

Miika Vanonen

KAPPALEEN JA TYÖKALUN MITTAUS TYÖSTÖKONEESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Jouko Kiviö
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Miika Vanonen: Kappaleen ja työkalun mittaaminen työstökoneessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

Numeerisesti ohjattujen työstökeskusten tuottavuuteen voidaan vaikuttaa mittauksilla valmistusprosessissa. Työstökoneen tuottama tarkkuus mahdollistaa kappaleiden valmistuksen. Tarkkuuden parantamiseksi voidaan hyödyntää mittauksia ja työstön kompensointia. Mittauksia voidaan suorittaa työstökeskuksessa eri mittausmenetelmillä. Tässä työssä tutkitaan eri mittausmenetelmiä ja niiden vaikutuksia valmistusprosessissa. Käsiteltäviä mittausmenetelmiä ovat kappaleen mittaaminen työstökeskuksen sisällä ja työkalun mittaaminen. Tavoitteena on tutkia mittauksen mahdollisuutta parantaa työstökeskuksen tuottavuutta ja tarkkuutta.

Työ on kirjallisuustutkimus, jossa tietoa koottiin tieteellisistä artikkeleista ja aiheeseen liittyvistä kirjoista. Lähteiden mukaan johdettiin mahdolliset vaikutukset valmistusprosessissa.

Työstökeskusten epätarkkuudet johtuvat eri tekijöistä, joita ei voida tarkasti eritellä. Epätarkkuuksien summa voidaan mitata. Epätarkkuuksien summaa voidaan kompensoida mittauksien avulla. Mittalaitteita on toimintatavoiltaan erilaisia. Mittalaitteiden toiminnan perusteella työssä tarkasteltiin niiden soveltuvuutta erilaisiin valmistusprosesseihin. Valmistusprosessissa mittaaminen vie aikaa työstökoneelta, jolloin tuottavuuden parantamiseksi on arvioitava mittauksen tarve. Mittauksen tarve riippuu vaadittavasta tarkkuudesta. Työkalun mittauksella tarkennetaan työkalun lastuavan terän sijaintia työstökeskuksen koordinaatistossa ja työstöradoissa. Kappaleen mittauksella voidaan kompensoida työstöratoja tai työstökeskuksen ohjausta. Kappaleen mittaukseen käytetään usein koordinaattimittauskoneita. Koordinaattimittauskoneen käyttö vaatii työstettävän kappaleen irrottamisen työstökeskuksesta, jolloin uudelleen kiinnitys aiheuttaa epätarkkuuden työstöä jatkettaessa. Koordinaattimittauskoneen sijaan työstettävä kappale voidaan mitata työstökeskuksessa. Työstökeskuksessa mittaaminen nopeuttaa valmistusprosessia tilanteissa, joissa mittausta vaaditaan kesken työstöprosessin.

Työ osoittaa mittauksen ja kompensoinnin hyödyntämisen lisäävän työstökeskuksen tarkkuutta ja mahdollisesti parantavan tuottavuutta. Mittauksen vaikutus tuottavuuteen perustuu virheiden kappaleiden valmistuksen ehkäisemiseen. Tuottavuuden parantaminen riippuu mittauksen tarpeesta.

Avainsanat: työstökeskuksen sisäinen mittaaminen, työstön kompensointi, mittausmenetelmät

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TYÖSTÖN EPÄTARKKUUDET	2
2.1 Olosuhteet	2
2.2 Työkalut	2
2.3 Työstökoneen rakenne	3
3. PAIKOITUS	5
3.1 Kappaleen paikoitus	5
3.2 Työkalun paikoitus	6
4. MITTAUSMENETELMÄT	7
4.1 Koskettava mittaus	7
4.1.1 Kappaleen koskettava mittaus	7
4.1.2 Työkalun koskettava mittaus	9
4.2 Optinen mittaus	9
4.2.1 Työkalun optinen esiasetuslaite	10
4.2.2 Työkalun mittaus laserilla	11
4.2.3 Kappaleen mittaus laserilla	12
5. TYÖSTÖPROSESSI	13
5.1 Mittausprosessi	13
5.1.1 Kappaleen mittaus	14
5.1.2 Työkalun mittaus	15
5.2 Työstön kompensointi	16
5.2.1 Työstöratojen kompensointi	16
5.2.2 Työstökoneen kompensointi	17
5.3 Joustava valmistus	17
6. MITTAUSEPÄVARMUUS	19
6.1 Työkalun mittausepävarmuus	19
6.2 Kappaleen mittausepävarmuus	19
6.3 Mittalaitteiden kalibrointi	20
7. PÄÄTELMÄT	23
LÄHTEET	25

1. JOHDANTO

Teollisuuden automaation ja joustavan valmistuksen myötä valmistusprosesseilta vaaditaan suurempaa tarkkuutta ja luotettavuutta. Valmistusmenetelmänä ainetta poistavat menetelmät ovat edelleen keskeisiä. Työstökoneiden kehitys on edennyt numeerisesti ohjattujen koneiden käyttöön, jotka mahdollistavat valmistuksen automatisoinnin. Automaatisaatio vaatii ympärilleen luotettavan järjestelmän, joka mahdollistaa työstökoneen toiminnan ilman siinä aktiivisesti työskentelevää työntekijää. Työstökoneen tuottavuutta määrittelevät työstöön käytetty aika ja työstön laatu.

