteistä jysinkonetta. Aiemmin tästä runkotyypistä myös käytettiin nimitystä jysinkonetyyppinen koordinaattimittauskone. Myös tämän runkorakenteen koneet voidaan tehdä kooltaan suuriksi, ja suurten kappaleiden mittaukseen sopiviksi. [1, s. 46.]



Kuva 3. Puomityyppisen koordinaattimittauskoneen rakenne. [6, s. 449.]

Pylvästyypinen koordinaattimittauskone (kuva 4) soveltuu siltatyypin ohella jopa auton korin suuruisten kappaleiden mittaamiseen. Perusosana toimii suuri taso, jonka toisella tai molemmilla sivuilla on luistit mittapylvään liikkeitä varten. Mittapylväitä on vain toisella puolen tasoa tai molemmilla puolilla. Mittapylvääseen kiinnittyy varsi, jonka päässä on koskettava tai optinen mittapää. Kaikista suurimmissa koneissa mittapylväiden johteet ovat erillään mittausalustasta, jotta alustaa voitaisiin kuormittaa enemmän. [1, s. 46, 53.]



Kuva 4. Pylvästyypin koordinaattimittauskoneen rakenne. [6, s. 449.]

Edellisten runkotyyppien lisäksi nykyään käytetään jonkin verran myös nivelvarsityyppisiä koordinaattimittauskoneita [4, s. 4]. Tällaiset koneet ovat yleensä manuaalikäyttöisiä ja rakenteeltaan kevyitä ja helposti liikuteltavia. Nivelvarressa on 6 – 7 vapausastetta eli niveltä. Ohjaus laskee mittapään paikan käsivarren nivelten kulmamuutosten perusteella. Tarkkuus riippuu nivelvarsien pituudesta. Pienimmät tämän rakenteen koneet ovat usein tarkempia kuin suuret. [1, s. 59.]

Koordinaattimittauskoneiden mittauspöytien valmistusmateriaalina voidaan käyttää graniittia, diabaasia tai valurautaa. Vanhemmissa koneissa mittauspöydällä oli suuri merkitys mitattavien kappaleen suuntauksessa. Nykyisin suuntaus tapahtuu yleensä ohjelmallisesti, eikä mittauspöydällä ole siihen vaikutusta. [2, s. 231.]

3.2 Koordinaattimittauskoneiden tekniikkaa

3.2.1 Automaatioaste

Koordinaattimittauskoneita on saatavilla erilaisilla automaatioasteilla. Halvimmat koneet ovat käsikäyttöisiä, eli mittapäättä liikutellaan käsin tai käsipyörillä. Astetta kalliimpi ratkaisu on mittauskone, jossa mittapään liikuttelu tapahtuu motorisoidusti. Kalliimman hintaluokan koneet on varustettu NC-ohjauksella. NC-ohjatut koneet työskentelevät niihin ohjelmoidun mittausohjelman perusteella. Käsikäyttöiset mittauskoneet ovat yleisimpiä edullisen hintansa takia. Motorisoidut mittauskoneet ovat jääneet harvinaisiksi, mutta NC-ohjauksella varustettujen mittauskoneiden suosio kasvaa koko ajan. [1, s. 180.]

Sinänsä koneiden automaatioaste ei vaikuta mittauksen tarkkuuteen, mutta mittauksen toistettavuus on luonnollisesti parempi automaattisissa koneissa. NC-ohjattu mittauskone voi suorittaa täysin samaa mittausohjelmaa periaatteessa rajattoman monta kertaa peräkkäin, eli mittauksen toistettavuus on hyvä. Manuaalisissa mittauskoneissa jokainen mittaus on erilainen, koska mittapäättä liikuttaa ihminen. Ihminen ei voi myöskään säätää mittausvoimaa vakioksi, toisin kuin automaattinen kone ja kehittyneimmät, mittausvoiman säädöllä varustetut motorisoidut mittauskoneet. [2, s. 229.]

3.2.2 Mittaushuonekoneet ja verstaskoneet

Mittauskoneissa on eroja sen suhteen, millaisissa olosuhteissa ne on suunniteltu käytettäväksi. Nähtävissä on kaksi erilaista kehityssuuntaa, mittaushuonekoneet ja verstaskoneet. [2, s. 130.]

Mittaushuonekoneet on tarkoitettu käytettäväksi mahdollisimman muuttumattomissa olosuhteissa, esimerkiksi lämpötilan tulisi pysyä lähes vakiona. Tämä pystytään järjestämään sijoittamalla mittauskone olosuhteiltaan stabiiliin mittaushuoneeseen. [2, s. 130.]

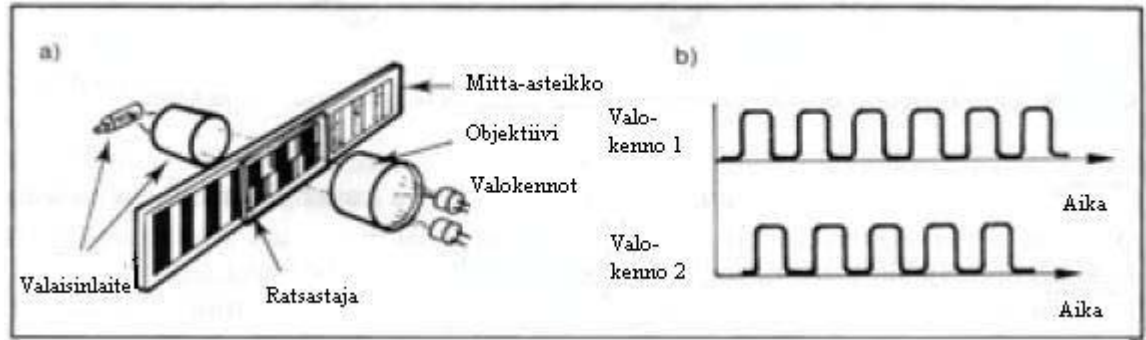
Verstaskoneet poikkeavat mittaushuonekoneista siinä, että niiden rakenteessa on hyväksytty mahdolliset olosuhteiden muuttumiset. Koneet on varustettu kompensointijärjestelmillä, joi-

den ansiosta muuttuvat olosuhteet eivät pääse vaikuttamaan mittaustuloksiin liian suuressa määrin. Kompensointijärjestelmä perustuu antureihin, joita on sijoitettu mittaamaan esimerkiksi lämpötilaa eri puolilla konetta. [2, s. 130.]

3.3 Aseman mittaus

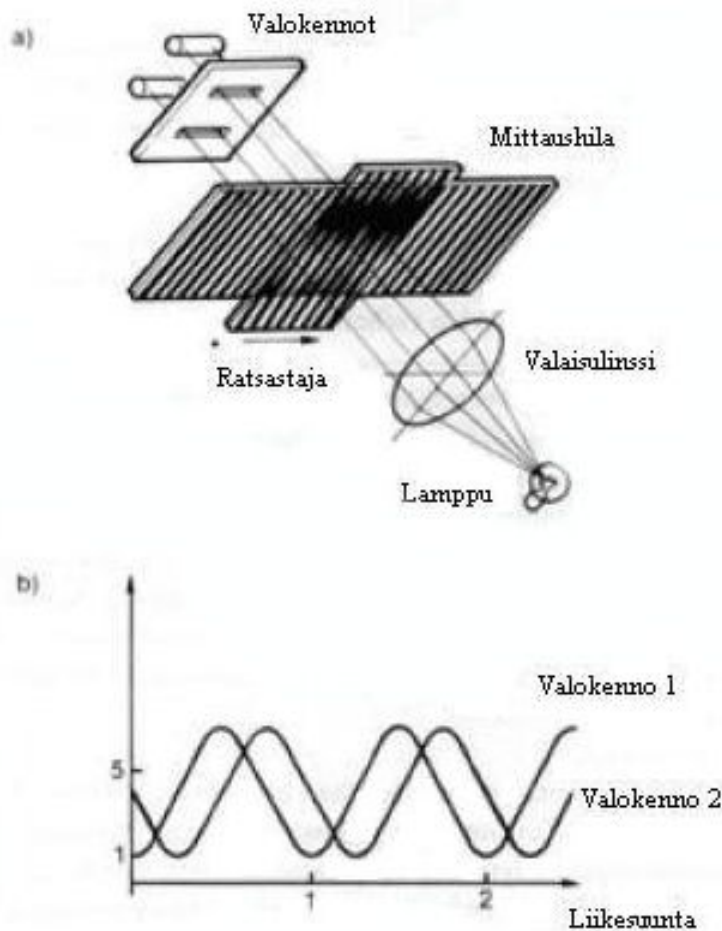
Koordinaattimittauskoneen ohjaus saa koneen aseman tietoonsa pituudenmittausjärjestelmän avulla. Halvimmissa koordinaattimittauskoneissa ei ole ollenkaan digitaalista pituudenmittausjärjestelmää, vaan pelkät liikeakseleilla sijaitsevat mitta-asteikot tulosten lukemista varten. Mittaustarkkuus jää tällöin heikoksi. Digitaalisen aseman mittauksen avulla saadaan huomattavasti tarkempia tuloksia, samalla työskentely nopeutuu ja mittaustulokset voidaan käsitellä automaattisesti. Digitaalinen asemanmittaus mittaa nykyisissä mittauskoneissa luistin liikettä aina suoraan ilman mekaanisia välityksiä. Mitta-asteikko voi olla esimerkiksi lasi- tai teräsrakenteinen. Digitaalinen asemanmittaus voidaan toteuttaa yhdensuuntaishilajärjestelmällä, Moiré-järjestelmällä, Inductosyn-järjestelmällä tai, tosin nykyään harvoin, laserinterferometrialla. [1, s. 98.][4, s. 6–8.]

Yhdensuuntaishilajärjestelmässä (kuva 5) asteikkona toimii lasi, jossa on vuorotellen mustia ja läpinäkyviä saman levyisiä kenttiä. Asteikosta käytetään myös nimitystä hilaviivain. Mustan ja läpinäkyvän kentän leveyksien summa muodostaa yhden askeleen. Hilaviivaimen toisella puolella on valoherkkiä kennoja ja toisella puolen valonlähde. Kun hilaviivainta siirretään, musta kenttä estää välillä valon tuleminen kennolle, ja välillä valo pääsee kennolle asti läpinäkyvän kentän kohdalta. Valokennot antavat pulssin hilaviivaimen siirryttyä askeleen verran. Liikkeen suunnan tunnistamiseen käytetään kahta ratsastajaa, joissa on saman levyisiä mustia ja läpinäkyviä kenttiä kuin hilaviivaimessa. Ratsastajat vaikuttavat eri valokennoihin, ja niiden viiva-asteikot ovat toisiinsa nähden $\frac{1}{4}$ askeleen vaihesiirrossa. Tällöin toinen valokenno saa liikesuunnasta riippuen valoa ja antaa signaalin ennen toista valokennoa. Valokennojen antamilla signaaleilla on siten $\frac{1}{4}$ askeleen vaihe-ero toisiinsa nähden. [4, s. 6.]



Kuva 5. Yhdensuuntaishilajärjestelmän toimintaperiaate. Tässä tapauksessa käytetään kahden ratsastajan sijasta yhtä ratsastajaa, jossa on kaksi viiva-asteikkoa. Ratsastajan ylempi asteikko vaikuttaa ylem্পään valokennoon, alempi asteikko alempaan valokennoon. [4, s. 7.]

Moiré-järjestelmän toimintaperiaate (kuva 6) on samankaltainen kuin yhdensuuntaishilajärjestelmän. Ratsastaja on tässä sovelluksessa pienessä kulmassa hilaviivaimen nähden, jolloin se saadaan peittämään useita askelia. Tällöin askelvirheiden mahdollisuus pienenee. Asteikon liikesuunta saadaan selville käyttämällä useampia valokennoja, jolloin toinen valokenno antaa liikesuunnasta riippuen signaalin ennen toista. [4, s. 7.]



Kuva 6. Moiré-järjestelmän toimintaperiaate. [4. s. 7.]

Myös Inductosyn-järjestelmässä käytetään mitta-asteikkoa ja ratsastajaa. Mitta-asteikko on valmistettu sähköä johtamattomasta materiaalista, ja sen pinnalla on sähköä johtavasta materiaalista tehty kuvio, joka muodostaa käämiä. Ratsastaja on levy, jossa on kaksi käämiä, joiden askel on sama kuin mitta-asteikon kuvion askel. Ratsastajan käämeillä on keskenään $\frac{1}{4}$ askeleen vaihe-ero. Molempiin käämeihin tulee vaihtovirtaa, mutta toiseen tulevalla vaihtovirralla on 90 asteen vaihe-ero toiseen käämiin tulevaan vaihtovirtaan nähden. Kun ratsastaja liikkuu mitta-asteikkoon nähden, mitta-asteikon käämiin indusoituu sinimuotoista signaalia. Signaalin aallonpituus on sama kuin mitta-asteikon askel, ja siirtomatka päätellään signaalin perusteella. [4, s. 8.]

Laser-interferometrin toiminta perustuu taajuuseroperiaatteeseen. Laser lähettää kahta hieman toisistaan poikkeavaa valon taajuutta yhtä aikaa. Magneettikentän avulla saadaan aikaan taajuuden jakaminen. Taajuudet polarisoidaan eri suuntiin, jolloin ne pystytään erottelemaan toisistaan esimerkiksi peileillä. [4, s. 8.]

Laser-interferometriaa ei nykyisin juurikaan käytetä mittauskoneissa, vaikka se onkin suotuisissa olosuhteissa tarkka järjestelmä. Ympäristöolosuhteiden on havaittu vaikuttavan liikaa mittaustuloksiin. Esimerkiksi ilman taitekertoimen muutokset vaikuttavat laservalon aallonpituuteen. Järjestelmä on myös kallis koordinaattimittauskoneisiin yhdistettynä. Muissa mitaustehtävissä järjestelmä toimii hyvin. [1, s. 98.]

3.4 Mittausanturit ja mittakärjet

Koordinaattimittauskone saa paikkatiedot mitattavasta kappaleesta mittakärjen ja mittausanturin välityksellä. On olemassa sekä koskettavia että koskemattomia mittausantureita. Koskettava mittausanturi antaa pisteen paikkatiedot, kun mittakärjellä kosketetaan pistettä fyysisesti. Koskemattomat mittausanturit toimivat optisesti tai laserin avulla, eivätkä tarvitse mittakärkeä. [2, s. 233, 234.]

3.4.1 Koskettavat mittausanturit ja mittakärjet

Koskettavat mittausanturit jaetaan kytkeviin ja mittaaviin. Molemmissa tarvitaan mittakärkeä kosketuksen ottamiseen. [2, s. 234.]

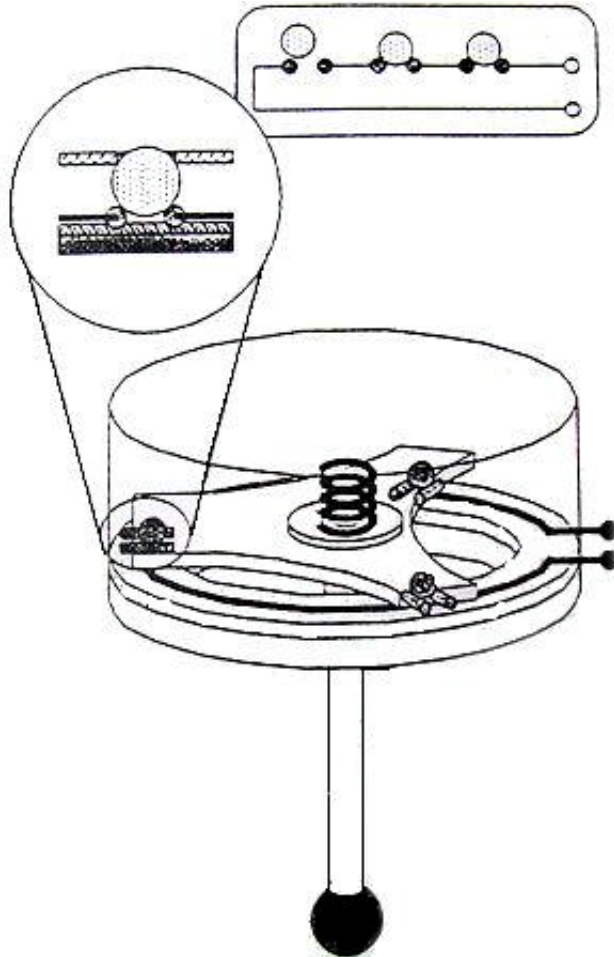
Kytkevä mittausanturi

Kytkevä mittausanturi (kuva 7) on toimintaperiaatteeltaan melko yksinkertainen. Kun anturiin kiinnitetty mittakärki koskettaa mitattavaa kappaletta ja poikkeaa tällöin hieman perusasennostaan, tapahtuu kytkeytyminen. Kun mittausanturi kytkeytyy, koneen ohjain lukee sen hetkiset mittauskärjen paikkatiedot. Kytkevän mittausanturin heikko kohta on se, ettei yksi mittauspää pysty aistimaan kosketuksen suuntaa. Jos kosketuksen suunta poikkeaa paljon koordinaattiakselien suunnasta, mittaustarkkuus heikkenee. [2, s. 234.]

Joissakin tapauksessa kosketuksen suunnan tunnistamisen ongelmat on ratkaistu käyttämällä pietsosähköisesti kytkevää mittausanturia. Pietsosähköisesti toimiva anturi pystyy aistimaan

myös kosketuksen suunnan. Mittaus perustuu piezokiteen lähettämään jännitetason muutokseen kosketushetkellä. [4, s. 11.][1, s. 117.]

Kytkevällä mittausanturilla mittaukset tapahtuvat piste kerrallaan, ja kappaleen nurkkien ja piirteiden reunojen tarkkaa sijaintia on käytännössä mahdotonta määrittää. [1, s. 104.]



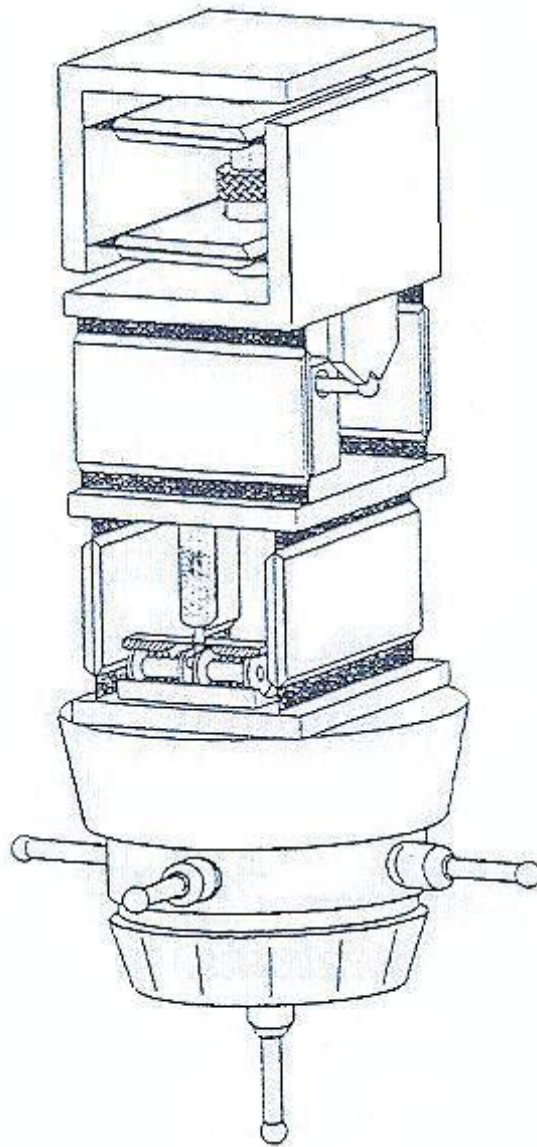
Kuva 7. Kytkevän mittausanturin rakenne. [2, s. 234.]

Mittaava mittausanturi

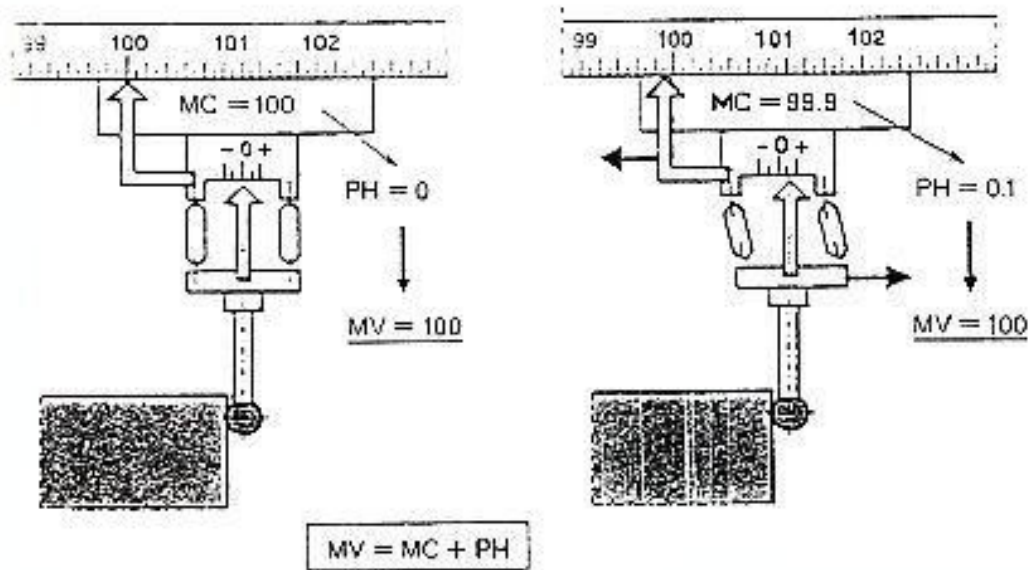
Mittaava mittausanturi (kuva 8) sisältää mitta-asteikot, eli se on tavallaan pienikokoinen koordinaattimittauskone jo itsessään. Mittaava mittausanturi pystyy tunnistamaan kosketussuunnan, ja kosketussuunta voi olla lähes mielivaltainen. Vapausasteita on yleensä kolme, ja ne ovat toisiaan vasten kohtisuorassa. Mittaavassa mittausanturissa on useita mittakärkiä,

yleensä viisi kappaletta. Mitattavan pisteen koordinaatit lasketaan lisäämällä mittauspään poikkeusarvoihin kosketushetkellä luetut asematiedot (kuva 9). [2, s. 235.]

Mittaavalla mittausanturilla voidaan suorittaa myös pyyhkäisymittaus, jossa mittakärkeä kuljetetaan kohteen pinnalla, ja pinnan muodot tallentuvat pyyhkäisyn etenemisen mukana. Ohjelmistossa nämä muodot yhdistetään, ja kappaleesta saadaan nopeasti mittaustulokset. Pyyhkäisymittausta voidaan hyödyntää esimerkiksi luotaessa CAD-mallia mitattavasta kappaleesta. Pyyhkäisymittaus ei ole aivan yhtä tarkka menetelmä kuin useilla yksittäisillä kosketuksilla suoritettava mittaus, mutta nopeampi. [1, s. 114, 122, 123.]



Kuva 8. Mittaavan mittausanturin rakenne. [2, s. 235.]



Kuva 9. Mittaavan mittausanturin toimintaperiaate. Vasemmassa kuvassa staattinen pisteenmittaus, oikeassa scanning-mittaus. PH on mittauspään poikkeusarvo. MC on mittaasteikon paikkatieto kytketymsihetkellä. Edellisten summa MV on todellinen kosketuskohdan paikka. [2, s. 235.]

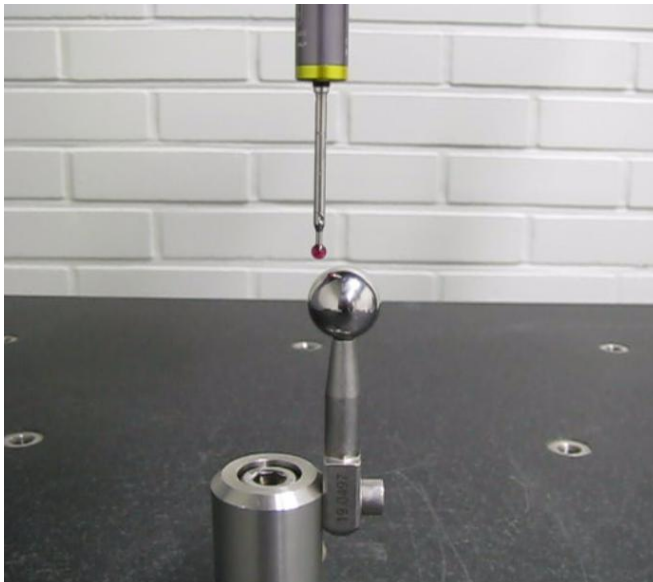
Mittakärki

Koskettavissa mittauspäissä on käytettävä mittakärkeä (kuva 10). Useimmiten mittakärki on metallisen tai keraamisen varren päähän kiinnitetty pallon tai kiekon muotoinen osa. Joissakin sovelluksissa käytetään myös muun muotoisia, kuten piikkimäisiä tai kartiomaisia mittakärkiä. Mittakärjen on oltava muototarkka. Pallomaisesta mittapästä saadaan tarkasti haluttu muotoinen, mikäli se valmistetaan spinellistä eli synteettisesti valmistetusta rubiinista. Kiekkomaisissa mittakärjissä teräs on yleinen valmistusmateriaali. [2, s. 236.]



Kuva 10. Pallomainen mittakärki

Mittakärjet on kalibroitava (kuva 11) ennen mittauksia, jotta mittauskoneen ohjaus kykenisi tulkitsemaan mittakärjen antamat signaalit oikein. Kalibrointiin käytetään useimmiten tarkasti pallon muotoista elementtiä, joka on sijoitettu koneen mittausvaruuteen. Kalibroinnissa mittakärjellä kosketetaan palloa kaikista suunnista kaikilla mittausanturin asennoilla. Kalibrointi on syytä suorittaa uudelleen, mikäli mittakärki on esimerkiksi törmännyt jossakin vaiheessa mitattavaan kappaleeseen tarkoitettua suuremmalla nopeudella. [2, s. 237.]



Kuva 11. Mittakärjen kalibrointi kalibrointipallon avulla.

3.4.2 Optiset mittausanturit

Optiset mittausanturit jaotellaan koskettavien antureiden tavoin kytkintyyppisiin ja mittaaviin antureihin. Lisäksi käytetään myös manuaalista optista mittausta esimerkiksi hiusviiva-asteikon avulla. [1, s. 125.]

Profiiliprojektorit

Profiiliprojektori (kuva 12) on eräs varhaisimpia mittauskonesovelluksia, jota voidaan käyttää manuaalisena tai automaattisena mittauskoneena. Manuaalisessa profiiliprojektorissa on yleensä hiusviiva-asteikko, joka kohdistetaan projektorin ruudulla näkyvään kohteeseen. Mittaus tapahtuu mittaamalla kohteen liikettä hiusviiva-asteikkoon nähden X- tai Y-akselin suunnassa. Koordinaatistoa voidaan kiertää eri asentoon tarpeen mukaan. Automaattisesti mittaavassa profiiliprojektorissa on usein valoon reagoiva diodi sijoitettuna mattalasille. Valon määrän muutos aiheuttaa jännitemuutoksen. Kun kohteen reuna ohittaa diodin, valon määrä muuttuu ja paikka rekisteröidään. [1, s. 125.]



Kuva 12. Manuaalinen profiiliprojektori

Videomittauskoneet

Videomittauskoneet ovat kahden koordinaattiakselin suunnassa mittauksia suorittavia koordinaattimittauskoneita. Ne poikkeavat tavanomaisesta koordinaattimittauskoneesta eniten siinä, että mittausanturin tilalla on usein CCD-kennolla varustettu, syväterävyydeltään pieni digitaalikamera. Joissakin tapauksissa mittauksia voidaan suorittaa kolmen akselin suunnassa. Jos kamera on kohtisuorassa esimerkiksi Z-akselia vastaan, voidaan kohteen korkeuseroja mitata kameran tarkennuksen avulla. [1, s. 126.]

X- ja Y-akselien suunnassa mittaukset tapahtuvat siten, että kohteen pinnasta tai reunasta määritetään digitaalikuvan perusteella silmämääräisesti halutut pisteet. Pisteet saadaan määritettyä esimerkiksi kappaleen reunaan tarkasti kameran tarkennuksen avulla, jolloin reuna erottuu hyvin. Ohjaavan tietokoneen ruudulla voi olla hiusristikko tai muu apugeometria, jota voi siirrellä hiirellä mitattaviin kohteisiin. [1, s. 127.]

Videomittauskoneella ei voida mitata esimerkiksi pystysuoria pintoja, reikiä tai pallomaisia muotoja. Kappaleessa pystysuorassa olevien reikien reunat voidaan kylläkin tunnistaa, mutta ei reiän pystysuoraa sisäpintaa. Videomittaus on siis lähinnä kohteen ja sen piirteiden reunojen tunnistusta. Koskettavalla mittauksella reunoja ei voisi tarkasti määrittää. [1, s. 128.]

3.4.3 Laseranturit

Lasersädettä voidaan useilla tavoilla hyödyntää etäisyyden mittaamisessa. Mittaus toteutetaan usein joko kolmiomittauksena tai fokusoivana mittauksena. [1, s. 155.]

Kolmiomittauksessa kappaleen pintaa kohden lähetetään laservaloa diodilaserilla. Laser heijastuu pinnasta takaisin linssin kautta analogiselle tai digitaaliselle sensorille. Säteen ja heijastuksen muodostamasta kulmasta voidaan laskea kohteen pinnan etäisyys anturista. Pystyseinämiä tai syvien reikien seinämiä ei voida mitata, koska valo ei voi heijastua takaisin sensorille. Esimerkiksi reikien halkaisijan tai muodon mittaaminen on tällä järjestelmällä mahdotonta. Mitattavan kappaleen väri vaikuttaa mittauksiin. Parhaiten onnistuu mattavalkoisten kappaleiden mittaus, koska valo heijastuu siitä takaisin sopivasti. Liika kiilto voisi ”sokaista” an-

turin. Mattamustaa kappaletta on taas vaikeaa mitata, koska mattamusta väri ei juurikaan heijasta valoa. [1, s. 155, 156.]

Fokusoivalla laseranturilla mitattaessa laservalon heijastusmatka mitattavasta kappaleesta muutetaan siirtymäksi diodille. Diodin napaisuus riippuu heijastuneen valon osumiskohdasta. Mittauskoneen Z-akseli ohjautuu sen mukaan, tuottaako diodi plus- vai miinussuuntaista jännitettä. Kun Z-akseli on tarkennusta ajatellen sopivalla etäisyydellä kohteen pinnasta, diodin tuottama jännite on nolla. Menetelmän parhaita ominaisuuksia on se, että esimerkiksi olakkeita tai syvien reikien pohjia on helppoa mitata. [1, s. 155, 158.]

3.5 Ohjelmointitavat

NC-ohjauksella varustettu koordinaattimittauskone kykenee manuaalisen mittauksen ohella suorittamaan mittauksen myös automaattisesti mittausohjelman perusteella ilman koneenkäyttäjän jatkuvaa valvontaa. Koneenkäyttäjää tarvitaan joissakin tapauksissa vain mitattavan kappaleen vaihtamiseen ja sijainnin osoittamiseen ennen automaattimittausta. Mittausohjelman avulla mittaus voidaan toistaa samanlaisena useille kappaleille. Mittausohjelma voidaan luoda koneelta käsin opettamalla, tällöin on kyse on-line-ohjelmoinnista. Jos on tarpeen pystyä luomaan mittausohjelmia ilman mittauskonetta, on käytettävä etäohjelmointia. [1, s. 180.]

3.5.1 On-line -ohjelmointi

Mittauskoneen on-line -ohjelmointi tapahtuu yleensä opetusohjelmointina. Mitattava kappale mitataan normaaliin tapaan ohjaamalla mittauskonetta käsiohjaimella, mutta tarvittavat mittauspisteet tallennetaan osaksi mittausohjelmaa. Näin samat pisteet voidaan mitata seuraavista samanlaisista kappaleista. Ohjelmaan tarvitaan usein myös välipisteitä, joiden kautta mittapää siirtyy pisteestä toiseen törmäämättä kappaleeseen. Mittaustulosten nimellisarvot joudutaan syöttämään käsin. Mittauskoneella ei luonnollisesti voi tehdä muita mittauksia ohjelmoinnin aikana. [1, s. 180, 185.][2, s. 238.]

3.5.2 Etäohjelmointi

Etäohjelmointi voidaan suorittaa ilman fyysistä mittauskoneetta. Ohjelmointitapa ei siis sido mittauskoneetta käyttöönsä. Automaattimittausohjelma voidaan laatia valmiiksi, vaikkei yhtään mitattavaa kappaletta ole vielä valmiina. Etäohjelmointi on kuitenkin edelleen mittauskoneiden kohdalla suhteellisen harvinaista. Yleistymisen esteinä on ollut menetelmän kalleus. Ohjelmointiin tarvitaan tehokas työasema, etäohjelmointia tukeva ohjelmisto sekä ammattitaitoinen ohjelmoija. Ohjelmointia varten tarvitaan usein myös CAD-mallit mitattavista kappaleista. [1, s. 180, 181.]

Mittauskoneiden etäohjelmointina tehdyt ohjelmat eivät yleensä tarvitse postprosessoria ohjelman siirtoon koneelle, koska koneet voidaan varustaa DMIS-tulkilla. DMIS-tulkki kääntää standardimuotoisen ohjelman mittauskoneen ymmärtämään muotoon. Mittausohjelmiston ei siis tarvitse olla konekohtainen, vaan yleiset, kaikille koneille suunnitellut kolmansien osapuolien ohjelmistot sopivat yleensä etäohjelmointiin. [1, s. 181.]

Jotta etäohjelmointi olisi mahdollista, tarvitaan mitattavan kappaleen CAD-malli, mittauskoneen mittauspään simulaatiomalli ja mahdollisesti myös kiinnittimien mallit. Ohjelma voidaan luoda ohjelmistolla, jonka ohjelmakoodi saadaan käännettyä käytettävälle mittauskoneelle sopivaan muotoon. Lopuksi ohjelma tarkistetaan simuloinnin avulla. Mittaustulosten nimellisarvot voidaan joissakin tapauksissa ottaa suoraan CAD-mallin piirteiden mitoista, eikä niitä tarvitse syöttää erikseen mittausohjelmaan. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, esimerkiksi kierteiden kohdalla. Malleja ei usein ole piirretty kierrestandardien mukaisesti, jolloin CAD-mallista saatavat nimellimitat ovat väärä. [1, s. 180, 188.]

Yksi etäohjelmoinnin hyvistä puolista on useiden ohjelmistojen tarjoama mahdollisuus mittausohjelman simuloimiseen. Mittausohjelma voidaan ajaa virtuaalisesti ohjelmointiin käytettävän tietokoneen näytöllä, jolloin mittauskärjen simulaatiomalli suorittaa ohjelmaan määritetyt liikkeet. Simuloinnin avulla voidaan havaita esimerkiksi törmäyksiä aiheuttavat ohjelmointivirheet. Ohjelmat joudutaan useimmiten kuitenkin testaamaan fyysisellä mittauskoneella ennen automaattimittausta, koska simulointiin ei voi kaikissa tapauksissa luottaa. [1, s. 180, 181.]

Videomittauskoneissa etäohjelmointia ei juurikaan käytetä 3D-kappaleille. Vaikeuksia aiheuttaisi esimerkiksi kappaleen reunan mittaaminen myötävalossa, mikäli todellista mitattavaa kappaletta ei ole nähtävillä. [1, s. 193.]

4 TESA MICRO HITE 3D DCC -KOORDINAATTIMITTAUSKONE

Tutkimustyön kohteena oli Tesa Micro Hite 3D DCC -koordinaattimittauskone (kuva 13) varustettuna PC-DMIS 4.2 Online -ohjelmistolla.



Kuva 13. Tesa Micro Hite 3D DCC -koordinaattimittauskone

4.1 Yleistä tietoa

Tesa Micro Hite 3D DCC on numeerisella ohjauksella varustettu keskikokoinen koordinaattimittauskone. Runkorakenteeltaan Tesa on portaalityyppinen. Rungon valmistusmateriaalina

on käytetty alumiinia. Mittausalustana toimii graniittivalmisteinen massiivinen taso, joka samalla toimii runkoa jäykistävänä rakenteena. Mitattavan kappaleen kiinnitystä varten tasossa on kaikkiaan 11 kiinnityspistettä, jotka on varustettu M10 kierteellä. Tesa pystyy suorittamaan mittaukset maksimissaan 440*490*390 millimetrin mittaiselle kappaleelle. Johteiden laakerointi toimii paineilmalla, paineilmaa suihkutetaan johteiden ja luistien väliin 22 eri kohdasta. [7, s. 2, 3.]

Tekniset tiedot (taulukko 1)

Taulukko 1. Tesa Micro Hite 3D DCC teknisiä tietoja. [7, s. 2, 3.]

Mittausalue (X, Y, Z)	440 mm * 490 mm * 390 mm
Suurin liikenopeus	1732 mm/s
Kiihtyvyys	1732 mm/s ²
Suurin mitattavan kappaleen paino	227 kg
Suosittelut työskentelylämpötila	20 ° ± 1 ° C
Toimintalämpötila	10 °C – 35 °C
Käyttöpaine	4.0 bar
Ilmankulutus	21 NL/min
Toistotarkkuus	2.0 µm
Paino	393 kg

4.2 Mittausanturit ja mittakärjet

Tesa-mittauskone suorittaa mittaukset koskettamalla. Kone on varustettu Tesastar-m -mittausanturilla (kuva 14). Tesastar-m on kytkevä motorisoitu mittausanturi, jossa voidaan käyttää pituudeltaan alle 300 mm mittakärkiä. Mittausanturi voi kiertyä perusasennostaan 180 asteen verran sekä myötä- että vastapäivään. Mittakärjen lähestymiskulma voi olla välillä -115° - 90°. Anturi voi vaihtaa asentoaan nopeudella 45°/s. Sama mittakärki voidaan kääntää tarvittaessa 2952 erilaiseen asentoon. Liikkeiden toistotarkkuus on 0.5 µm. [7, s. 13, 14.]