Viallisten kappaleiden valmistus aiheuttaa ongelmia tuotannossa, sillä viallisen kappaleen valmistukseen kulunut aika ja raaka-aineet aiheuttavat kustannuksia, eivätkä ollenkaan tuottoja. Työstön monitoroinnilla pyritään ehkäisemään viallisten kappaleiden valmistusta. Yksi oleellinen työstön monitorointimenetelmä on työstettävän kappaleen ja työstön suorittavan työkalun mittaus. Työn tavoitteena on tutkia mittausmenetelmiä työstettävän kappaleen ja työkalun mittauksessa, sekä menetelmiä käytön vaikutuksia työstöprosessiin.

Työssä selvitetään työstöprosessin aiheuttamia virheiden alkuperää ja kuinka mittausmenetelmillä voidaan havaita näiden virheiden esiintyvyyttä. Lopussa tutkitaan mittausmenetelmien vaikutusta työstökoneiden prosessiin ja mihin eri tilanteisiin mittausmenetelmät soveltuvat. Tässä työssä työstökoneella tarkoitetaan tästä eteenpäin numeerisesti ohjattua työstökeskusta.

2. TYÖSTÖN EPÄTARKKUUDET

Työstettävän kappaleen tarkkuus riippuu työstössä esiintyvien epätarkkuuksien summasta. Tarkkuudella tarkoitetaan todellisen arvon poikkeamaa nominaalisesta arvosta ja suuremmalla tarkkuudella tarkoitetaan pienempää poikkeamaa nominaalisesta arvosta. Kappaleen epätarkkuuksia aiheuttavia tekijöitä ovat työstökoneen ja työstöprosessin epätarkkuudet.

2.1 Olosuhteet

Työstökoneeseen vaikuttavat lämmönvaihtelut aiheuttavat lämpölaajenemista, joka aiheuttaa epätarkkuuksia pöydän ja karan paikoituksissa. Ympäristön lämmön säätelyllä voidaan ehkäistä tätä ilmiötä. Monissa moderneissa konepajoissa ei sallita ikkunoita, sillä Auringon säteet tuovat lämpöä tilaan ja mahdollisesti tuottavat mittavirheitä tarkasti kalibroituihin työstökoneisiin (Smith 2016, s. 79–80). Lämpöä syntyy työstön aikana eri koneen osissa, ja tämä aiheuttaa paikoittaisia lämmönvaihteluita, jonka takia vaikutukset työstöön ovat vaikeita arvioida (Lopez & Lamikiz 2009, s. 227).

Työstökoneen pitkäaikainen käyttö aiheuttaa lämmön kertymistä koneen osiin, jolloin kone käyttäytyy eri tavalla työstön aikana. Lämmön muodostumista ehkäistään työstössä lastuamismesteen käytöllä, jolloin lastuava terä ja työstettävä kappale eivät ylikuumene.

Työstökoneen karan lämpötilaa hallitaan epätarkkuuksien ehkäisemäksi. Karan jäähdytetään kierrättämällä väliainetta karan rakenteiden läpi, jolloin lämpö johtuu väliaineen kautta pois karasta. Jäähdytykseen voidaan käyttää erillistä jäähdytysnestettä, ilmaa tai lastuamismestettä. Tehokkain ja yleisin käytäntö on jäähdytysneste. (Lopez & Lamikiz 2009, s. 117–118)

2.2 Työkalut

Työkalulla tarkoitetaan jyrksinnässä työstökoneen karaan kiinnitettävää kokonaisuutta, joka suorittaa lastuavan työstön. Työkaluja on erilaisiin tarkoituksiin, ja niitä tarvitaan useita valmistusprosessissa.

Työkalu koostuu yleisesti työkalunpitimestä ja lastuavasta terästä. Työkalunpidin toimii karan ja lastuavan terän välillä siirtäen voiman ja mahdollistaen nopean ja automatisoidun työkalunvaihdon. Työkalut on kokoonpantava käsin, ja työkalujen mitat vaihtelevat

työkalunpitimien ja terien mukaan. Työkalujen vaihtelevuuksien takia työkalunhallinta on oleellinen osa automaatiota ja työkalujen mittaaminen on osa työkalunhallintaa.

Työstävän työkalun kuluneisuus ja taipuma aiheuttavat epätarkkuuksia työstössä. Kuluneisuus ja taipuma riippuvat työkalun valinnasta ja työstövoimista. Kuluneisuutta esiintyy aina työkaluissa, ja sitä voidaan arvioida mittaamalla tai terän käyttöajan perusteella. Kuluneisuuteen voidaan vaikuttaa valituilla työstöarvoilla, mutta kuluneisuuden minimoiminen ei ole tuottavuuden kannalta kannattavaa, koska työstöaika pitenee huomattavasti.