Kuva 14. Mittausanturi (Tesastar-m).

Kajaanin ammattikorkeakoulun mittauskoneessa käytettävissä on valikoima mittauskärkiä pituudeltaan 20 millimetristä 70 millimetriin. Suurin osa mittakärjistä on pallopäisiä, pallon halkaisija vaihtelee 2 millimetrin ja 4 millimetrin välillä.

4.3 Ohjelmointi

Tesa-mittauskone on varustettu PC-DMIS -ohjelmistolla. Ohjelmistoversio on PC-DMIS 4.2 Online. PC-DMIS on monipuolinen, laajalti käytetty mittausohjelmisto, josta on erilaisia versioita erityyppisiin mittauskonesovelluksiin ja eri ohjelmointitapoihin.

Ohjelmiston avulla mittaustulokset saadaan selkeään, pdf-muotoiseen taulukkomuotoon (kuva 15). Todellisen mitattavan kappaleen mittoja voidaan taulukossa verrata annettuihin nimellisarvoihin. Ohjelmisto ilmoittaa taulukossa myös, mikäli mitat ovat ennalta määriteltyjen toleranssien ulkopuolella. [5.]

PC-DMIS -ohjelmistosta on olemassa erityisesti online- ja etäohjelmointiin suunnitellut versiot [5]. Kajaanin ammattikorkeakoulun mittauskone on varustettu ohjelmiston online-versiolla, joka on tarkoitettu opettamalla tapahtuvaan ohjelmointiin mittauskoneelta käsin. Offline-versiolla ohjelmoinnin voi mahdollisesti suorittaa ilman mittauskonetta CAD-mallin avulla.

pc-dmis		PART NAME : 12.2.09					February 12, 2009	15:52
		REVNUMBER :			SER NUMBER :		STATS COUNT : 1	
↔	MM	URANSYVYYS - YLAPINTA TO URAN POHJA						
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M		3.000	2.984	0.200	-0.200	-0.016	0.000	
↔	MM	REIKIEN VALI - VASEN R TO OIKEA R						
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M		65.000	65.024	0.200	-0.200	0.024	0.000	
↔	MM	URAN LEVEYS - URAN OIK SIVU TO URAN VASEN SIVU						
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M		24.000	24.988	0.200	-0.100	0.988	0.788	
↔	MM	LEVEYS - TAKASEINA TO ETUSEINA						
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M		38.000	37.882	0.200	-0.200	-0.118	0.000	
∠	DEG	URAN SUORUUS - ETUSIVU TO URAN OIK SIVU						
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
A		-90.000	-89.935	0.200	-0.200	0.065	0.000	

Kuva 15. Esimerkki mittausraportista. NOMINAL on tuloksen nimellisarvo. MEAS on kappaleesta mitattu todellinen arvo. Määriteltyjen toleranssien ulkopuolelle jäävät mitat on merkitty punaisella. Hyväksyttävissä rajoissa olevat mitat on merkitty vihreällä.

4.3.1 On-line -ohjelmointi

On-line -ohjelmointi PC-DMIS -ohjelmistolla tapahtuu siten, että kappaleen automaattimitausohjelma tehdään opettamalla. Mittauskärki ohjataan käsiohjaimen avulla niihin mitattavan kappaleen kohtiin, joihin halutaan luoda mitattava piste. Esimerkiksi tasomaisiin pintoi-

hin on luotava useita mittauspisteitä, jotka ohjelma tunnistaa tasoksi. Ohjelmisto piirtää kappaleen 3D-mallia ohjelmointiin käytettävän tietokoneen ruudulle samalla kun kappaleen piirteitä opetetaan. Ohjelmisto kykenee siis myös piirteiden skannaamiseen yksittäisillä kosketuksilla. Tallennetut pisteet siirtyvät mittausohjelmaan, ja mittaus voidaan näin toistaa automaattisesti, mikäli mitattavia kappaleita on useita samanlaisia. [5.]

Ohjelmaan on vielä määritettävä nopeudet ja siirtymätavat, jottei mittauskärki törmäisi kappaleeseen siirtymävaiheessa. Ohjelmaa voidaan muutenkin vapaasti muokata. Ensimmäisen kappaleen mittautulokset tallentuvat jo opetusvaiheessa, eikä kappaleelle tarvitse suorittaa automaattimittausta, mikäli mitattavia kappaleita on vain yksi. Mikäli automaattimittauskomento jätetään ohjelmasta pois, voidaan mittausohjelma ajaa myös manuaalisesti useille kappaleille. Tällöin ohjelmisto antaa mittaajalle ohjeet, mitkä pisteet milloinkin mitataan. Tarkempi selvitys online-ohjelmoinnin vaiheista on kappaleessa 5.2.1. [5.]

4.3.2 Etäohjelmointi

Tesa-koordinaattimittauskoneen ohjelmointiin käytettävät tietokoneet voitaisiin tarvittaessa varustaa PC-DMIS -ohjelmiston Offline-versiolla, mikäli ohjelmointi haluttaisiin aina suorittaa etäohjelmointina CAD-nimellismallin perusteella. Ohjelmiston valmistajan ilmoituksen mukaan CAD-malliin pohjautuvaa ohjelmointia voidaan kuitenkin jossakin määrin hyödyntää myös ohjelmiston online-versiossa. Tämän tutkimustyön tarkoituksena on selvittää kuinka tämä tapahtuu. [5.]

5 TUTKIMUSJÄRJESTELYT

5.1 Tutkimustyön tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, pystyykö mahdollista mitattavasta kappaleesta tehtyä kolmiulotteista CAD-mallia hyödyntämään mittauskoneen ohjelmoinnissa ja käytössä, ja millä tavoin. Ohjelmiston valmistaja ilmoittaa tämän mahdolliseksi joihinkin ohjelmistoversioihin, mutta mittauskoneen mukana tulleissa käyttöohjeissa asiaa ei selvitetty kovinkaan perusteellisesti.. CAD-mallista voisi olla suurtakin hyötyä mittauskonetta käytettäessä.

Suurin hyöty olisi mahdollisesti siitä, jos automaattimittausohjelma voitaisiin luoda pelkän CAD-mallin perusteella, ilman fyysistä mittauskonetta ja kappaletta. Tämä säästäisi huomattavasti ohjelmointi- ja koneaikaa. Toinen merkittävä hyöty olisi mahdollisuus tarkistaa mittausohjelman toimivuus virtuaalisesti ennen ohjelman suorittamista fyysisen kappaleen kanssa. Näin voitaisiin välttää ohjelmointivirheistä johtuvat mittakärjen törmäykset ja mahdollinen vahingoittuminen. CAD-mallin avulla voisi lisäksi mahdollisesti asettaa mitattavalle kappaleelle mittaustulosten nimellisarvot suoraan mallista, eikä niitä tarvitsisi syöttää ohjelmaan erikseen.

5.2 Tutkimustyön vaiheet

Tutkimustyön alkuvaiheessa oli perehdyttävä mittauskoneen ja ohjelmiston käyttöön. Ensimmäinen opeteltava asia oli mittausohjelman laatiminen online-ohjelmointitavalla. Mitattavana kappaleena toimi oppilastyönä jyrsinkoneella valmistettu metallikappale. Kun koneen ohjelmointi on-line -ohjelmointitavalla ja automaatti sekä manuaalimittauksen suoritus oli opeteltu, oli saatu perustiedot mittauskoneen käytöstä sekä tietoja opetusohjelmoinnin hyödyistä ja huonoista puolista käytännössä. Tämän jälkeen oli aika aloittaa tarkempi ohjelmiston tutkiminen.

Ensimmäinen vaihe varsinaisessa tutkimustyössä oli selvittää, kuinka mitattavan kappaleen CAD-malli saadaan syötettyä ohjelmistoon. Tämän jälkeen oli selvitettävä, pystyykö automaattimittausohjelman luomaan tämän nimellismallin perusteella, ilman varsinaisen mittauskoneen käyttöä. Mahdollisuus mittausohjelman tarkistamiseen simuloinnin avulla oli seuraava tutkittava asia. Tutkimustyössä selvitettiin myös erilaisten CAD-tiedostoformaattien soveltuvuutta ohjelmointiin.

Seuraavassa vaiheessa tuli hyödyntää CAD-mallia ohjelmoinnissa. Mittauskoneelle oli laadittava 3D-tulostimien tulostustarkkuutta testaava mittausohjelma mitattavan kappaleen nimellismallin perusteella. Fyysistä mitattavaa kappaletta ei tällöin ollut olemassa, koska ensimmäinen tutkittava 3D-tulostin oli vasta aloittanut kappaleen tekemisen.

Tutkimustyössä verrattiin myös ohjelmointitapojen nopeutta. Selvitetiin, kuinka kauan saman kappaleen automaattimittausohjelman tekemiseen kuluu aikaa opettamalla tapahtuvassa ohjelmoinnissa ja CAD-malliin pohjautuvassa ohjelmoinnissa.

6 TUTKIMUSTYÖN SUORITUS

6.1 On-line -ohjelmointi ilman CAD-mallia

Mittauskoneen käyttöä harjoiteltiin aluksi laatimalla automaattimittausohjelma normaaliin tapaan on-line -ohjelmointitavalla. Samalla saatiin kokemuksia opettamalla tapahtuvan ohjelmoinnin hyvistä ja huonoista puolista.

Tesa -mittauskoneen automaattimittausohjelman luomisessa ensimmäinen vaihe on käytettävän mittauspään valinta. Koneen muistiin on tallennettu käytettävät mittauspäät ja niiden mitat. Mittauspään valinnan jälkeen aloitetaan uusi ohjelma. Ohjelmointitavaksi valitaan Machine 1, joka tarkoittaa sitä, että ohjelmisto on yhteydessä mittauskoneeseen. Ohjelman graafinen näyttö ja ohjelmariveille varattu tila näkyvät tässä vaiheessa ruudulla.

Käsiohjaimen avulla osoitetaan mitattavasta kappaleesta tarvittavat piirteet (kuva 16), joiden avulla kappaleen paikka mittausavaruudessa voidaan määrittää yksiselitteisesti. Kappaleen ei tällöin tarvitse olla mittausalustalla suorassa X- ja Y-akselien suunnissa, koska kappaleen paikan määrittävien piirteiden avulla mittauskone voi suorittaa geometrisen korjauksen. Geometrisessa korjauksessa kappaleen koordinaatisto ja mittauskoneen koordinaatisto yhdistetään. Geometrisen korjaus on mahdollista myös Z-akselin suhteen, tosin mittakärjen asentoa täytyy vaihtaa, mikäli kappale on mittauspöydällä kallistettuna.



Kuva 16. Mitattavan kappaleen sijainnin määrittävien piirteiden osoittaminen.

Kun kappaleen sijainnin määrittävät piirteet on osoitettu, voidaan laatia varsinainen automaattimittausohjelma. Tässä vaiheessa on määritettävä origon paikka. Tämän jälkeen Ohjelmaan lisätään varoitus automaattimittauksen alkamisesta, sekä DCC mode -käsky, jolla kone aloittaa automaattimittauksen. Ohjelmaan määritetään tässä vaiheessa mittausohjelmassa käytettävät nopeudet sekä välitason paikka. Tällöin mittakärki siirtyy ennen siirtymiä välitasoon eikä törmää mitattavaan kappaleeseen.

Kun ohjelmassa on kaikki edellinen, on vuorossa mitattavien piirteiden osoittaminen käsiohjaimella. Kun piirteestä on määritetty riittävän monta pistettä, esimerkiksi tasosta 3 pistettä, piirteen mittaus lisätään mittausohjelmaan kuittauspainikkeella. Mittakärjen asentoa vaihdettaessa on muistettava siirtää mittakärki sellaiseen paikkaan, ettei se pääse kääntyessään törmäämään mihinkään.

Kun tarvittavat piirteet on mitattu, voidaan mittausohjelmaan määrittää mitä mittoja ohjelmassa mitataan. Ohjelma laskee ensimmäisen, juuri mitatun kappaleen kohdalta kyseiset arvot ja asettaa ne nimellisarvoiksi. Oikeat nimellisarvot ja toleranssit voidaan määrittää tässä vaiheessa. Piirteet ja mitattavat arvot on hyvä nimetä mittaustulosten tulkinnan helpottamiseksi. Kun ohjelma on valmis, se voidaan tarvittaessa toistaa automaattimittauksella. Tällöin on käsiohjaimen avulla osoitettava mitattavan kappaleen sijainti ohjelman alkuun määriteltyjen piirteiden avulla, jolloin ohjelmisto laskee kappaleen sijainnille geometrisen korjauksen. Tämän jälkeen mittauskone suorittaa automaattimittauksen ja tulostaa raportin.

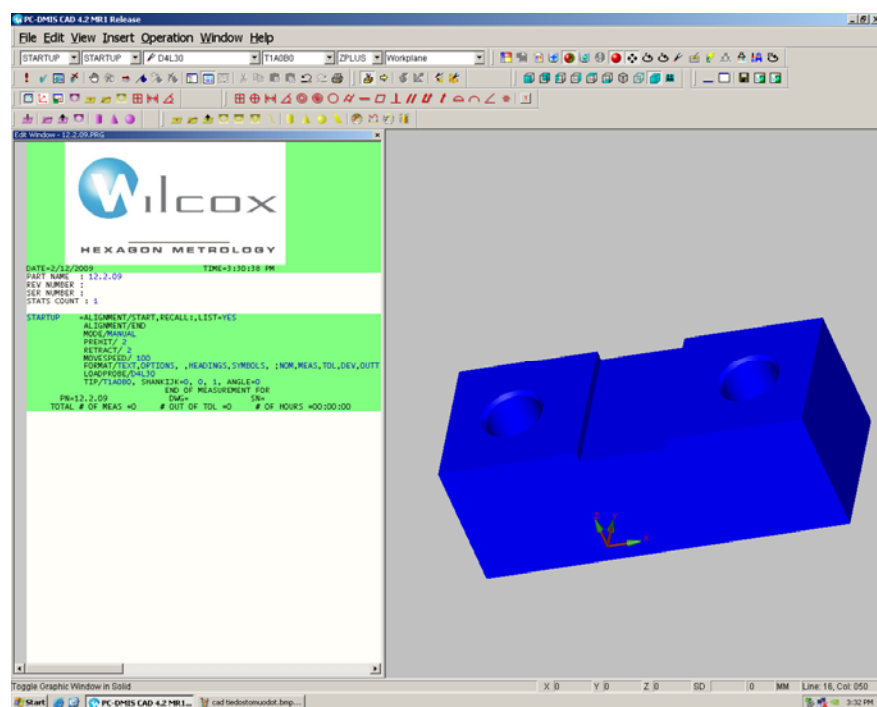
6.2 CAD-mallin syöttäminen ohjelmaan

PC-DMIS 4.2 -ohjelmistoon ja käyttöohjeisiin tutustuttaessa selvisi, että ohjelmisto ymmärtää määrättyihin tiedostomuotoihin tallennettuja CAD-malleja ja kykenee näyttämään mallin kuvan ohjelmointiin käytettävän tietokoneen näytöllä. Ohjelmistossa on tätä varten olemassa Import-komento, jonka avulla CAD-mallit tuodaan. Tuettuja tiedostomuotoja tässä ohjelmistoversiossa ovat CAD, CAD BY REFERENCE, DES, DXF, IGES, IGES ALT, STEP, STL, VDAFS, XYZ ja DMIS. Jotta CAD-mallin tuontia voitaisiin kokeilla, oli laadittava sopiva malli. Malli laadittiin samasta oppilastyönä tehdystä jyräntäkappaleesta, jota oli käytetty

mittauskoneen online-ohjelmointia harjoiteltaessa. Mallinnuksessa käytettiin Autodesk Inventor -ohjelmistoa. Tallennusmuotona oli IGES, joka on neutraali ja useimmissa sovelluksissa toimiva tallennusformaatti [3].

Tässä vaiheessa havaittiin, että myös PC-DMIS Online -ohjelmistossa on olemassa offline -tila, jolloin ohjelmisto ei ole suorassa yhteydessä mittauskoneeseen. Ohjelmointiin käytettävän tietokoneen ruudulla tehdyt käskyt eivät vaikuta tällöin mittauskoneen liikkeisiin. Ohjelmisto ei kuitenkaan tästäkään huolimatta käynnisty, mikäli mittauskone ei ole käynnissä. CAD-malli voidaan tuoda ohjelmistoon myös online-tilassa. Tällöin ruudulla tehdyt käskyt, kuten mittausanturin asennon vaihto, voisivat aiheuttaa fyysisen mittauskoneen tahattomia liikkeitä.

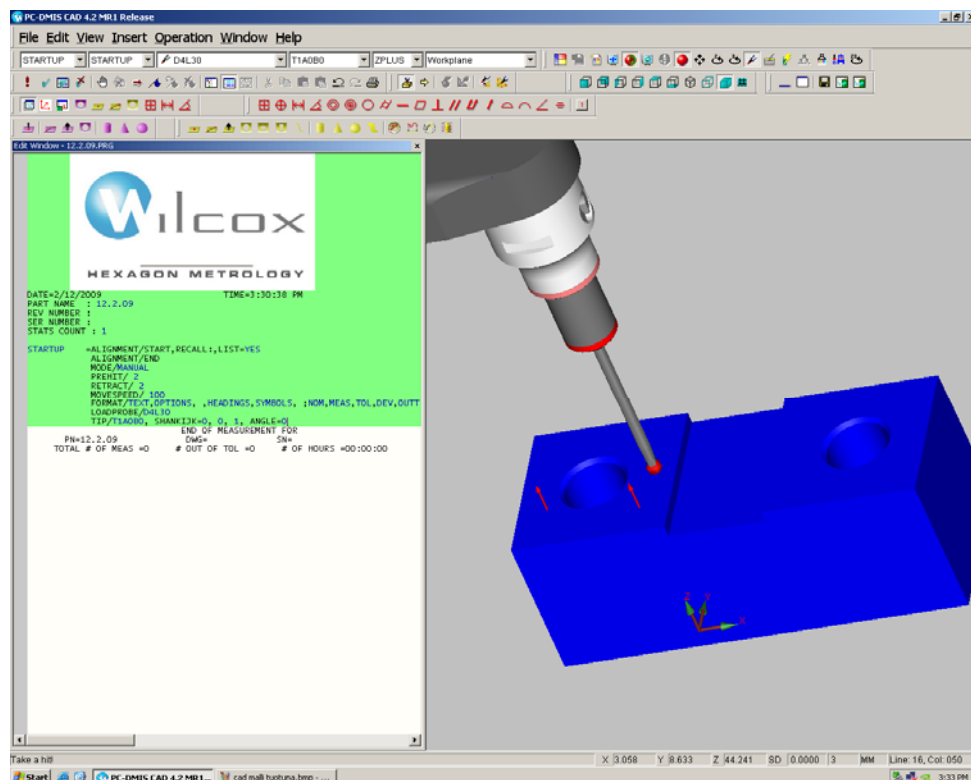
Ohjelmisto avattiin nyt offline-tilassa ennen CAD-mallin tuontia. Yritettäessä siirtää Inventorissa IGES-muotoon tallennettua mallia ohjelmaan havaittiin, ettei ohjelma kyennyt ottamaan sitä vastaan. Import-komennon alta löytyi kuitenkin myös IGES Alternate -muoto, jota käyttäen vastaanotto onnistui. Tämän jälkeen jyräntäkappaleen 3D-malli näkyi ohjelman Graphics display -näyttöalueella (kuva 17), johon opetusohjelmoinnissa piirtyvät kappaleen mitatut pürteet.



Kuva 17. Mitattavan kappaleen CAD-malli ohjelmiston graafisessa näyttöikkunassa.

6.3 CAD-mallin hyödyntäminen ohjelmoinnissa.

Tässä vaiheessa CAD-malli oli saatu näkymään PC-DMIS -ohjelmiston graafisessa näytössä, mutta kuvaa ei pystytty millään tavalla hyödyntämään. Kursori ei tarttunut mihinkään CAD-mallin piirteeseen, eikä ohjelmisto reagoinut siihen, että kursorilla kosketettiin mallia. Asia korjaantui, kun ohjelma siirrettiin Program mode -tilaan. Tällöin kursorin tilalle tuli ohjelmaan käynnistäessä määritellyn mittauskärjen ja mittausanturin virtuaalimalli (kuva 18). Malli oli kooltaan oikeassa suhteessa kappaleen 3D-malliin nähden. Mittakärkeä pystyttiin ohjaamaan tietokoneen hiirellä, ja ohjelman ollessa offline-tilassa mittakärki pystyttiin kääntämään ruudulla eri asentoon ilman, että mittauskoneen fyysinen mittakärki olisi liikkunut.

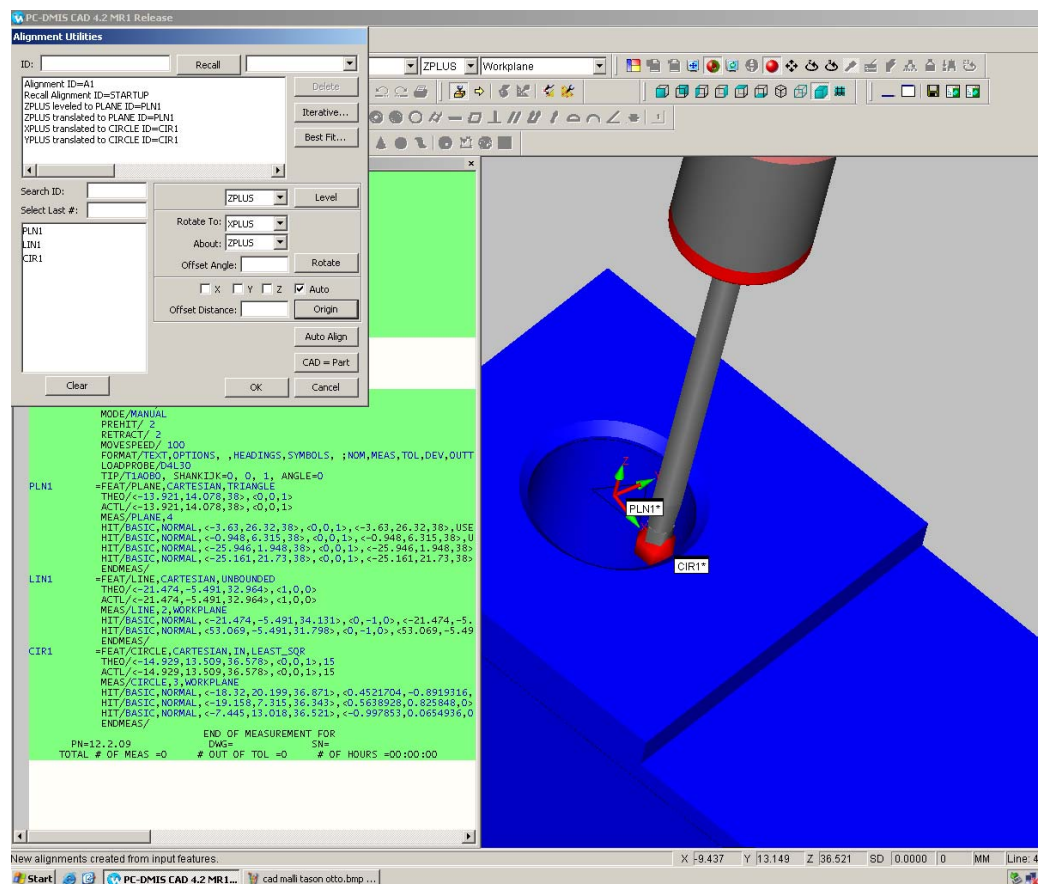


Kuva 18. Mittauskärjen virtuaalimalli määrittämässä jrsintäkappaleen CAD-mallin ylätasoa.

Seuraava vaihe oli ensimmäisen, yksinkertaisen mittausohjelman luominen virtuaalisen mittakärjen ja CAD-mallin avulla. Virtuaalinen mittakärki pystyi ottamaan kosketuksia CAD-malliin hiirellä ohjattuna. Kosketuksen ottamiseen tarvittiin hiiren vasemman painikkeen painaminen. Kun kosketuksia oli tarpeeksi esimerkiksi tason tai reiän määrittämiseen, oli

painettava näppäimistön END-painiketta. Tällöin piirteen mittaus siirtyi osaksi mittausohjelmaa. Ohjelmaa pystyi muokkaamaan samalla tavalla kuin online-tilassa. Ohjelman rakenne oli myös samanlainen. Aluksi määritettiin kappaleen sijainti, jyräntäkappaleen tapauksessa yläpinnan, vasemman reiän ja etupinnan avulla. Seuraavaksi määritettiin kappaleen origon sijainti vasempaan reikään (kuva 19). Samalla oli vahvistettava CAD=Part -painikkeen avulla, että CAD-kuva vastaa mitattavaa kappaletta. Näin mittauskone pystyy suorittamaan geometrisen oikaisun, jolloin kappaleen asento mittauspöydällä ei vaikuta mittaukseen.

Tämän jälkeen siirryttiin automaattimittaukseen, jossa mitattiin tässä tapauksessa uran pohjataso. Ohjelman loppuun lisättiin käsky mitata uran syvyys kappaleen yläpinnan ja uran pohjatason sijainnin perusteella. Ohjelma mittasi jo tässä vaiheessa vastaavan arvon CAD-mallista, ja asetti sen nimellisarvoksi.



Kuva 19. Kappaleen vasemman reiän osoittaminen CAD-mallista. Vasen reikä on määritetty kappaleen origoksi.

Ohjelman luomisen jälkeen ohjelmaa kokeiltiin käytännössä. Koska ohjelmistolla ei ole offline-tilassa yhteyttä koordinaattimittauskoneeseen, oli ohjelma suljettava ja avattava tämän jälkeen online-tilassa. Automaattimittausta aloitettaessa ohjelma pyysi normaaliin tapaan osoittamaan fyysisestä kappaleesta sen sijainnin tunnistamiseen tarvittavat piirteet mittakärjen ja käsiohjaimen avulla. Tämän jälkeen kone suoritti automaattimittauksen. Ruudulla näkyi samaan aikaan reaaliaikainen simulaatio mittaustapahtumasta ja mittauspään liikkeitä. Mittauksen jälkeen ohjelma tulosti raportin, jossa fyysisen jyrintäkappaleen keskellä olevan uran syvyyttä verrattiin CAD-kuvasta mitattuun oletusarvoiseen uransyvyyteen. Tämän automaattimittausohjelman käskyt ovat luettavissa liitteessä 1.

6.4 CAD-mallin hyödyntäminen mittausohjelman tarkistuksessa

6.4.1 Simuloinnin käynnistys

Edellisessä vaiheessa koordinaattimittauskone oli saatu suorittamaan automaattimittausohjelma, joka oli laadittu CAD-nimellismallin perusteella. Ohjelma oli tehty tarkoituksella yksinkertaiseksi, esimerkiksi mittauskärjen asentoa ei vaihdettu kertaakaan mittausohjelman aikana. Yksinkertaisuuteen pyrittiin siksi, ettei ohjelmaan syntyisi mittauspään törmäyksiä aiheuttavia ohjelmointivirheitä. Mittauskärjen törmäykset pystytään välttämään, mikäli ohjelman toiminta tarkistetaan etukäteen. PC-DMIS -ohjelmisto ei offline-tilassa ole yhteydessä mittauskoneeseen, mutta seuraavassa vaiheessa selvitettiin, pystyykö mittausohjelman silti ajamaan, ilman mittauskonetta näyttöruudulla simuloituna.

Ohjelman toimintaa tutkittaessa selvisi, että samalla Execute-komennolla, jolla online-tilassa käynnistetään automaattimittaus, käynnistetään myös mittausohjelman simulointi offline-tilassa. Tällöin fyysinen mittauskone ei luonnollisestikaan suorita liikkeitä, pelkästään näyttöruudulla oleva mittausanturin ja mittakärjen simulaatiomalli. Ohjelman simulointia aloitettaessa ohjelmisto pyytää osoittamaan kappaleen sijainnin määräävät piirteet CAD-mallista, samalla tavalla kuin ne automaattimittauksen alussa osoitetaan mitattavasta kappaleesta. Mitta-

kärjen simulaatiomalli ohjautuu kuitenkin näihin määrääviin piirteisiin itse, ja tarvittavien paikoituspisteiden sijainti hyväksytään tietokoneen ruudulla näkyvällä Continue-painikkeella. Kun kappaleen paikka on määritetty, simulaatio käynnistyy.

6.4.2 Simuloinnin avulla tarkistettu mittausohjelma

Kun mittausohjelman tarkistaminen oli havaittu mahdolliseksi, voitiin luoda ensimmäistä kokeiluohjelmaa vaativampi automaattimittausohjelma. Jo ensimmäisessä ohjelmointikokeilussa mitattavana olleelle jyrsinkappaleelle luotiin nyt monipuolisempi ohjelma, jossa mitattiin kappaleen leveys, reikien väli sekä keskellä olevan uran leveys ja syvyys. Kappaleen leveyttä mitattaessa oli määriteltävä sen etuseinämän ja takaseinämän etäisyys. Etuseinää ja takaseinää mittakärjen asentoa tuli vaihtaa. Mittausohjelman havaittiin tallentavan ja lisäävän offline -tilassa tehtävät mittakärjen asennonvaihdot siihen kohtaan ohjelmaa, jossa kursori oli asentoa vaihdettaessa. Ohjelma tarkistettiin simuloinnin avulla, ja havaittiin, että mittakärki ei törmää kappaleeseen ohjelman aikana, ja asennonvaihdot tapahtuvat oikein.

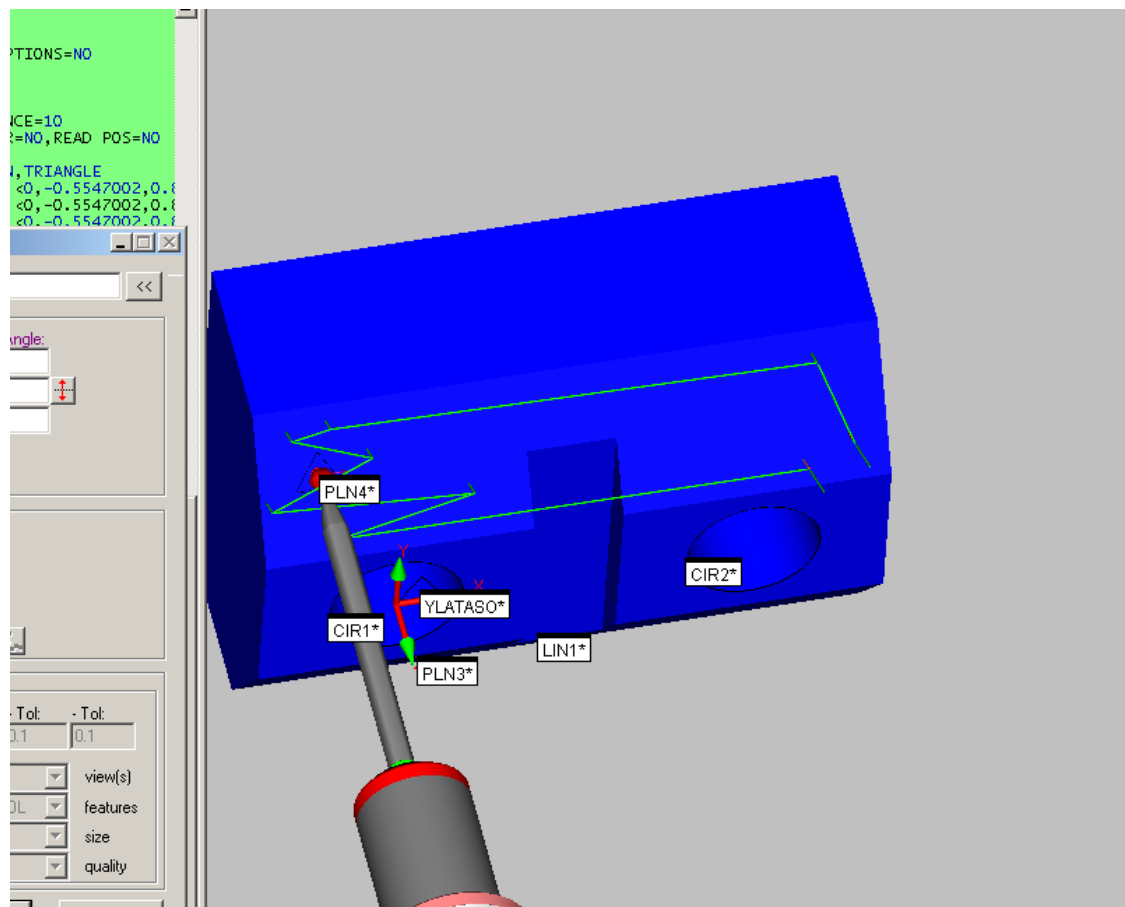
Mittausohjelma avattiin online-tilassa, ja automaattimittaus käynnistettiin. Mittauskone suoritti tarvittavat liikkeet ja mittakärjen asennonvaihdot samalla tavalla kuin simulointi oli osoittanut. Virheitä ei tapahtunut mittauksien tai siirtymien aikana.

6.5 Automaattinen muodontunnistus

PC-DMIS -ohjelmiston havaittiin sisältävän aputoimintoja piirteiden tunnistamiseen. Tällaisia aputoimintoja olivat esimerkiksi Auto Circle, Auto Cylinder ja Auto Plane. Kyseisten toimintojen avulla ympyrämäiset, sylinterimäiset ja tasomaiset muodot oli mahdollista tunnistaa yhdellä virtuaalisen mittakärjen kosketuksella. Esimerkiksi reikien mittauksessa tarvittiin vain yksi mittakärjen kosketus reiän seinämään, jolloin ohjelmisto tunnistasi muodon reiäksi tai sylinteriksi riippuen siitä, käytettiinkö Auto Circle vai Auto Cylinder -toimintoa.

Jos automaattisesti tunnistettujen piirteiden mittaus oli määritetty osaksi automaattimittausohjelmaa, ohjelmisto asetti itse oletusarvot tarvittavien mittakärjen kosketusten määrälle. Tätä oletusarvoa, samoin kuin kosketuskohtia pystyi tarvittaessa muuttamaan.

Määrittäessä tasomaisia pintoja Auto Plane -toiminnon avulla oli otettava yksi kosketus mittakärjellä tason pintaan. Tällöin ohjelmisto määritteli itse, mistä kohdista mittakärki ottaa kosketukset tasoon mittausohjelmassa. Kosketuskohdat ja kosketuksien määrä pystytään tässäkin tapauksessa myös määrittämään itse (kuva 20).



Kuva 20. Tason kosketuspisteiden paikan määrittäminen. Mittakärjen vieressä oleva ohut kuvio kuvaa mittakärjen liikeratoja tasoa mitattaessa.

Automaattisen muotojen tunnistuksen havaittiin olevan hyödyllinen toiminto etenkin reikien mittauksessa. Tällöin CAD-mallia ei tarvitse pyöritellä vaivalloisesti tietokoneen ruudulla kosketuspisteitä määrittäessä, vaan tarvitsee ottaa vain yksi kosketus reiän sisäpintaan. Etenkin pienten reikien kohdalla mittausohjelman laatiminen olisi vaikeaa ilman automaattista muotojen tunnistusta. Tasomaisten pintojen kohdalla vastaavaa hyötyä ei havaittu synty-

vän. Tasojen mittaukset on helppo määrittää myös virtuaalisen mittakärjen avulla, eikä automaattinen tason tunnistus säästä merkittävästi ohjelmointiaikaa tai helpota ohjelmointia.

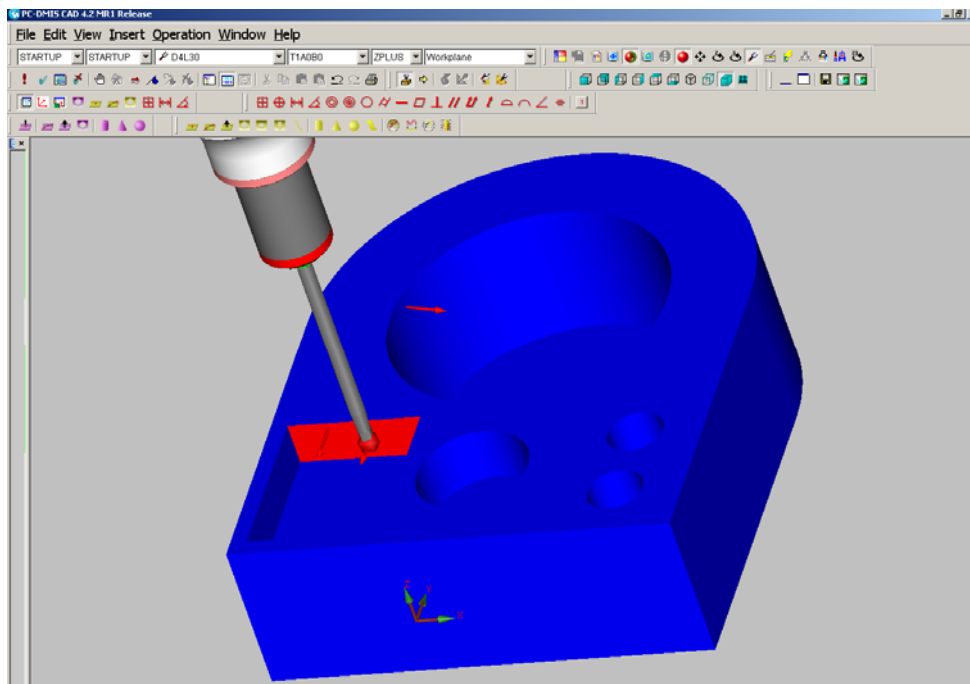
6.6 CAD-tiedostoformaattien vertailu

Tutkimuksessa suoritettiin vertailua eri CAD-tiedostomuotojen soveltuvuudesta ohjelmointiin. Vertailtavaksi otettiin jo aiemmin käytetyn IGES-tiedostoformaatin ohella STEP ja STL-tiedostoformaattit. Muita PC-DMIS -ohjelmiston tukemia tiedostoformaatteja ei vertailtu, koska käytössä olleet 3D-mallinnusohjelmistot, Autodesk Inventor ja PTC Pro/Engineer, eivät tukeneet niitä. Vertailussa käytetty CAD-malli mallinnettiin Autodesk Inventor -ohjelmistolla.