Työkalun taipuma on yksi suurimmista virheiden aiheuttajista jyrksinnässä. Työstövoimien aiheuttama taipuma poikkeuttaa lastuavan terän sen nominaalisesta paikoituksesta, jolloin aiheutuu virhe työstössä. Taipuman suuruuteen vaikuttavat työstettävän kappaleen materiaali, työstävän työkalun kokoonpano ja työstöarvot.

Työkalujen geometria vaikuttaa työstövoimien vaihteluun, joka aiheuttaa työstössä värähtelyjä. Lastuavien terien lukumäärä vaikuttaa suuresti työstövoimien vaihteluihin. Värähtelyt aiheuttavat epätarkkuuksia työstössä. Värähtelyiden suuruuteen vaikuttavat työkalun jäykkyys ja työkalun heitto. Heitolla tarkoitetaan työkalun tai karan geometrisen akselin poikkeamaa pyörintäakselista. (Lopez & Lamikiz 2009, s. 119–120)

2.3 Työstökoneen rakenne

Työstökoneen rakenteessa keskeisimpiä työstön tarkkuuteen ovat kara, lineaariakselit ja rotaatioakselit. Kara on työstökoneen lastuavan työstön liikkeen aikaansaava osa, johon lastuava työkalu kiinnitetään. Karan on pidettävä työkalu paikallaan työstön aikana tarkan työstön aikaansaamiseksi. Työstövoimien vaikutuksesta työstössä esiintyy virheitä riippuen karan rakenteesta ja sen kyvystä kestää voimia. Työstövoimat aiheuttavat poikkeamaa työstettävässä pisteessä, jolloin työstetty jälki poikkeaa halutusta pisteestä. Karan laakeroinnin laatu, kuluneisuus ja väljyys vaikuttavat karan suorituskäyttöön ja tarkkuuteen. (Lopez & Lamikiz 2009, s. 75; 87–88)

Karan ja työkalun välinen kiinnitys on oleellinen työstön laatuun ja työstövoimien kestävyys. Karan ja työkalun kiinnitykseen käytetään teräpitimiä. Karan ja kiinnityksen akselien keskeisyys vaikuttavat työstön vakauteen ja heittoon. Karan geometrinen akseli voi poiketa sen pyörimisakselista aiheuttaen lisää heittoa. Karan pyöriessä työstönopeuksilla siinä esiintyy dynaamisia virheitä, jotka riippuvat työkalun keskeisyydestä pyörimisakselin suhteen. Dynaamiset virheet ilmenevät värähtelynä, huonona pinnan karheutena ja mittavirheinä. (Vieira et al. 2018)

Lineaari- ja rotaatioakselit määrittävä karan liikkeen työstettävän kappaleen suhteen. Akselien kohtisuoruudet toisiinsa nähden vaikuttavat liikkeen vastaavuuteen työstökoneen koordinaatistossa. Akselien poikkeamat koordinaatistonakseleista vaikuttavat työstettävän kappaleen tarkkuuteen. Poikkeamia voidaan huomioida ja korjata näistä aiheutuvia virheitä.

3. PAIKOITUS

Paikoituksella tarkoitetaan tässä työssä sijaintia ja orientaatiota työstökoneen koordinaatistossa. Työstössä työkalua liikutetaan relativisesti työstettävän kappaleen suhteen. Työstökoneen karan paikoitus ja liike pöydän suhteen voidaan kalibroida ennen työstöä koneen käyttöönotossa, mutta työkalun kiinnitys karan suhteen ja kappaleen kiinnitys pöydän suhteen on otettava huomioon aina uuden kappaleen tai työkalun vaihtuessa. Työkalun ja kappaleen paikoitukset on suoritettava ennen työstöä, ja tämän viemä aika vaikuttaa suoraan työstökoneen tuottavuuteen. Ajan lisäksi paikoitusten tarkkuudet ovat kriittisiä työstöltä vaadittavan tarkkuuden aikaansaamiseksi.

3.1 Kappaleen paikoitus

Työstettävän kappaleen paikoituksen ja orientaation poikkeamat koneen koordinaatistossa vaikuttavat kappaleen lopputulemaan. Kappaleen kiinnityksessä pyritään minimoimaan paikoituksen aiheuttamat virheet kiinnitinsuunnittelulla esimerkiksi 3–2–1-periaatteella, jossa kiinnityksessä määritetään kiinnityspisteillä kolme tasoa ja näiden avulla saadaan kappaleen paikoitus. Tarvittaessa paikoituksen tarkkuutta parannetaan hyödyntämällä paikoituksen mittausta. Mittauksessa työstökoneen työkalun tilalle asennetaan mekaaninen tai optinen mittalaite, jolla määritetään kappaleen paikoitus määrittämällä kappaleen pinnalta pisteitä.