6.6.1 IGES-tiedostoformaatti

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) on neutraali tiedostoformaatti, joka soveltuu CAD-mallien siirtoon eri ohjelmistojen välillä. IGES:n kehitystyö aloitettiin jo 1970-luvulla, ja virallisesti formaatti otettiin käyttöön 1980-luvulla. IGES on hyvin väljästi määritelty formaatti, ja sen takia voi syntyä yhteensopivuusongelmia siirrettäessä tähän muotoon tallennettua CAD-mallia toiseen järjestelmään. Tiedostoformaattia käytetään kuitenkin edelleen laajalti. [3, s. 9.]

PC DMIS lukee Autodesk Inventor -ohjelmistossa IGES-formaattiin tallennetun CAD-mallin IGES ALTERNATE -muodossa. IGES-muodossa lukeminen ja ohjelmaan tuonti ei onnistu. CAD -malli näkyy näytöllä samanlaisena, kuin alkuperäisessä mallinnukseen käytetyssä ohjelmistossa. Kappaleen muotoihin syntyy luonnollisen näköinen varjostuma, joten muodot on helppo erottaa. Mittauspään virtuaalimalli on helppo kohdistaa haluttuihin kohtiin mallia pisteiden opetusta varten. Piirteet värjäytyvät punaisiksi niitä osoitettaessa, mikä edelleen helpottaa mittauspään kohdistamista (kuva 21).



Kuva 21. IGES-formaatissa tallennettu CAD-malli näytöllä. Piirteitä osoitettaessa ne värjättyvät punaisiksi. Värit voidaan myös vaihtaa ohjelmiston asetuksista.

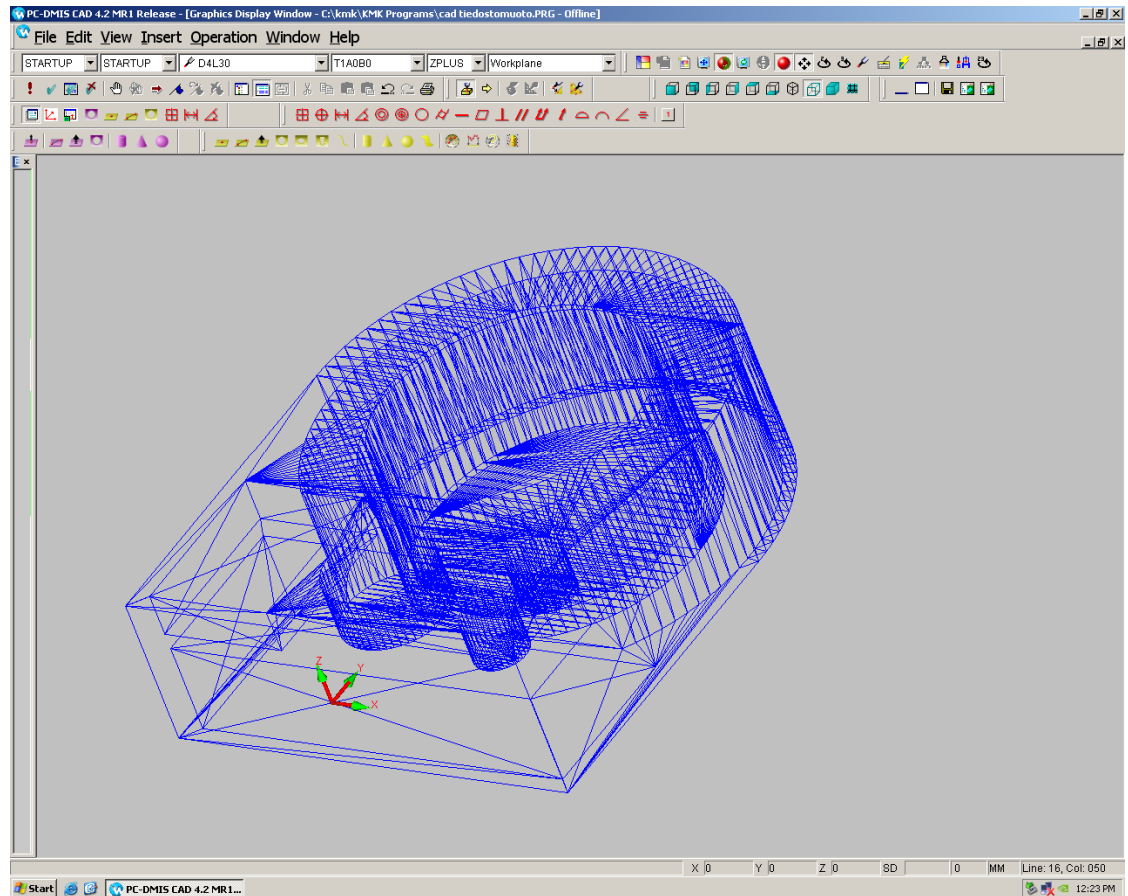
6.6.2 STEP-tiedostoformaatti

STEP on CAD-järjestelmien välisen tiedonsiirron standardi, joka on vähitellen korvaamassa IGES:n. [3.]

STEP-formaattiin tallennetun CAD-tiedoston siirtäminen PC-DMIS -ohjelmistoon tapahtuu normaaliin tapaan Import-komennolla. CAD -malli käyttäytyy ohjelmointivaiheessa täsmälleen samalla tavalla kuin IGES-muotoinen malli. Varjostukset auttavat kappaleen piirteiden hahmottamisessa. Piirteet värjättyvät punaisiksi osoitettaessa niitä virtuaalisella mittapäällä. Ohjelmointi STEP-muotoisen nimellismallin perusteella on vaivatonta.

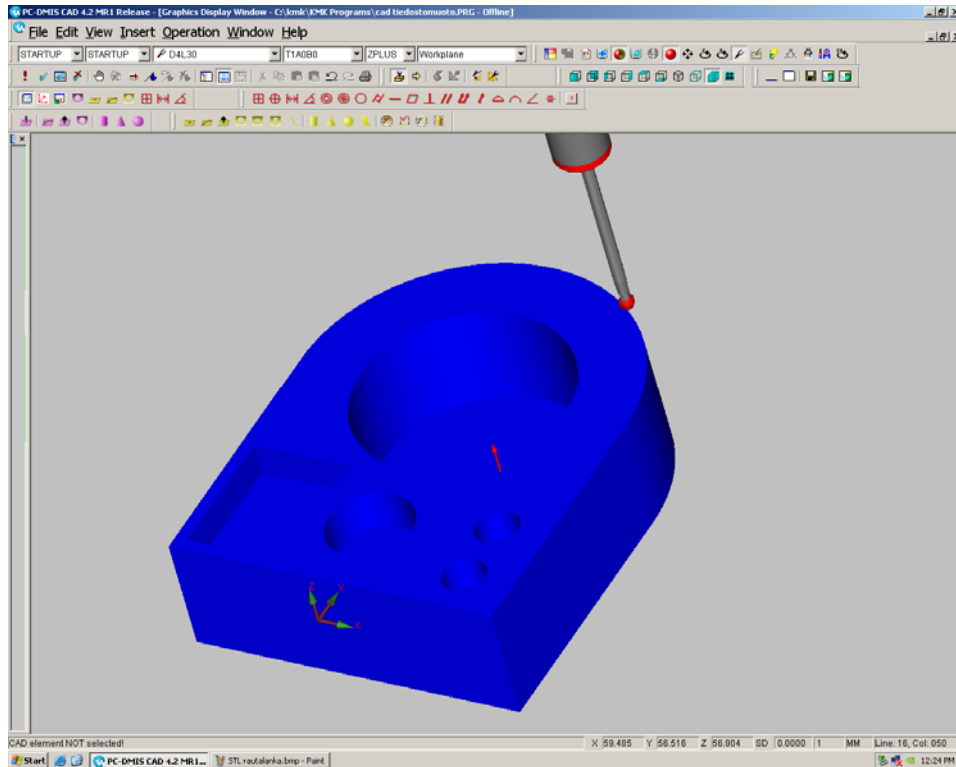
6.6.3 STL-tiedostoformaatti

STL (Stereolithography) on lähinnä 3D-tulostimien käyttämä tiedoformaatti. Erikoispiirteenä on se, että CAD-malli esitetään kolmioverkkorakenteena (kuva 22). [3, s. 10.]



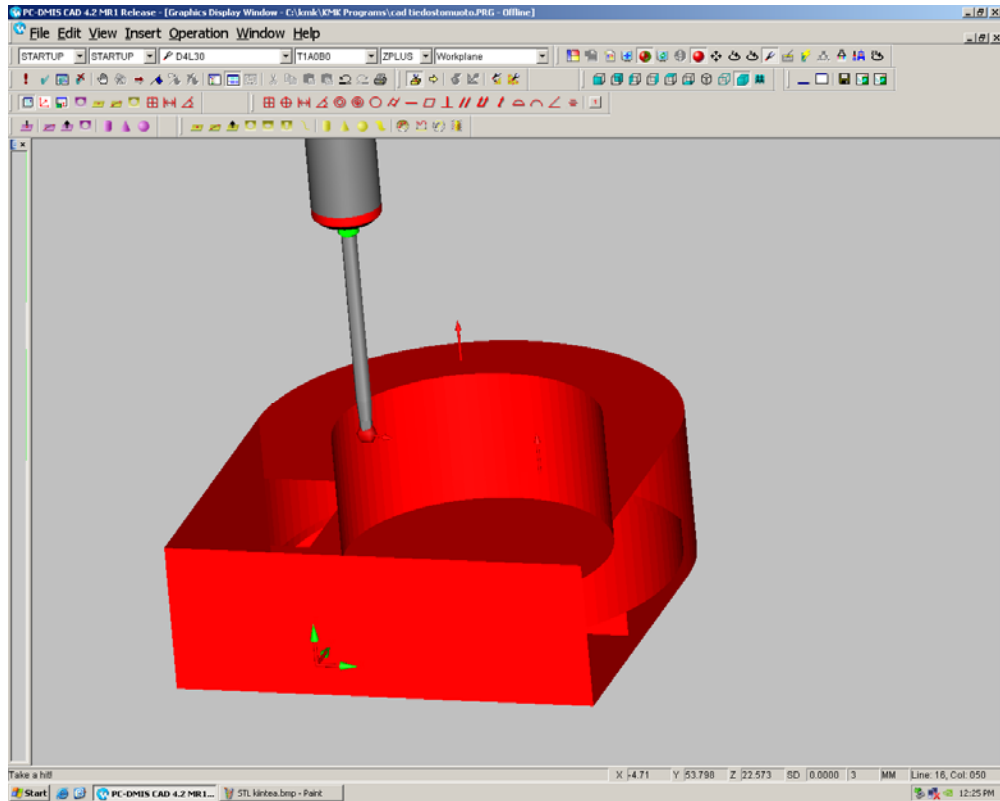
Kuva 22. STL-tiedosto on esitetty näytössä rautalankamallina, jolloin erottuu mallin muodostaminen kolmioverkoista. Rautalankamallista on lähes mahdotonta erottaa syvennyksien reunoja kolmioverkkorakenteen takia, joten rautalankamallia ei ole syytä käyttää ohjelmointiin.

PC-DMIS -ohjelmaan tuotu STL-muodossa tallennettu CAD-malli näyttää ruudulla luonnolliselta, ja piirteet erottuvat normaalisti (kuva 23).



Kuva 23. Ennen pisteiden osoittamista STL-malli näyttää ruudulla luonnolliselta, ja piirteet toistuvat oikein. Varjostukset toimivat, ja syvennyksien reunat ovat helposti nähtävissä. Mallin muodostuminen kolmioverkoista ei ole tässä vaiheessa näkyvää.

Kun mallista yritetään virtuaalisen mittakärjen avulla osoittaa pisteitä, tilanne muuttuu. Malli muuttuu ensimmäisen kosketuksen jälkeen väritään kokonaan punaiseksi ja varjostukset häviävät osittain (kuva 24). Tämän takia ei piirteitä pysty enää erottamaan. Malliin näyttää myös sitä ruudulla käännettäessä syntyvän reikiä, joita siinä ei todellisuudessa ole. STL-tiedostomuoto ei havaintojen mukaan sovellu kovinkaan hyvin CAD-perusteiseen ohjelmointiin.



Kuva 24. Kun STL-mallista osoitetaan pisteitä, malli muuttuu kauttaaltaan punaiseksi ja piirteet toistuvat väärin. Varjostukset eivät myöskään toimi oikein, eikä syvennysten reunoja pystytä erottamaan. Mittakärjen virtuaalimalli on lähes mahdotonta kohdistaa haluttuihin kohtiin. Mittausohjelman luominen STL-mallin perusteella on vaikeaa.

6.7 Ohjelmointitapojen nopeusvertailu

Tutkimustyössä suoritettiin myös ohjelmointinopeuden vertailu. Vertailussa tutkittiin, onko CAD-mallin pohjautuvalla ohjelmoinnilla ja opetusohjelmoinnilla merkittävää eroa ohjelmointiin kuluvan ajan suhteen. Ohjelmointiin kuluvaksi ajaksi määriteltiin aika, jolloin mittausohjelmaan kuuluvat liikkeet, mittaukset, toleranssit ja nimellisarvot on määritetty, ja automaattimittaus on valmis käynnistettäväksi.

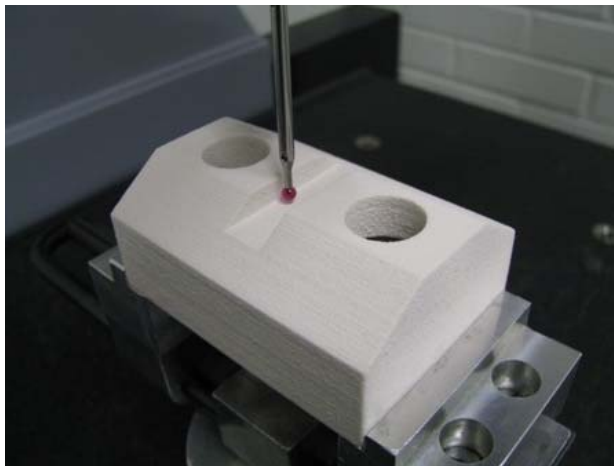
Vertailussa laadittiin automaattimittausohjelma kolmelle mitattavalle kappaleelle molemmilla ohjelmointitavoilla. Ohjelmoijia oli vain yksi, joten ohjelmointi suoritettiin jokaisessa tapauksessa kolmeen kertaan riittävän laajan otoksen aikaansaamiseksi. Ensimmäinen mitattava

kappale (kuva 25) oli metallilevy, johon oli jyrsitty syvennyksiä ja reikiä jyrskoneella. Laadittavassa mittausohjelmassa mitattiin reikien ja syvennysten paikoitus.



Kuva 25. Testikappale 1.

Toinen mitattava kappale oli 3D-tulostimella tulostettu kipsikappale (kuva 26). Mittausohjelmassa mitattiin reikien ja keskellä olevan uran paikoitus, uran leveys, uran syvyys, reikien välinen etäisyys ja viisteiden kulma yläpintaan nähden.



Kuva 26. Testikappale 2.

Kolmas mitattava kappale (kuva 27) oli ensimmäisen tavoin metallilevy, johon oli jyrskoneella jyrsitty 2 samankeskeistä syvennystä ja porattu 9 reikää. Mittausohjelmassa mitattiin syvennysten ja reikien sijainti sekä halkaisija.



Kuva 27. Testikappale 3.

Ensimmäiseksi suoritettiin ohjelmointiaikojen mittaus testikappaleelle 1. Mittaustulokset ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Ohjelmointiajat sekunteina kappaleelle 1.

Mittaussuoritus	Ohjelmointiaika (s)/Opetus	Ohjelmointiaika (s)/CAD
1	357	228
2	340	220
3	332	211

Toisessa vaiheessa mitattiin ohjelmointiajat testikappaleelle 2. Tulokset ovat taulukossa 3.

Taulukko 3. Ohjelmointiajat sekunteina kappaleelle 2.

Mittaussuoritus	Ohjelmointiaika (s)/Opetus	Ohjelmointiaika (s)/CAD
1	496 s	318 s
2	367 s	270 s
3	359 s	267 s

Lopuksi mitattiin testikappaleen 3 ohjelmointiin kuluvat ajat. Tulokset taulukossa 4.

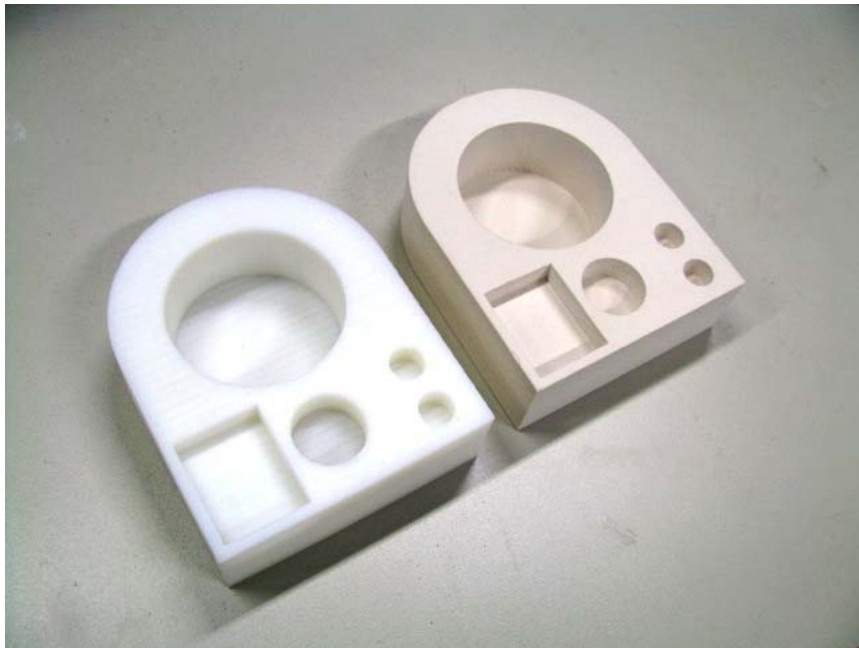
Taulukko 4. Ohjelmointiajat sekunteina kappaleelle 3.