Paikoituksesta syntyvät virheet voidaan eliminoida, jos työstön aikana kappaletta ei poisteta kiinnityksestä. Paikoituksen virheitä voidaan myös vähentää käyttämällä mekaanisia apuvälineitä tilanteissa, joissa uudelleenkiinnitys vaaditaan työstöprosessissa. Paikoituksessa nollapistekiinnittimillä voidaan saada alle 3 μm :n toistuvuus. (Lopez & Lamikiz 2009, s. 229) Nollapistepaikoitus tarkoittaa kiinnitintappien hyödyntämistä, jotka määrittävät kiinnitettävän kappaleen tai paletin orientaation ja sijainnin työstökoneen koordinaatistossa. Toistuvuudella tarkoitetaan normaalijakauman kaksinkertaista keskihajonnan poikkeamaa odotusarvosta, joka vastaa 95,45 % luottamusväliä ja voidaan ilmaista merkinnällä 2σ (Ihara & Nagasawa 2013). Nollapistekiinnityksellä kappale voidaan poistaa työstökoneesta ja kiinnittää uudelleen ilman paikoitusta, mikä vähentää työstökoneen asetusaikaa.

3.2 Työkalun paikoitus

Työstön suorittava instrumentti on karaan kiinnitettävä työkalu. Työkalun paikoitukseen tarvitaan työkalun pituus, joka on terän etäisyys karan referenssisitasosta, ja työkalun säde, joka on terän etäisyys karan pyörimisakselista (Ihara & Nagasawa 2013).

Työkaluille tiedetään nominaaliset arvot, jotka saadaan työkalun valmistajalta. Työkalujen tarkemmat arvot on määritettävä mittaamalla, jonka jälkeen arvo voidaan syöttää työstökoneelle. (Fallah et al. 2019) Työkalu voidaan mitata uudelleen, jotta terän kulumisuus otetaan huomioon.

Työstöön vaadittavien työkalujen lukumäärä vaihtelee, mutta yleisesti ottaen työkaluja tarvitaan useampia. Usean työkalujen hallinnointi on osa työstön automatisointia. Automatisoidulla työkalunhallinnalla työkalujen kunto tarkastetaan tietyin aikavälein (Ihara & Nagasawa 2013). Huono työkalujen hallinta tai käyttäjävirheet voivat johtaa työkalujen ennenaikaiseen kulumiseen, koneensisäisiin törmäyksiin tai viallisiin kappaleisiin.

Työkalu voidaan mitata koneeseen integroidulla mittalaitteella, jolloin työkalu mitataan sen ollessa kiinni karassa. Toisena vaihtoehtona on mitata työkalu ennen sen sijoittamista työstökoneeseen ulkoisella esiasetuslaitteella. Sisäisen mittalaitteen käyttö edellyttää työstön keskeytyksen, kun taas esiasetuslaitteella mittaus voidaan suorittaa erillään vaikuttamatta työstökoneen käyttöön (Chen et al. 2017). Koneensisäisessä mittauksessa päästään mittauksen aikana lähemmäksi työstön aikaista olosuhdetta. Esimerkiksi mittaus voidaan suorittaa karan ollessa lämmin työstöstä, jolloin lämmön aiheuttavat vaikutukset karassa otetaan huomioon. Myös karaa pyöritetään työstönopeuksilla, jolloin työkalun dynaamiset virheet esiintyvät mittauksessa. Koneen ulkopuolella tehdyssä mittauksessa kiinnityksen aiheuttamia variaatioita karan ja esiasetuslaitteen kiinnityksen välillä ei voida ottaa huomioon.

4. MITTAUSMENETELMÄT

Kappaleiden mittauksiin käytetään konepajateollisuudessa koordinaattimittauskoneita, jotka mittaavat mitattavan kappaleen pinnalta pisteitä, joista voidaan arvioida kappaleen muotoa ja toleransseja. Työstökoneen ja koordinaattimittauskoneen samankaltaisuuden vuoksi samoja mittaustapoja voidaan hyödyntää työstökoneessa. Työstökoneen kalibrointi vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen, sillä työstössä esiintyvä koneen aiheuttama systemaattinen virhe toistuu mittauksessa. (Holub et al. 2018)

Mittauksilla voidaan paikoittaa työstettävä kappale ja työstävä työkalu. Lisäksi mittauksia käytetään työstöjäljen ja kappaleen pinnan muodon määrittämiseen. Esimerkkinä pinnan muodon mittauksesta ovat turbiinien siivet.

Kappaleen paikoitukseen voidaan tarvittaessa käyttää vain muutamaa mittauspistettä, jos kyseessä on esimerkiksi aihio, jossa on reilusti työstövaraa. Kappaleen työstöjäljen ja pinnan määrittämiseen vaaditaan useampia mittauspisteitä kappaleen pinnalta.

Työkalujen mittauksella määritetään ensisijaisesti työkalun pituus ja halkaisija. Työkalun geometriaa voidaan arvioida vain optisella mittauksella. Työkalun mittaukseen riittää usein yksi mittauspiste pituudelle ja toinen halkaisijalle. Geometrian mittaukseen vaaditaan useampia mittauspisteitä.

Koneen sisäisissä mittauksissa on huomioitava työstökoneen puhtaus, sillä lastut ja lastuamisneste heikentävät mittaustuloksien luotettavuutta. Paineilma on yleinen keino puhdistaa mittalaitteet, työstettävä kappale ja työkalu ennen mittausta.

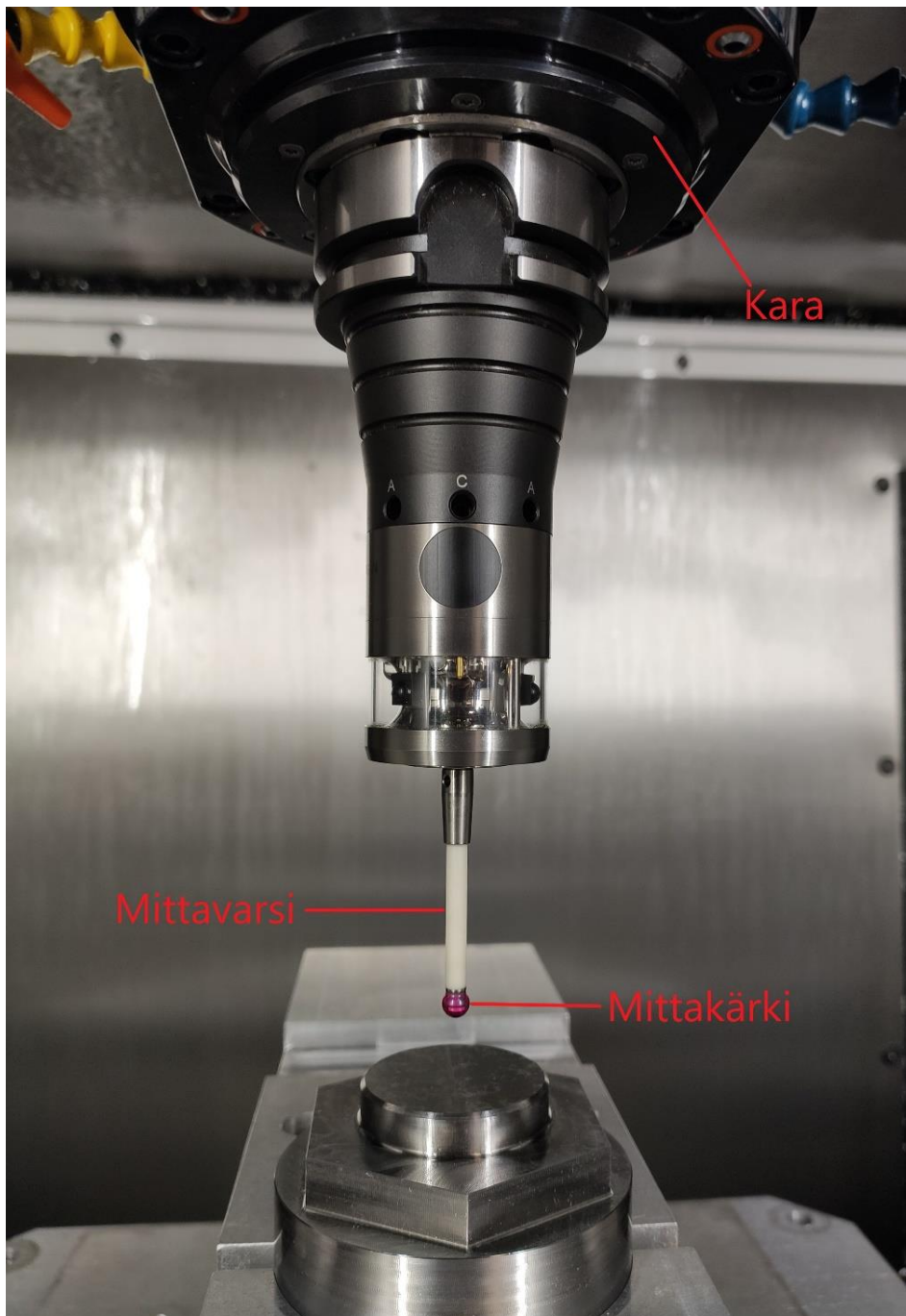
4.1 Koskettava mittaus

Koskettavan mittauksen mittalaitteet useimmiten toimivat kytkimen tavalla. Mittalaitteeseen vaikuttava voima liikauttaa kytkintä, jolloin signaali kosketuksesta menee työstökoneelle ja kosketuksen piste saadaan koneen koordinaatistossa.