Mittaussuoritus	Ohjelmointiaika (s)/Opetus	Ohjelmointiaika (s)/CAD
1	457 s	296 s
2	401 s	260 s
3	396 s	233 s

6.8 CAD-perusteinen ohjelmointi käytännössä

Tesa-koordinaattimittauskoneella suoritettiin tulostustarkkuuden testaus Kajaanin ammatti-
korkeakoulun kahdelle 3D-tulostimelle. Toinen testattava tulostin oli ZPrinter 450, joka
käyttää tulosteiden valmistusmateriaalina kipsijauhetta. Toinen testattava tulostin oli muovია
valmistusmateriaalina käyttävä Dimension SST 768. Tulostustarkkuuden testaamisessa käy-
tettiin samaa CAD-mallia, jonka avulla vertailtiin tiedostoformaattien toimivuutta kappalees-
sa 6.5. Molemmat 3D-tulostimet tulostivat mallista fyysisen kappaleen (kuva 28).

Saman mallin avulla laadittiin mittauskoneelle automaattimittausohjelma, jolla tulostustark-
kuus selvitettiin fyysisten kappaleiden mittoja tutkimalla. CAD-mallin avulla luotu automaat-
timittausohjelma oli valmis ennen kuin kumpikaan 3D-tulostimista oli saanut fyysistä kappala-
letta valmiiksi. Toleranssiarvoiksi asetettiin 3D-tulostimien tulostustarkkuuden arvot. Poik-
keamaa sallittiin siis molempiin suuntiin tulostustarkkuuden verran. Kipsitulostimessa käytet-
tiin tulostustarkkuutta 0.1 mm ja muovitulostimessa 0.25 mm.

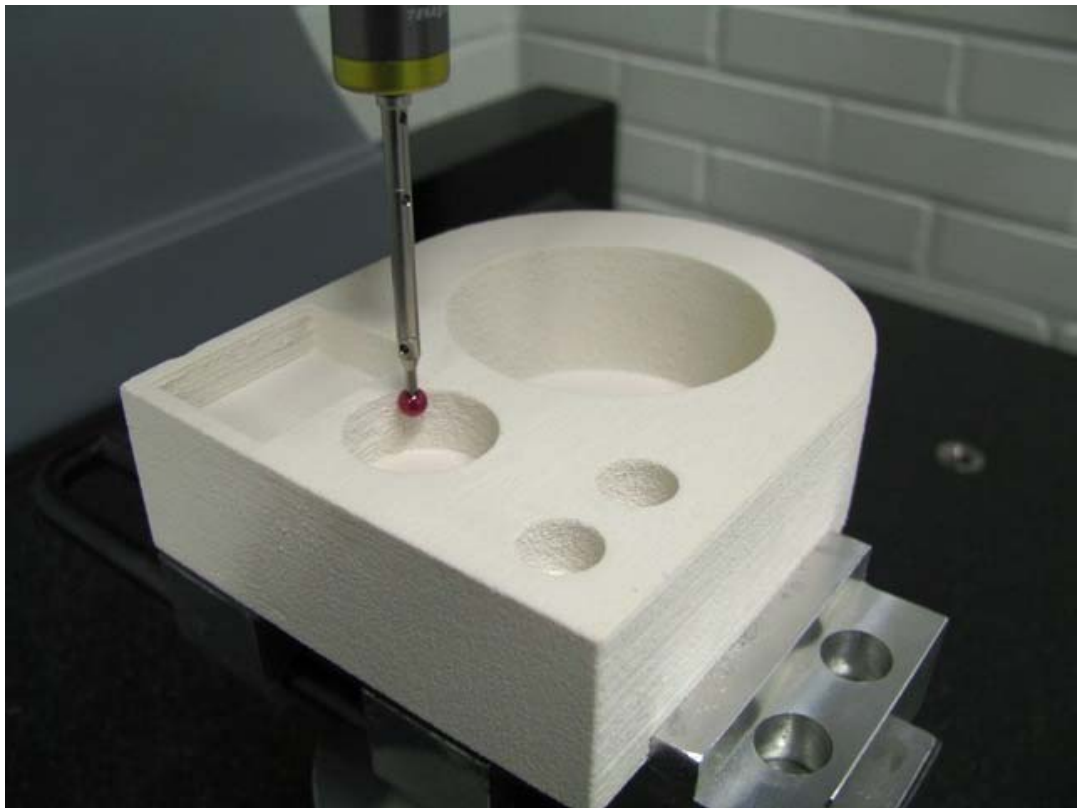


Kuva 28. Vasemmalla muovitulostimella ja oikealla kipsitulostimella valmistettu kappale tu-
lostustarkkuuden testaamista varten.

Mittausohjelmassa mitattaviksi arvoiksi määritettiin kappaleen leveys, päätykaaren säde ja
sijainti, 20 mm reiän todellinen halkaisija, syvyys ja sijainti, suorakaiteen pituus, leveys ja sy-
vyys sekä 15 mm reikien todellinen halkaisija sekä etäisyys toisistaan.

3D-kipsitulostin

Ensimmäiseksi tutkittiin ZPrinter 450 -kipsitulostimella valmistettua kappaletta (kuva 29). Kipsitulostin valmistaa pikamallit kovettamalla kipsijauhetta tarvittavista kohdista. Mittauskone kykeni suorittamaan kaikki tarvittavat mittaukset ilman törmäyksiä, joten CAD-mallin perusteella laadittu mittausohjelma oli onnistunut. Mittausraportista selvisi, etteivät kappaleen mitat olleet kaikilta osin tulostustarkkuuden määrittämien toleranssien sisällä (kuva 30).



Kuva 29. Mittauskone mittaamassa 20 mm reiän todellista halkaisijaa kipsimallista.

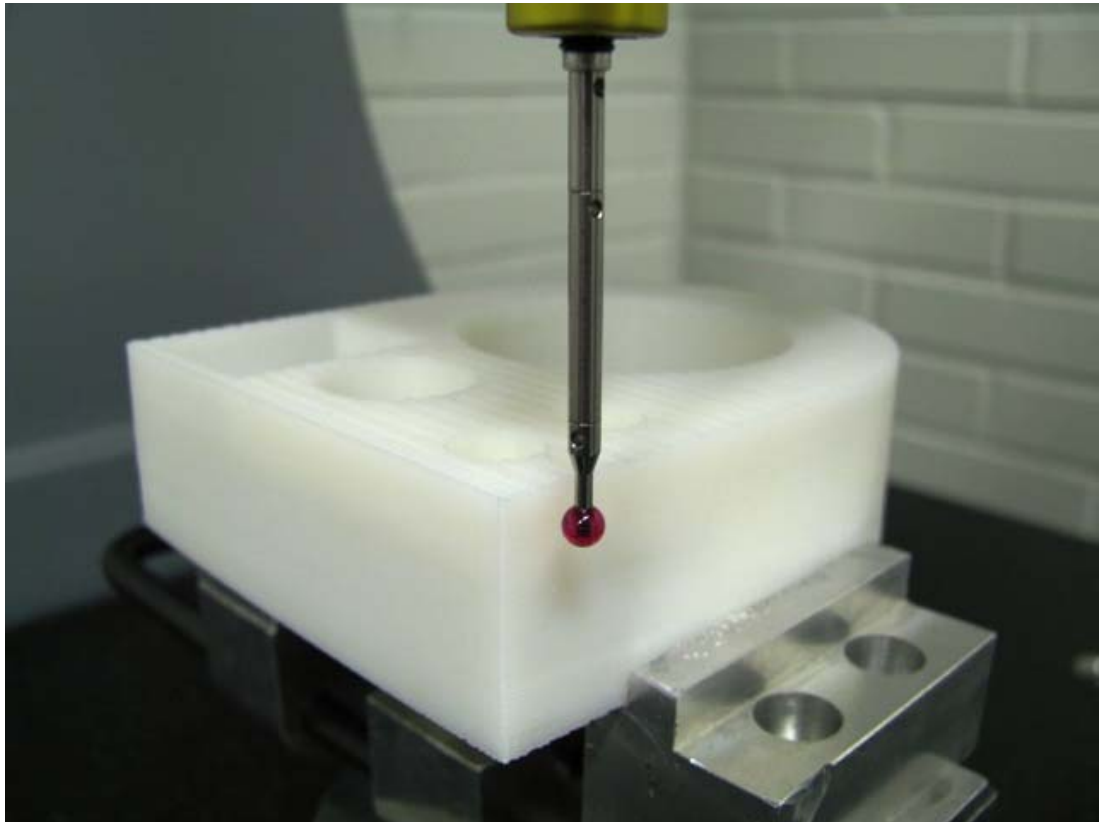
podmis		PART NAME : 3d kipsitulostim1				February 18, 2009	13:55
		REVNUMBER :		SER NUMBER :		STATS COUNT : 1	
⊕	MM	20 MM REIAN PAIKKA - 20 MM REIKA					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
X		0.000	0.372	0.100	-0.100	0.372	0.272
Y		-42.000	-42.126	0.100	-0.100	-0.126	0.026
D		20.000	19.543	0.100	-0.100	-0.457	0.357
⊕	MM	ALEMMAN 15 MM REIAN PAIKKA - ALEMPI 15 MM REIKA					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
X		27.695	28.178	0.100	-0.100	0.484	0.384
Y		-50.000	-49.792	0.100	-0.100	0.208	0.108
D		10.000	9.428	0.100	-0.100	-0.572	0.472
⊕	MM	YLEMMAN 15 MM REIAN PAIKKA - YLEMPI 15 MM REIKA					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
X		27.695	28.030	0.100	-0.100	0.335	0.235
Y		-35.000	-34.775	0.100	-0.100	0.225	0.125
D		10.000	9.558	0.100	-0.100	-0.442	0.342
⊕	MM	ISON REIAN PAIKKA - ISO REIKA					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
X		0.000	0.040	0.100	-0.100	0.040	0.000
Y		0.000	-0.002	0.100	-0.100	-0.002	0.000
D		50.000	49.753	0.100	-0.100	-0.247	0.147
⊕	MM	PAATYKAAREN PAIKKA - PAATYKAARI					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
X		0.000	0.079	0.100	-0.100	0.079	0.000
Y		0.000	0.321	0.100	-0.100	0.321	0.221
D		80.000	79.873	0.100	-0.100	-0.127	0.027
H		12.932	12.920	0.100	-0.100	-0.011	0.000
↔	MM	LEVEYS - OIKEA KYLKI TO VASEN KYLKI					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		80.000	80.070	0.100	-0.100	0.070	0.000
↔	MM	50 MM REIAN SYVYYS - ISON REIAN POHJA TO PLN1					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		25.000	24.820	0.100	-0.100	-0.180	0.080
↔	MM	SUORAK.PITUUS - SUORAK.YLA TO SUORAK.ALA					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		30.008	29.487	0.100	-0.100	-0.521	0.421
↔	MM	SUORAKAITTEEN SYVYYS - SUORAK.POHJA TO PLN1					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		8.000	7.827	0.100	-0.100	-0.173	0.073
↔	MM	20 MM REIAN SYVYYS - 20 MM REIAN POHJA TO PLN1					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		10.000	9.797	0.100	-0.100	-0.203	0.103
↔	MM	ALEMMAN 15 MM REIAN SYVYYS - ALEMMAN 15 MM REIAN POHJA TO PLN1					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		8.000	7.891	0.100	-0.100	-0.109	0.009
↔	MM	YLEMMAN 15 MM REIAN SYVYYS - PLN1 TO YLEMMAN 15 MM REIAN POHJA					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		0.000	8.432	0.100	-0.100	8.432	8.332
↔	MM	15 MM REIKIEN VALINEN ETAISYYS - YLEMPI 15 MM REIKA TO ALEMPI 15 MM REIKA					
AX		NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL
M		15.000	15.018	0.100	-0.100	0.018	0.000

Kuva 30. Mittausraportti kipsitulostimella valmistetusta kappaleesta.

3D-muovitulostin

Seuraavaksi samat mittausmenpiteet suoritettiin Dimension SST -muovitulostimella valmistetulle kappaleelle. Laite käyttää pikamallien valmistusmateriaalina ABS-muovia. Laite pursottaa muovia kerros kerrokselta tarvittaviin paikkoihin, ja käyttää tarvittaessa tukimateriaalia muovin tukemiseen kovettumisvaiheessa. Tukimateriaali liuotetaan pois valmistuksen päätyttyä. Tulostustarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa 0,01 tuumaa, eli n.0,254 mm. Tämä on myös yhden muovikerroksen paksuus.

Mittauksissa käytettiin samaa, CAD-mallin perusteella luotua automaattimittausohjelmaa kuin kipsitulostimen tarkkuutta tutkittaessa. Mittausohjelma toimi tälläkin kertaa odotusten mukaisesti (kuva 31) eikä törmäyksiä tapahtunut. Mittausraportti (kuva 32) osoitti, että kappaleesta mitatut mitat olivat suurimalta osaltaan muovitulostimen tulostustarkkuuden määrittämien toleranssien sisäpuolella. Ainoastaan 20 mm reiän ja toisen 15 mm reiän paikoitus oli hieman toleranssien ulkopuolella.



Kuva 31. Mittauskone mittaamassa muovitulostimella valmistettua kappaletta.

po:dmis		PART NAME : 3d Nppäulosin1				February 18, 2008	13:36
		REVNUMBER :	SER NUMBER :	STATS COUNT : 1			
⊕	MM	20 MM REIAN PAIKKA - 20 MM REIKA					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
X	0.000	0.286	0.250	-0.250	0.286	0.036	
Y	-42.000	-42.047	0.250	-0.250	-0.047	0.000	
D	20.000	19.917	0.250	-0.250	-0.083	0.000	
⊕	MM	ALEMMAN 15 MM REIAN PAIKKA - ALEMPI 15 MM REIKA					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
X	27.695	27.998	0.250	-0.250	0.303	0.053	
Y	-50.000	-49.985	0.250	-0.250	0.015	0.000	
D	10.000	9.915	0.250	-0.250	-0.085	0.000	
⊕	MM	YLEMMAN 15 MM REIAN PAIKKA - YLEMPI 15 MM REIKA					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
X	27.695	27.864	0.250	-0.250	0.169	0.000	
Y	-35.000	-34.938	0.250	-0.250	0.062	0.000	
D	10.000	9.912	0.250	-0.250	-0.088	0.000	
⊕	MM	ISON REIAN PAIKKA - ISO REIKA					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
X	0.000	-0.009	0.250	-0.250	-0.009	0.000	
Y	0.000	-0.014	0.250	-0.250	-0.014	0.000	
D	50.000	49.899	0.250	-0.250	-0.101	0.000	
⊕	MM	PAATYKAAREN PAIKKA - PAATYKAARI					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
X	0.000	-0.156	0.250	-0.250	-0.156	0.000	
Y	0.000	0.084	0.250	-0.250	0.084	0.000	
D	80.000	79.882	0.250	-0.250	-0.118	0.000	
H	12.932	12.924	0.250	-0.250	-0.007	0.000	
↔	MM	LEVEYS - OIKEA KYLKI TO VASEN KYLKI					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	80.000	79.754	0.250	-0.250	-0.246	0.000	
↔	MM	50 MM REIAN SYVYYS - ISON REIAN POHJA TO YLATASO					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	25.000	25.074	0.250	-0.250	0.074	0.000	
↔	MM	SUORAKAITEEN SYVYYS - SUORAK.POHJA TO YLATASO					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	8.000	7.907	0.250	-0.250	-0.093	0.000	
↔	MM	20 MM REIAN SYVYYS - 20 MM REIAN POHJA TO YLATASO					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	10.000	10.055	0.250	-0.250	0.055	0.000	
↔	MM	ALEMMAN 15 MM REIAN SYVYYS - ALEMPI 15 MM REIAN POHJA TO YLATASO					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	8.000	8.166	0.250	-0.250	0.166	0.000	
↔	MM	YLEMMAN 15 MM REIAN SYVYYS - YLEMMAN 15 MM REIAN POHJA TO YLATASO					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	8.000	8.088	0.250	-0.250	0.088	0.000	
↔	MM	15 MM REIKIEN VALINEN ETAISYYS - YLEMPI 15 MM REIKA TO ALEMPI 15 MM REIKA					
AX	NOMINAL	MEAS	+TOL	-TOL	DEV	OUTTOL	
M	15.000	15.044	0.250	-0.250	0.044	0.000	

Kuva 32. Mittausraportti muovitulostimella valmistetusta kappaleesta.

7 LOPPUTULOKSET

7.1 Toteuttamismahdollisuudet

Automaattimittausohjelman laatiminen CAD-nimellismallia apuna käyttäen havaittiin mahdolliseksi PC-DMIS 4.2 Online -ohjelmistossa. Ohjelmisto kykenee ottamaan vastaan tukemiensa tiedostomuotojen mukaiset CAD-mallit, ja näiden sekä virtuaalisen mittauspään ja mittakärjen avulla voidaan suorittaa ohjelmointi. Mittausohjelma pystytään tarkastamaan ennen varsinaista mittausta simuloinnin avulla. Mittauspään virtuaalimalli suorittaa tällöin ohjelmaan määritetyt liikkeet ja mittaukset ruudulla mitattavan kappaleen CAD-mallille. Tällä tavalla voidaan nähdä ohjelmassa mahdollisesti olevat virheet, ennen kuin ne aiheuttaisivat vahinkoa mittauskoneelle.

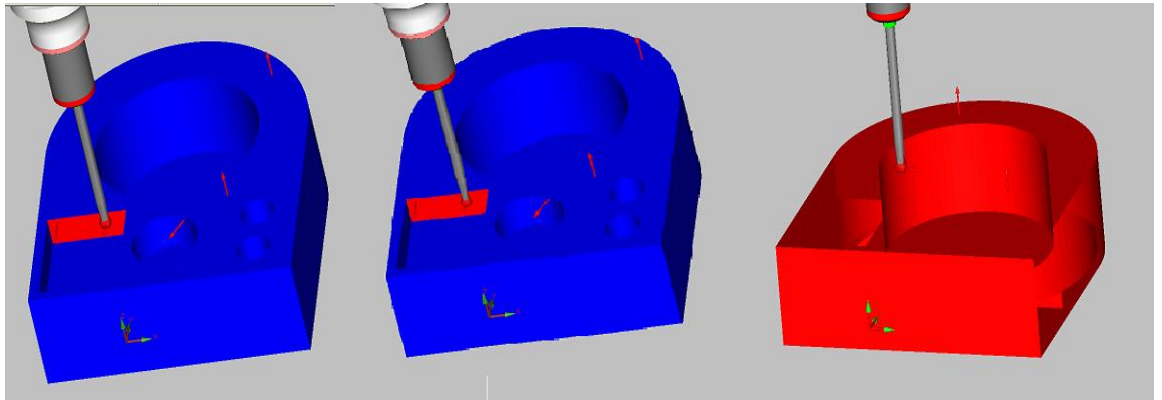
CAD-mallin hyödyntämismahdollisuudet selvitettiin kokeilemalla. Tukena oli englanninkielinen ohje, jossa ei kuitenkaan selvitetty CAD-perusteiseen ohjelmointiin liittyviä asioita kovinkaan selkeästi. Ohjeesta ei esimerkiksi useinkaan selvinnyt, oliko ohje suunnattu ohjelmiston Online- vai Offline-versioon. Lisäksi saman aihepiirin asiat oli ripoteltu erilleen. Ohjeesta saatiin kuitenkin monia hyödyllisiä tietoja, joita ilman tutkimustyö ei ehkä olisi onnistunut.