4.1.1 Kappaleen koskettava mittaus

Koskettava mittaus toteutetaan koskettavalla mittapäällä, jossa on pyöreä mittakärki. Mittakärki koskettaa mitattavan kappaleen pintaa ja tunnistaa kosketuksen, jolloin tieto kosketus pisteestä voidaan kirjata ylös. Kosketus havaitaan mittavarren poikkeamana sen vakiopaikoituksesta. Mittavarsi poikkeaa nivelpisteen avulla, jolloin mittakärki liikkuu

ympyrämäisellä liikeradalla. Mittakärjen liikeradan ollessa ympyrämäinen, kosketuspisteen sijainti vaihtelee riippuen poikkeaman etäisyydestä. Kosketuspisteen lähestymissuunta aiheuttaa virheen mittaustuloksessa mitä enemmän se poikkeaa kappaleen pinnan normaalista, koska kosketuspiste liikuu kappaleen pinnalla mittakärjen ympyrämäisen liikeradan takia. Mittalaitteen rakenteen vuoksi sen orientaatio karassa vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen. Orientaatio voidaan ottaa huomioon kalibroinnissa ja mittausta ennen kara voidaan asettaa aina samaan orientaatioon suunnasta riippuvan toistuvuuden parantamiseksi. (Ihara & Nagasawa 2013)



Kuva 1: Koskettava mittalaite kappaleen mittaukseen

Työstökoneissa kosketuksen sijainti saadaan koneen koordinaatistossa, kun koskettava mittalaite on asennettuna karaan ja mittalaitteen kärjen paikoitus suhteessa karaan on kalibroitu. Mittalaite tunnistaa kosketuksen, kun mittapäähän vaikuttaa voima, joka poikkeuttaa sen alkuperäisestä paikoituksesta.

Poikkeaman etäisyys riippuu viiveestä tunnistaa kosketus. Viiveeseen vaikuttavat mittalaitteen varren taipuma, elektroniikan aiheuttama viive ja mittapään nopeus. Poikkeaman etäisyyden ollessa suuri, mittauksen tarkkuus heikkenee. (Ihara & Nagasawa 2013) Mittaukseen vaaditaan tasainen nopeus mittaustulosten toistuvuuden mahdollistamiseksi.

Ohutseinäistä tai elastista materiaalia mitattaessa mittauksesta aiheutuva voima aiheuttaa virheen mittauksessa, jolloin mittausmenetelmä ei sovellu käyttötarkoitukseen. Koskettava mittaus on suosituin koneensisäinen kappaleen mittausmenetelmä, sen luotettavuuden ja markkinoilla mittalaitteiden laajan saatavuuden takia.

Koskettavia mittalaitteita on myös kytkevien ohella pyyhkäiseviä mittalaitteita. Nämä mittalaitteet mahdollistavat mittakärjen liikuttamista kappaleen pinnalla ja mittaamalla jatkuvasti mittauspisteitä. Pyyhkäisevät mittalaitteet eivät ole yhtä yleisiä kuin kytkevät mittalaitteet.

4.1.2 Työkalun koskettava mittaus

Koskettavaa mittausta käytetään työstökoneen sisäisessä mittauksessa. Mittaus tapahtuu työkalun ollessa karassa kiinnitettynä. Mittauksessa karaa on mahdollista pyörittää dynaamisten virheiden huomioimiseksi, mutta kosketus suurilla pyörimisnopeuksilla voi vahingoittaa työkalun terää tai mittalaitetta. Kosketusmittaus toimii samalla periaatteella kuin kappaleen kosketusmittaus, jossa mittakärki poikkeaa paikoituksestaan ja tunnistaa kosketuksen.

Mittauksessa työkalun lähestymisnopeus on oltava sama kaikissa mittauksissa toistuvuuden takaamiseksi. Lähestymisnopeus rajoittaa mittaukseen kuluvaan aikaan. Koskettava mittaus ei sovellu pienten työkalujen mittaukseen.

4.2 Optinen mittaus

Optista mittausta hyödynnetään usein työstökoneen mittauksessa ja kalibroinnissa. Lasereita hyödynnetään niiden tarkan etäisyyden mittauksen vuoksi. (Smith 2016, s. 201–202) Lasereita ja muita optisia laitteita voidaan hyödyntää kappaleen ja työkalun mittauksissa. Työstökoneessa voidaan käyttää laseria työkalujen mittauksessa, jolloin työkalun

mittauksen aikana voidaan pyörittää karaa suurilla kierrosnopeuksilla ja näin päästä lähelle työstön aikaisia olosuhteita.

Optinen mittaus ei häiritse mitattavaa kappaletta toisin kuin koskettava mittaus, jossa mittalaite aiheuttaa voiman mitattavaan kappaleeseen ja tarkoissa mittauksissa tai helposti joustavan materiaalin mittauksessa koskettava mittaus ei sovellu (Zou et al. 2017). Optiset mittalaitteet ovat kuitenkin herkkiä olosuhteiden muutoksiin, jolloin olosuhteiden vaikutus on otettava huomioon mittauksessa.

4.2.1 Työkalun optinen esiasetuslaite

Työkalujen optiseen mittaukseen käytetään esiasetuslaitetta, joka käyttää kameraa muodostaakseen kuvan työkalun lastuavasta terästä, jonka avulla saadaan mittatulos työkalusta. Laite toimii erillään työstökoneesta, jolloin mittaus voidaan suorittaa työstökoneen käydessä.

Työkalu kiinnitetään työstökoneen karaa vastaavaan kiinnittimeen ja laitteen kamera osoitetaan työkalun lastuavan terän kohdalle. Kamera on kiinnitettyä laitteen runkoon, joka mahdollistaa kameran paikoituksen, ja kameran kalibroinnilla saadaan luotettava mittaustulos työkalusta.