7.2 Käyttökelpoiset tiedostomuodot

Erilaisten PC-DMIS -ohjelmiston tukemien CAD-tiedostomuotojen käytettävyydestä ei voitu järjestää kovinkaan laajaa vertailua, koska käytettävissä olevat 3D-mallinnusohjelmistot (PTC Pro/Engineer ja Autodesk Inventor) tukivat näistä vain kolmea tyyppiä. Työssä vertailtiin IGES, STEP ja STL-formaatteihin tallennettujen CAD-mallien kelpoisuutta ohjelmointiin.

IGES ja STEP-formaatteihin tallennettujen CAD-mallien perusteella ohjelmointi oli helppoa suorittaa. Kappaleen piirteet toistuivat oikein, ja virtuaalinen mittauskärki oli helppo kohdistaa oikeisiin kohteisiin. STL-formaattiin tallennetun mallin perusteella ohjelmointi oli sitä vastoin lähes mahdotonta, koska piirteet toistuivat väärin. Esimerkiksi mallin pinnalla olevi-

en reikien ja muiden syvennysten reunoja ei voinut erottaa kunnolla, ja tämän takia virtuaalisesta mittakärkeä ei voinut kohdistaa oikeisiin paikkoihin. Mallin pinnalle näytti myös syntyvän sellaisia reikiä, joita siinä ei todellisuudessa ollut, ja malli muuttui joiltakin osin läpinäkyväksi. Piirteiden vääränlainen toistuminen johtuu mahdollisesti STL-mallin kolmioverkkorakenteesta. Eri tallennusmuotojen eroja havainnollistetaan kuvassa 33.



Kuva 33. IGES, STEP- ja STL-muodossa tallennetut CAD-mallit. Piirteitä osoitettaessa STL-muotoisen mallin piirteet toistuvat väärin, mikä vaikeuttaa ohjelmointia. Muut tallennusmuodot ovat käyttökelpoisempia ohjelmointiin.

IGES ja STEP todettiin käyttökelpoisiksi tallennusmuodoiksi CAD-perusteista ohjelmointia ajatellen. Piirteet erottuvat selkeästi varjostusten avulla. PC-DMIS -ohjelmistossa on myös mahdollista muuttaa virtuaalista valaistusta, jolloin piirteet saadaan erottumaan vieläkin paremmin.

STL-tallennusmuoto havaittiin ainakin käytetyssä ohjelmistossa melko käyttökelvottomaksi ohjelmointiin. Ohjelmointivirheet ovat mahdollisia ja todennäköisiäkin, koska esimerkiksi reikien reunoja on lähes mahdotonta erottaa kappaleen piirteitä osoitettaessa. Virtuaalisen valaistuksen säätely ei auta asiaa.

7.3 Ohjelmoinnin suoritus

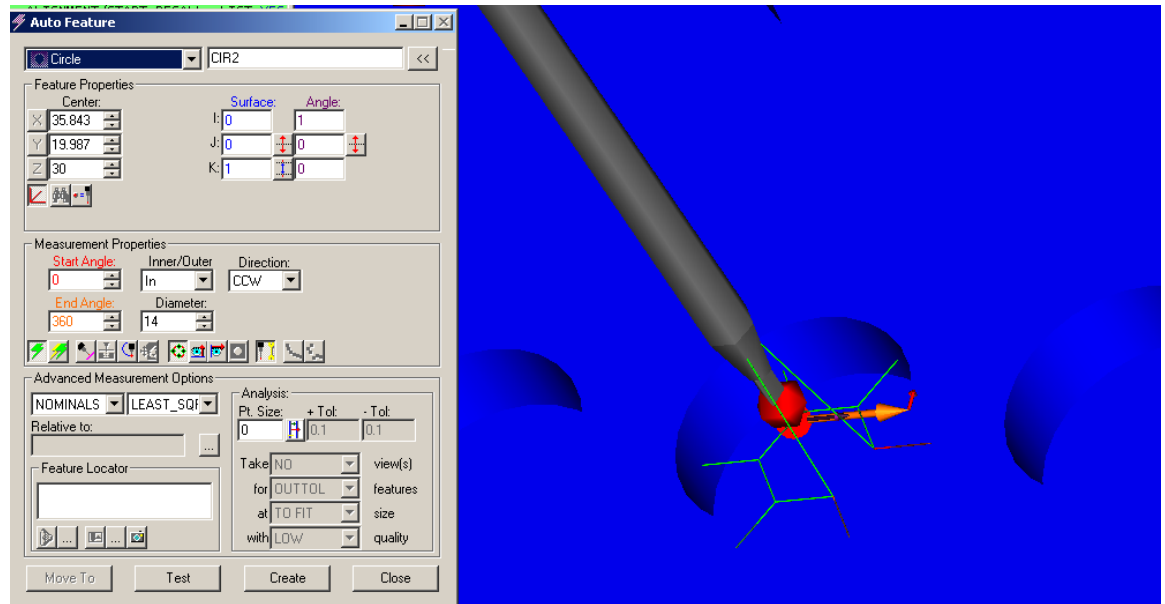
Tutkimustyön aikana havaittiin, että PC-DMIS 4.2 Online -ohjelmisto ei kykene toimimaan, mikäli fyysinen mittauskone ei ole käynnissä. Tässä tapauksessa asialla ei ole juurikaan merkitystä, koska ohjelmisto on asennettu vain yhteen, Tesa-mittauskoneen yhteydessä olevaan

tietokoneeseen. Mikäli etäohjelmoinnin käyttö olisi tarpeellista, tulisi ohjelmointiin käytettävään tietokoneisiin hankkia saman ohjelmiston sellainen versio, joka toimii myös ilman fyysistä mittauskonetta. Luultavasti PC-DMIS -ohjelmiston Online- ja Offline-versioilla ei ole juurikaan muuta eroa, kuin käytettävä ohjelmointitapa.

Mitattavan kappaleen CAD-malli on tärkeä apuväline laadittaessa automaattimittausohjelmaa etäohjelmointina [1, s. 192]. CAD-mallin hyödyntäminen havaittiin kuitenkin mahdolliseksi myös fyysisen mittauskoneen yhteydessä tapahtuvassa ohjelmoinnissa. Mittausohjelma laaditaan ottamalla ohjelmointiin käytettävän tietokoneen ruudulla näkyvällä virtuaalisella mittakärjellä kosketuksia mitattavan kappaleen virtuaalimallin haluttuihin pisteisiin.

Joissakin tapauksissa tämä on hidasta. Esimerkiksi reikien halkaisijaa määritettäessä ohjelmisto ei välttämättä tunnista reikiä, mikäli virtuaalisella mittakärjellä otetut kosketukset eivät ole osuneet reiän sisäpinnalla riittävän lähelle reiän yläreunaa. Mitattavan kappaleen virtuaalimallia joudutaan myös vaivalloisesti pyörittelemään eri asentoihin yritettäessä osua mittakärjellä oikeisiin kohtiin. Jotta piirteet voitaisiin tunnistaa, niihin on otettava useita kosketuksia. Tähän on kuitenkin apukeino, automaattinen piirteiden tunnistus.

Automaattisen piirteiden tunnistuksen avulla esimerkiksi tasot, reiät, ja lieriömäiset muodot voidaan tunnistaa yhdellä virtuaalisen mittakärjen kosketuksella. Suurin hyöty tästä aputoiminnosta on reikiä (kuva 34) ja lieriömäisiä pintoja tunnistettaessa, kyseisten tehtävien helppouudessa ja nopeutuessa huomattavasti. Ohjelmisto päättelee itse otettavien kosketusten määrän ja kosketuskohdat ja näyttää piirteen mittaukset simuloituina mittakärjen liikkeinä ruudulla. Kosketusten määrää, kosketuskohtia ja muitakin asetuksia voidaan myös muokata.



Kuva 34. Automaattinen piirteen tunnistus. Vihreät viivat kuvaavat mittakärjen liikeratoja mittauksen aikana.

Automaattinen piirteiden tunnistus havaittiin toimivaksi järjestelmäksi. Automaattimittausohjelmat, joissa järjestelmää oli hyödynnetty, toimivat moitteettomasti. Automaattista piirteiden tunnistusta ei voi käyttää mittausohjelmiston online-tilassa. Tämä on yksi tärkeä syy käyttää ohjelmiston offline-tilaa käytettäessä CAD-kuvaa nimellismallina.

Jonkin verran ongelmia CAD-perusteisessa ohjelmoinnissa aiheutti aluksi geometrinen oikaisu, eli mittauskoneen ja mittakappaleen koordinaatistojen yhdistäminen. Ilman geometrinen oikaisua mittauskone ei kykene mittaamaan oikein kappaletta, joka ei ole mittauspöydällä suorassa kaikkien koordinaattiakselien suunnassa (kuva 35). Geometrinen oikaisu toimii kuitenkin CAD-perusteisessa ohjelmoinnissa samalla tavalla kuin opetusohjelmoinnissakin. Kappaleesta osoitetaan ennen automaattimittausohjelman aloittamista piirteet, jotka määräävät kappaleen sijainnin yksiselitteisesti. Tällöin mittauskone kääntää omaa koordinaatistoaan yhdistääkseen sen kappaleen koordinaatistoon. Ohjelmisto ymmärtää CAD-mallin samaksi kuin mitattavan kappaleen, joten automaattimittausohjelmaa käynnistettäessä ohjelmisto pyytää osoittamaan fyysisestä kappaleesta samat sijainnin määräävät piirteet, jotka ohjelmoitaessa on osoitettu mallista.



Kuva 35. Geometrisen oikaisun avulla näinkin vinoon mittauspöydälle sijoitettu kappale voidaan mitata oikein.

Koska CAD-perusteinen ohjelmointi suoritetaan PC-DMIS -ohjelmiston offline-tilassa, on mittausohjelma avattava uudelleen online-tilassa ennen varsinaisia mittauksia. Tämä toimenpide ei kuitenkaan vie aikaa muutamia sekunteja enempää, joten se ei merkittävästi hidasta ohjelmointia.

Mittausohjelman tarkistaminen simuloinnin avulla tapahtuu käynnistämällä automaattimittausohjelma ohjelmiston ollessa offline-tilassa. Mittausanturin ja mittakärjen virtuaalimallit suorittavat tällöin mittaukset simuloituna tietokoneen ruudulla. Simuloinnin avulla näkee helposti, mikäli ohjelmassa on pahoja virheitä. Jos virtuaalinen mittakärki näyttää esimerkiksi törmäävän CAD-malliin, on lähes varmaa että törmäys tapahtuisi myös todellisessa mittauksessa. Simulointi havaittiin mahdolliseksi myös opetusohjelmoinnilla luodulle mittausohjelmalle, mikäli mittausohjelma käynnistetään offline-tilassa. Ilman CAD-mallia simulointi ei kuitenkaan anna kovinkaan selkeää kuvaa ohjelman toimivuudesta.

Törmäyksiä estävien välipisteiden opettaminen fyysisen mittauskoneen avulla ei onnistu ohjelmiston ollessa offline-tilassa. Välipisteet voidaan lisätä ohjelmaan siirtämällä virtuaalinen mittakärki ruudulla haluttuun kohtaan, ja tallentamalla kyseinen kohta välipisteeksi. Mikäli välipiste haluttaisiin osoittaa opettamalla, olisi mittausohjelma käynnistettävä online-tilassa. Samalla CAD-perusteisen ohjelmoinnin nopeusetu luultavasti häviäisi. Tutkimustyön aikana

välipisteitä ei tarvittu, koska PC-DMIS -ohjelmistossa on myös automaattinen toiminto mittakärjen siirtämiseksi sivu- tai pystysuunnassa ennen siirtymistä toisen piirteen mittaukseen. Siirtoetäisyyttä voidaan muokata tarvittaessa.

7.4 Käytännön kokeet

CAD-perusteista ohjelmointia kokeiltiin käytännössä suorittamalla tarkkuustestaus 3D-tulostimille. Koordinaattimittauskoneelle laadittiin automaattimittausohjelma, jonka avulla tutkittiin tulostimilla valmistettujen kappaleiden mittatarkkuutta. Tässä tapauksessa ohjelmointi CAD-mallin perusteella oli todistetusti nopeampaa kuin opetusohjelmointi, koska mittausohjelmaa laadittaessa kumpikaan 3D-tulostimista ei ollut vielä saanut mitattavaa kappaletta valmiiksi. Mittausohjelman laatiminen opettamalla ei tällöin luonnollisesti ole mahdollista, koska mittakärjellä olisi otettava kosketuksia fyysiseen kappaleeseen.

Automaattimittausohjelman toiminta tarkistettiin simuloinnin avulla, eikä virheitä havaittu. Myös varsinaiset fyysisen kappaleen mittaukset onnistuivat odotusten mukaisesti. Mittakärki ei tehnyt virheliikkeitä. CAD-perusteinen ohjelmointi ja mittausohjelman simulointi todettiin myös käytännön mittaustehtävissä toimivaksi järjestelmäksi.

7.5 Ohjelmointitapojen nopeuserot

Tutkimustyön tärkeä osa oli vertailla opetusohjelmointia ja CAD-malliin pohjautuvaa ohjelmointia mittausohjelman luomiseen kuluvan ajan suhteen. Vertailussa sama testihenkilö suoritti ohjelmoinnin kolmelle mittauskappaleelle, kullekin kolme kertaa molemmilla ohjelmointitavoilla. Testi ei ollut kovinkaan laaja, mutta sen avulla saatiin jonkinlaista käsitystä ohjelmointitapojen nopeuseroista. Mitattujen ohjelmointiaikojen keskiarvot ovat taulukossa 5.

Taulukko 5. Ohjelmointiaikojen keskiarvot sekunteina.

Kappale	Opetusohjelmointi	CAD-perusteinen ohjelmointi
1	343 s	220 s
2	407 s	285 s
3	418 s	263 s

7.6 Etäohjelmointi

Tutkimustyössä havaittiin, että varsinainen etäohjelmointi, eli ohjelmointi ilman fyysistä mittauskoneetta ei ole mahdollista PC-DMIS 4.2 Online -ohjelmistolla. Ohjelmisto on yhteydessä mittauskoneeseen myös offline-tilassa, eikä käynnisty, ellei myös mittauskone ja servomoottorien ohjausyksikkö ole käynnissä ja paineilmahana auki. Ohjelmiston tämä versio on siis suunniteltu lähinnä online-ohjelmointia varten, vaikka sisältääkin samat mahdollisuudet CAD-mallin hyödyntämiseen kuin ohjelmiston Offline-versio. Ohjelmiston etäohjelmointiin suunniteltu versio kykenee toimimaan ilman minkäänlaista yhteyttä fyysiseen mittauskoneeseen [5]. Tämän ohjelmistoversion nimi on PC-DMIS 4.2 Offline.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 CAD-perusteisen ohjelmoinnin käyttökelpoisuus

Mittausohjelman luominen CAD-nimellismallin avulla käyttäen Tesa Micro Hite -koordinaattimittauskonetta ja PC-DMIS 4.2 -ohjelmistoa havaittiin mahdolliseksi, ja kaikin puolin toimivaksi ohjelmointitavaksi. Tutkimustulosten perusteella voidaan jopa ihmetellä, miksi CAD-perusteinen ohjelmointi ja etäohjelmointi ovat harvoin käytettyjä ohjelmointitapoja mittauskoneiden yhteydessä. Ainakin, mikäli mitattavasta kappaleesta on valmiiksi olemassa CAD-malli, kannattaa sitä tutkimustulosten perusteella hyödyntää.

CAD-perusteisen ohjelmoinnin käyttö PC-DMIS -ohjelmistossa ei aseta ohjelmoijalle suurempia taitovaatimuksia kuin opettamalla tapahtuva on-line -ohjelmointi. Itse en ollut ennen tutkimustyön suoritusta juurikaan käyttänyt mittauskonetta, mutta opin molempien ohjelmointitapojen perusteet jo muutaman tunnin harjoittelun aikana. Ei siis voida sanoa, että CAD-perusteisen ohjelmoinnin käyttöönotto vaatisi esimerkiksi ammattitaitoisempien ohjelmoijien palkkaamista teollisuuden yrityksissä, ainakaan mikäli käytetään yhtä kehittynyttä ohjelmistoa. Lyhyehkö koulutus aikaisemmin opetusohjelmointia käyttäneille henkilöille riittäisi.

Ohjelmointivirheet voidaan CAD-perusteisessa ohjelmoinnissa tarkistaa simuloinnin avulla. PC-DMIS -ohjelmiston simulointijärjestelmä suoritti tutkimustyön aikana simuloinnin jokaisella kerralla oikein. Mikäli simuloinnin mukaan ohjelmassa oli virhe, oli ohjelmassa virhe myös todellisuudessa. Mikäli ohjelma taas näytti toimivan halutusti, se myös toimi todellisuudessa halutusti. On tietenkin mahdollista, että laajemmissa mittausohjelmissa simulointi voisi toimia myös virheellisesti, lisäksi kaikkia virtuaalisen mittausanturin virheliikkeitä ei välttämättä voi huomata, koska simulointisuoritus on verraten nopealiikkeinen.

Tutkimustyön aikana tehtyjen havaintojen perusteella voisi kuitenkin väittää, että ainakin PC-DMIS 4.2 -ohjelmistoa käytettäessä mittausohjelman toimivuuden voi simuloinnilla tarkistaa jopa paremmin kuin ajamalla ohjelma fyysisellä mittauskoneella ilman mitattavaa kappaletta. Simuloinnissahan kappaleen 3D-malli on nähtävissä, ja voidaan nähdä mittakärjen

todellisuutta vastaavat liikkeet sen ympärillä. Ajettaessa mittauskonetta ”tyhjänä” ei välttämättä saada yhtä tarkkaa kuvaa ohjelman toimivuudesta.

Tutkimustyön aikana tuli selväksi, että Kajaanin ammattikorkeakoulun protopajan koordinaattimittauskoneessa CAD-mallia voidaan hyödyntää ohjelmoinnissa ja mittausohjelman toimivuuden tarkistamisessa.

8.2 Geometrinen oikaisu mittauksissa

Mitattavan kappaleen asento mittausalustalla voisi vaikuttaa mittaustuloksiin, ellei koordinaattimittauskoneen ohjaus kykenisi suorittamaan geometristä korjausta. Geometrinen korjaus mahdollistaa mittauksen lähes missä asennossa tahansa olevalle kappaleelle. Kyseinen järjestelmä yhdistää kappalekohtaisen koordinaatiston ja koordinaattimittauskoneen koordinaatiston, jolloin koneen koordinaatisto kääntyy kappaleen koordinaatiston mukaisesti. [5.][8.]

Ennen tutkimustyötä oli jo tiedossa, että Tesa-koordinaattimittauskone kykenee suorittamaan geometrisen korjauksen opetusohjelmoinnissa. Tutkimuksen aikana selvisi, että järjestelmä toimii täysin myös CAD-perusteisessa ohjelmoinnissa. Geometrinen korjaus vaatii toimiakseen kappaleen sijainnin määrittävien piirteiden osoittamisen. PC-DMIS -ohjelmisto tarvitsee tähän vähintään kolme piirrettä. Useimmiten työssä käytettiin piirteinä yhtä X-akselin suuntaista suoraa, kappaleen ylätasoa ja yhtä reikää tai toista suoraa. Nämä piirteet pystyttiin myös luomaan CAD-malliin kappaleen suuntausta varten, esimerkiksi suora voitiin luoda kahden reiän välille. Kun fyysisestä kappaleesta mittauksen alussa osoitettiin nämä reiät, ohjelmisto osasi kääntää tarvittaessa mittauskoneen koordinaatiston reikien välillä olevan kuvitteellisen suoran mukaan.

Geometrinen oikaisu on varmasti teollisuuden mittauskoneissa hyödyllinen järjestelmä, joka nopeuttaa mittausten suoritusta ja poistaa suurelta osin kappaleen asentovirheistä johtuvat mittausvirheet. Kappaletta ei tarvitse mitattaessa suunnata niin tarkasti kuin ilman geometristä oikaisua. Tämä helpottaa myös kiinnittimien suunnittelua. Kiinnittimien täytyy edelleen olla tukevat, sillä geometrinen oikaisukaan ei auta, mikäli kappale liikkuu kesken mittauksen.

Jokainen mitattava kappale saa kuitenkin olla hieman eri asennossakin ennen mittauksen aloittamista, joten kappaleen tarkkaan suuntaamiseen ei kulu aikaa.

8.3 Ohjelmointiaikojen erot

Tutkimustyön aikana suoritettussa ohjelmointitapojen nopeusvertailussa käytettiin vain yhtä, mittauskonetta aikaisemmin muutamia tunteja käyttänyttä testihenkilöä. Testihenkilöllä oli jopa enemmän kokemusta opetusohjelmoinnista kuin CAD-perusteisesta ohjelmoinnista. Tästä huolimatta jokaisella, kaikkiaan 18 mittauskerralla CAD-perusteinen ohjelmointi todettiin nopeammaksi ohjelmointitavaksi kuin opetusohjelmointi.

Suurimman nopeusedun CAD-perusteinen ohjelmointi tarjoaa silloin, kun CAD-mallista voidaan ottaa suoraan mittauksien nimellisarvot. Luonnollisesti mallin täytyy olla tällöin mallinnettu tarkasti nimellisarvojen mukaan. Nimellisarvojen syöttäminen käsin jokaiseen mittaukseen oli merkittävin opetusohjelmointia hidastava piirre. Mikäli arvoja ei olisi tarvinnut syöttää käsin, olisi opetusohjelmointi ollut nopeudeltaan lähempänä CAD-perusteista ohjelmointia. Toleranssiarvot syötettiin tutkimuksen aikana käsin molemmissa ohjelmointitavoissa. Joissakin tapauksissa CAD-mallista ei voi saada oikeita nimellisarvoja, kuten esimerkiksi kierteellä varustettuja reikiä mitattaessa. Tällöin ohjelmointitavan nopeusetu vähennee.

CAD-perusteisessa ohjelmoinnissa voidaan PC-DMIS -ohjelmistossa käyttää apuna automaattista piirteiden tunnistusta. Esimerkiksi reikien mittaustyökiertoja luotaessa tämä toiminto tarjoaa nopeusetua verrattuna piirteiden osoittamiseen virtuaalisella mittauskärjellä tai opettamalla. Nopeustestin testikappale numero 3:ssa käytettiin apuna automaattista piirteiden tunnistusta, koska kappaleessa oli useita porausreikiä. Opettamalla näiden reikien osoittaminen oli hidasta, joka on nähtävissä myös opetusohjelmointiin kuluneesta ajasta.

Geometrinen oikaisu toimii myös CAD-mallia nimellismallina käytettäessä samalla tavoin kuin opetusohjelmoinnissa, kuten edellä todettiin. Oikaisu on kylläkin nopeampi asettaa, koska oikaisussa tarvittavat kappaleen sijainnin määräävät piirteet tarvitsee ohjelmoinnin aluksi osoittaa vain nimellismallista, ei fyysisestä kappaleesta kuten opetusohjelmoinnissa.

Yksi CAD-perusteista ohjelmointia muutamilla sekunneilla hidastava piirre on se, että mittausohjelma joudutaan sulkemaan ja avaamaan uudelleen sen jälkeen uudelleen online-tilassa, jotta automaattimittaus voitaisiin suorittaa. Tällä ei kuitenkaan todettu olevan suurta ajallista merkitystä.

Monissa automaattimittausohjelmissa on oltava välipisteitä, jotta mittakärki ei törmäisi mihinkään siirtymien aikana. Opetusohjelmoinnissa välipisteet määritetään opettamalla. CAD-perusteisessa ohjelmoinnissa välipisteet osoitetaan samalla tavalla virtuaalisen mittakärjen avulla, tosin välipisteen paikka on tällöin vaikeampaa määrittää kuin opetusohjelmoinnissa. Tutkimustyössä laadittuihin mittausohjelmiin ei tarvittu välipisteitä, koska ohjelmistossa on toiminto, jonka avulla mittakärki saadaan siirtymään sivu- tai pystysuunnassa ennen varsinaisia siirtymiä. Kyseisen toiminnon avulla voidaan ainakin yksinkertaisten mitattavien kappaleiden kohdalla korvata välipisteet. Virtuaalisella mittakärjellä opettujen välipisteiden toimivuutta tulisi tutkia enemmän, myös vaativien kappaleiden kohdalla.

8.4 Etäohjelmoinnin käyttö

PC-DMIS 4.2 -ohjelmistosta on valmistaja ilmoituksen mukaan saatavissa off-line- ja on-line-ohjelmointiin erilliset versiot. Jotta Tesa-mittauskoneessa olisi mahdollisuus sekä on-line-että off-line -ohjelmointitapojen täysipainoiseen käyttöön, olisi hankittava molemmat edellä mainituista ohjelmistoversioista. Online-ohjelmistoversion tulisi olla mittauskoneen yhteydessä olevassa tietokoneessa, ja Offline-ohjelmistoversion taas ulkopuolisissa ohjelmointiin käytettävissä tietokoneissa.

Koska kyseisellä mittauskone ei ole kiireellisessä teollisuuskäytössä, vaan useimmiten opetuskäytössä, ei Offline-versiota ole kuitenkaan ehdottoman tarpeellista hankkia. Myös nykyinen ohjelmiston Online-versio tarjoaa samat mahdollisuudet CAD-mallin hyödyntämiseen ohjelmoinnissa. Mittauskone soveltuu tämän ansiosta hyvin opetuskäyttöön nykyisille pienille opiskelijaryhmille, ja ohjelmiston online-versiolla pystytään opiskelemaan myös etäohjelmointia, koska ohjelmoinnin voi suorittaa samalla tavalla.

Offline-ohjelmistoversio kannattaisi hankkia esimerkiksi siinä tapauksessa, että mittauskonetta käyttäviä opiskelijoita olisi suuria ryhmiä kerrallaan, eivätkä kaikki siksi pääsisi fyysiselle

mittauskoneelle yhtä aikaa. Oppimisen kannalta olisi luonnollisesti tehokasta, jos jokaisella opiskelijalla olisi käytössä oma tietokone varustettuna PC-DMIS 4.2 Offline -ohjelmistolla. Kajaanin ammattikorkeakoululla ei kuitenkaan ole erityisesti mittauskoneiden ohjelmointiin keskittyvää kurssia, ja nykyinen järjestely riittää nykyisille pienille opiskelijaryhmille.

CAD-perusteinen ohjelmointi kannattaa ehdottomasti ottaa opetukseen mukaan esimerkiksi laboratoriotyön muodossa. Mittauskoneen ohjelmointi CAD-nimellisgeometrian perusteella antaa kuvaa myös esimerkiksi robottien ja NC-koneiden etäohjelmoinnista, ja on siksi yleisesti hyödyllistä ja opettavaista.

Teollisuudessa mittauskoneille ei vielä suuressa määrin käytetä etäohjelmointia eikä ohjelmointia CAD-mallin perusteella, koska ohjelmistojen simuloointeihin ei luoteta ja mittausohjelmat joudutaan tarkistamaan fyysisellä mittauskoneella. Ainakin PC-DMIS 4.2 -ohjelmistoa käytettäessä fyysisellä mittauskoneella tehtävä ohjelman tarkistaminen ei ole kuitenkaan välttämätöntä käytettäessä CAD-mallia nimellisgeometriana. Ohjelman toiminta selviää hyvin jo simuloinnista. Mikäli simuloinnin antamaan kuvaan ohjelman toimivuudesta uskallettaisiin luottaa, saataisiin käyttöön huomattavasti opettamalla tapahtuvaa ohjelmointia nopeampi ohjelmointitapa, joka ei kuitenkaan vaadi ohjelmoijalta juurikaan enempää perehtymistä ohjelmointiin. Ohjelmistojen kehittymisen myötä tämä tulee luultavasti toteutumaan.

Tulevaisuudessa saadaan mahdollisesti ratkaisu myös muihin CAD-perusteisen ohjelmoinnin ongelmakohtiin, kuten oikeiden nimellisarvojen saamiseen. Nykyisin esimerkiksi kierteellisten reikien oikeita nimellisarvoja ei vielä välttämättä saada CAD-nimellismallista. Mahdollisesti ohjelmistojen kehittymisen myötä tähänkin tulee ratkaisu.

9 YHTEENVETO

Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka mitattavasta kappaleesta luotua CAD-mallia voidaan hyödyntää luotaessa automaattimittausohjelmaa koordinaattimittauskoneelle. Työssä käytetty koordinaattimittauskone oli Tesa Micro Hite 3D DCC varustettuna PC-DMIS 4.2 Online -ohjelmistolla. Ennen työn suoritusta oli opeteltava käyttämään kyseistä konetta ja ohjelmistoa, työtä ei olisi voitu suorittaa ilman kokemuseräistä tietoa koordinaattimittauskoneen ohjelmoinnista.

Tutkimustyön alussa selvitettiin, kuinka CAD-malli siirretään ohjelmistoon. Tämän jälkeen tutkittiin, onko tämän nimellismallin avulla mahdollista luoda automaattimittausohjelma ilman fyysisen mittauskoneen liikuttamista. Tämä havaittiin mahdolliseksi, tosin tässä ohjelmistoversiossa ohjaavan tietokoneen on kuitenkin oltava yhteydessä mittauskoneeseen. Työssä verrattiin myös CAD-perusteisen ohjelmoinnin nopeutta verrattuna opetusohjelmointiin ja tutkittiin erilaisten CAD-tiedostomuotojen soveltuvuutta ohjelmointiin.

Työssä tehtyjen havaintojen perusteella CAD-perusteista ohjelmointia voidaan pitää käyttökelpoisena ohjelmointimenetelmänä, ainakin tutkitun mittauskoneen ja mittausohjelmiston kohdalla. Ohjelmointi on nopeampaa kuin opettamalla ohjelmointi, ja mittausohjelman virheet voidaan tarkistaa toimivan simuloinnin avulla. Tulevaisuudessa CAD-perusteinen ohjelmointi tulee luultavasti yleistymään mittausohjelmistojen kehittyessä edelleen.

Työ oli erittäin mielenkiintoinen suorittaa. Tutkimusprojektin suorittamisen lisäksi sain kokemusta itselleni aikaisemmin vieraasta laitteesta, koordinaattimittauskoneesta. Aluksi työ tuntui aikataulultaan haastavalta, koska ei ollut varmuutta siitä, pystyttäisiinkö CAD-mallia ollenkaan hyödyntämään. Vähitellen ohjelmisto tuli kuitenkin tutuksi, ja tutkimustyö onnistui aikataulun mukaisesti.

Työssä mitattavat kappaleet olivat mittausteknisesti helppoja kappaleita. CAD-perusteisen ohjelmoinnin toimivuutta tulisi tutkia enemmän, myös vaativampien kappaleiden avulla. Samalla saataisiin enemmän tietoa esimerkiksi simulointijärjestelmien toimivuudesta. Teollisuuskäytössä olisi eduksi, jos voitaisiin käyttää nopeaa CAD-perusteista ohjelmointia ilman pelkoa ohjelmointivirheiden aiheuttamista vahingoista.

LÄHTEET

1. Tikka, H., Koordinaattimittaus, Tampere 2007.
2. Andersson, P.H., Tikka, H., Mittaus ja laatutekniikat, Porvoo 1997.
3. Salonen, T., Sääski, J., Tuotetietostandardien käyttö tuotannossa, VTT, Luettu 20.2.2008 [www-dokumentti] www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/wz3.pdf
4. Mäenpää, K., Koordinaattimittauskoneet ja 3D-digitointi, Seminaarityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, luettu 10.2.2009 [www-dokumentti] www.tkk.fi/konepaja/opinnot/Kurssiesitteet/seminaari/kevät2001/23koordinaattimittauskoneet.pdf
5. PC-DMIS 4.2 Reference manual, käyttöohje, Luettu 3.2.2009, [www-dokumentti] www.wilcoxassoc.com/downloads/dl_documentation.php
6. Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M., Sihvonen, P., Valmistustekniikka, Helsinki 2005.
7. Coordinate Measuring Machines, Tesa-koordinaattimittauskoneiden esite, Koordinaattimittauskoneiden tekniset tiedot, Luettu 31.1.2009 [www-dokumentti] www.swissinstruments.com/downloads/metrology_coordinate.pdf
8. Koordinaattimittauksen perusteet, TTY, Luettu 2.4.2009 [www-dokumentti] <http://www.pe.tut.fi/promittaus/html/htkoordmittper.html?3>

LIITTEIDEN LUETTELO

1. ESIMERKKI AUTOMAATTIMITTAUSOHJELMASTA

ESIMERKKI AUTOMAATTIMITTAUSOHJELMASTA

```

STARTUP  =ALIGNMENT/START,RECALL:,LIST=YES
ALIGNMENT/END
MODE/MANUAL
PREHIT/ 2
RETRACT/ 2
MOVESPEED/ 100
FORMAT/TEXT,OPTIONS, ,HEADINGS,SYMBOLS, ;NOM,MEAS,TOL,DEV,OUTTOL, ,
LOADPROBE/D4L30
TIP/T1A0B0, SHANKIJK=0, 0, 1, ANGLE=0
YLATASO  =FEAT/PLANE,CARTESIAN,TRIANGLE
THEO/<-15.534,15.528,38>,<0,0,1>
ACTL/<-15.534,15.528,38>,<0,0,1>
MEAS/PLANE,3
HIT/BASIC,NORMAL,<-25.033,26.313,38>,<0,0,1>,<-25.033,26.313,38>,USE THEO = YES
HIT/BASIC,NORMAL,<-22.632,0.226,38>,<0,0,1>,<-22.632,0.226,38>,USE THEO = YES
HIT/BASIC,NORMAL,<1.064,20.045,38>,<0,0,1>,<1.064,20.045,38>,USE THEO = YES
ENDMEAS/
ETUSIVU  =FEAT/LINE,CARTESIAN,UNBOUNDED
THEO/<-16.779,-5.491,35.734>,<1,0,0>
ACTL/<-16.779,-5.491,35.734>,<1,0,0>
MEAS/LINE,2,WORKPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<-16.779,-5.491,36.385>,<0,-1,0>,<-16.779,-5.491,36.385>,USE THEO =
YES
HIT/BASIC,NORMAL,<50.749,-5.491,35.082>,<0,-1,0>,<50.749,-5.491,35.082>,USE THEO = YES
ENDMEAS/
VASEN REIKA=FEAT/CIRCLE,CARTESIAN,IN,LEAST_SQR
THEO/<-14.929,13.509,35.853>,<0,0,1>,15
ACTL/<-14.929,13.509,35.853>,<0,0,1>,15
MEAS/CIRCLE,3,WORKPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<-14.073,6.058,35.3>,<-0.1140606,0.9934738,0>,<-14.073,6.058,35.3>,USE
THEO = YES
HIT/BASIC,NORMAL,<-12.171,20.483,35.505>,<-0.3677574,-0.9299218,0>,<-
12.171,20.483,35.505>,USE THEO = YES
HIT/BASIC,NORMAL,<-22.382,14.344,36.754>,<0.9937827,-0.1113375,0>,<-
22.382,14.344,36.754>,USE THEO = YES
ENDMEAS/
A1      =ALIGNMENT/START,RECALL:STARTUP,LIST=YES
ALIGNMENT/LEVEL,ZPLUS,YLATASO
ALIGNMENT/TRANS,ZAXIS,YLATASO
ALIGNMENT/ROTATE,XPLUS,TO,ETUSIVU,ABOUT,ZPLUS
ALIGNMENT/TRANS,XAXIS,VASEN REIKA
ALIGNMENT/TRANS,YAXIS,VASEN REIKA
ALIGNMENT/END
COMMENT/OPER,NO,Automaattimittaus alkaa tasta!
MODE/DCC
CLEARP/ZPLUS,10,ZPLUS,0,ON
URAN POHJATASO=FEAT/PLANE,CARTESIAN,TRIANGLE
THEO/<31.218,0.502,-3>,<0,0,1>
ACTL/<31.218,0.502,-3>,<0,0,1>
MEAS/PLANE,3
MOVE/CLEARPLANE
HIT/BASIC,NORMAL,<22.619,-9.468,-3>,<0,0,1>,<22.619,-9.468,-3>,USE THEO = YES
HIT/BASIC,NORMAL,<35.552,14.446,-3>,<0,0,1>,<35.552,14.446,-3>,USE THEO = YES
HIT/BASIC,NORMAL,<35.483,-3.471,-3>,<0,0,1>,<35.483,-3.471,-3>,USE THEO = YES
ENDMEAS/
DIM URAN SYVYYS= 3D DISTANCE FROM PLANE YLATASO TO PLANE URAN POHJATASO,
NO_RADIUS UNITS=MM , $
GRAPH=OFF TEXT=OFF MULT=10.00 OUTPUT=BOTH
AX NOMINAL MEAS +TOL -TOL DEV OUTTOL
M 3.000 3.000 0.100 -0.100 0.000 0.000 ---#----

```