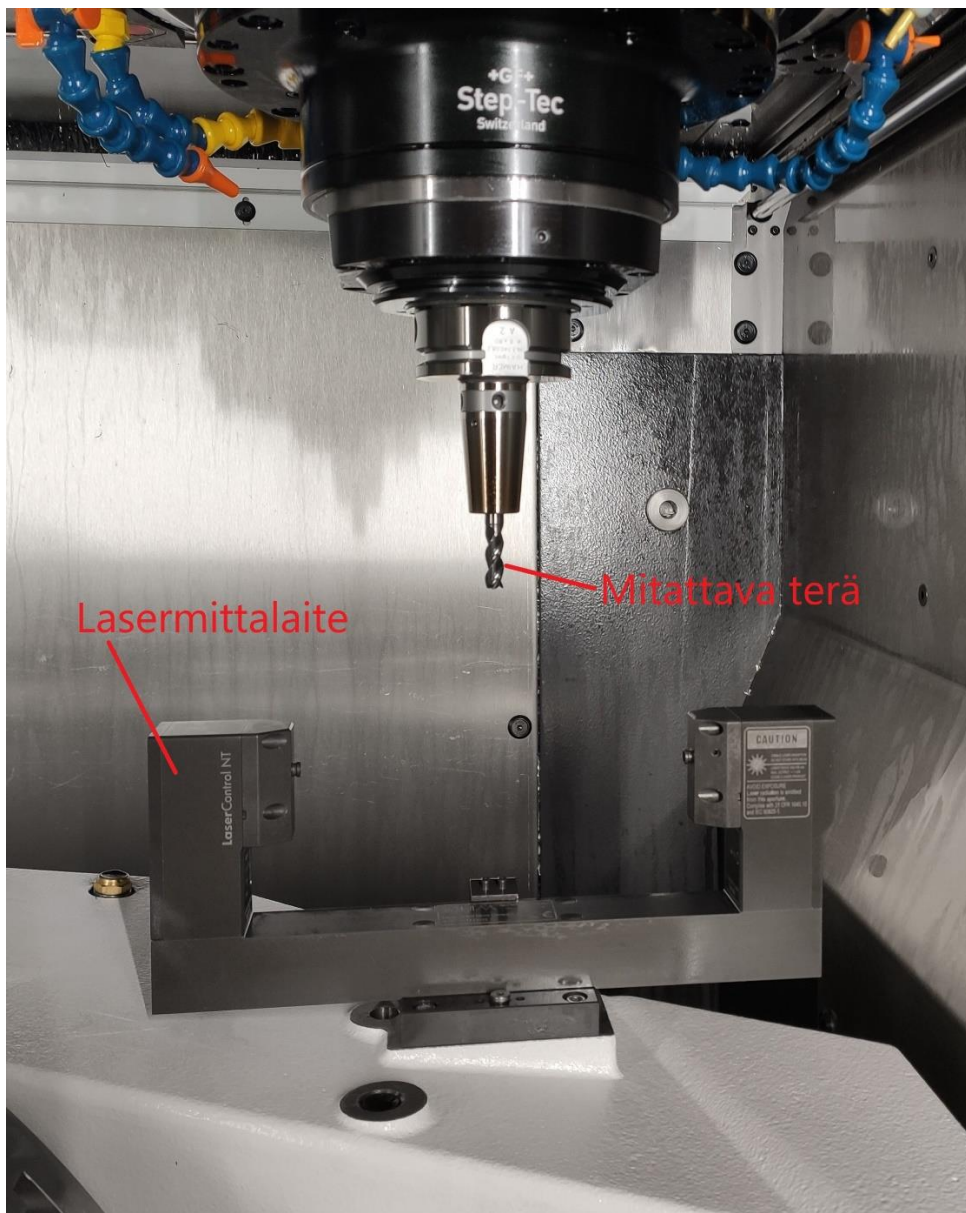


Kuva 2: Esiasetuslaite

Esiasetuslaite mahdollistaa terän kuluneisuuden, geometrian ja koon mittauksen. Terän kuluneisuuden arvioinnissa laite mahdollistaa työkalun jokaisen lastuvan terän tarkastelun erikseen. Esiasetuslaite mahdollistaa työkalun epäkeskisyyden arvioinnin ja heiton mittauksen. Epäkeskisyys aiheuttaa työstössä tärinää ja heikentää pinnankarheutta.

4.2.2 Työkalun mittaus laserilla

Työkalun mittaus laserilla tapahtuu työstökoneen sisällä. Mittalaite osoittaa laserin lähettimeltä vastaanottimelle. Työkalun paikoitus saadaan estämällä laser-säteen pääsy vastaanottimelle, jolloin työkalun terän reuna tunnustetaan koneen koordinaatistossa. (Smith 2008, s. 248)



Kuva 3: Työkalun mittaus laserilla työstökoneen sisällä

Koneensisäisessä mittauksessa laserilla työkalua voidaan pyörittää työstönopeuksilla sen dynaamisten virheiden huomioimiseksi, jota ei ole mahdollista tehdä koskettavalla mittauksella. Karan kierrosnopeuden suuruus vaikuttaa myös mittauksen tarkkuuteen ja mahdollistaa suuremman lähestymisnopeuden mittalaitetta kohti (Smith 2008, s. 248). Mittausprosessi laserilla verrattuna kosketusmittaukseen on nopeampi, sillä työkalun lähestymisnopeus mittalaitetta kohti voi olla suurempi riskeeraamatta mittalaitteen tai työkalun vahingoittumista (Smith 2008, s. 248).

4.2.3 Kappaleen mittaus laserilla

Kappaleen optinen mittaus on vähemmän käytetty menetelmä kuin kappaleen koskettava mittaus. Optiset menetelmät ovat harvinaisempia markkinoilla, joka vähentää niiden käyttöä työstökoneissa. Optisista mittalaitteista laajimmin saatavilla ovat lasermittalaitteet.

Kappaleen mittaukseen käytettävä lasermittalaite on koskematon mittausmenetelmä. Mittauksessa laser asennetaan karaan ja laser osoitetaan kappaleen pintaan lähietäisyydeltä. Laserilla voidaan mitata pisteitä jatkuvasti, joka mahdollistaa nopeamman mittauksen verrattuna kytkevään koskettavaan mittaukseen. Laser soveltuu monimutkaisten pintojen, kuten turbiinien siipien muodon määrittämiseen, koska laserilla on mahdollista saada suuri määrä mittauspisteitä lyhyessä ajassa. Turbiinin siipi on tässä kontekstissa yksittäinen siipi, joka koneistuksen jälkeen on osana suurempaa kokoonpanoa. Laserin käyttöä rajoittaa sen kyvyttömyys mitata pintaa, joka ei ole kohtisuorassa laser-sädettä kohden. (Nishikawa et al. 2014)

Mittauksen rajoituksen takia laserilla mittaus ei ole yhtä monipuolinen mittalaite kuin koskettava mittalaite. Reikien ja reunojen määrittäminen kappaleesta laserilla ei onnistu suoraan mitaamalla, sillä mitattava pinta ei ole kohtisuorassa laser-säteeseen nähden. Suoran mittauksen sijaan reiät ja reunat määritetään usean mittauspisteen perusteella epäsuorasti. Mittalaite ei sovellu monimutkaisten vapaamuotoisten kappaleiden mittaukseen, jotka sisältävät kapeita välejä, joihin ei mittalaitteen koon takia päästä. Tällaisia kappaleita ovat esimerkiksi propellit, jotka valmistetaan yhtenä kappaleena.

5. TYÖSTÖPROSESSI

Mittauksia voidaan hyödyntää työstöprosessin eri vaiheissa. Ennen työstöä voidaan varmistaa työstökoneen kalibroinnin validiteetti, kappaleen ja terän paikoitukset. Työstöprosessin aikana voidaan tutkia työstettyä kappaletta ja kompensoida mahdollisia virheitä ennen viimeistelyä. Työstöprosessin jälkeen voidaan suorittaa kappaleen tarkastus, jolla todennetaan, onko kappale toleranssien sisällä. Mittausten tarve riippuu vaaditusta laadusta ja kappaleiden määrästä.

Yksittäisten kappaleiden tuotannossa mittaukset korostuvat verrattuna massatuotantoon. Yksittäisen kappaleen työstössä ei ole aikaisempaa kokemusta kappaleen työstöradioista ja kiinnityksestä. Yksittäiskappaleen valmistuksessa mittaukseen käytetty aika ehkäisee virheellisen kappaleen valmistusta ja varmistaa työstön onnistumisen. Massatuotannossa prosessi pyritään saamaan toimivaksi ilman mittauksia, jotka keskeyttäisivät työstön, jolloin työstökoneen tuottavuus laskisi.

Koordinaattimittauskoneen käyttö kappaleiden mittauksessa on toiminut käytäntönä työstöprosessin aikana, mutta koordinaattimittauskoneen käyttö vaatii kappaleen irrotuksen työstökoneesta, jolloin kappale joudutaan paikoittamaan koneeseen uudelleen. Uudelleen kiinnitykseen voidaan käyttää nollapistekiinnitystä, jolloin kappaleen poisto työstökoneesta ei tuota suurta paikoituksen virhettä. Kappaleen uudelleen kiinnitys ilman nollapistekiinnitystä on aikaa vievää ja aiheuttaa virheitä paikoituksessa, joten koneensisäistä mittausta suositetaan koordinaattimittauskoneen sijaan. Työstökoneiden kehityksen myötä koneensisäisen mittauksen avulla voidaan vähentää koordinaattimittauskoneen ja tästä johtuvan uudelleenkiinnityksen tarvetta.

Liu (1999) luokittelee työstöprosessin virheiden tekijöiksi työkalun kuluneisuuden, työkalun taipuman ja työstettävän kappaleen taipuman. Nämä virheet ovat riippumattomia työstökoneen tarkkuudesta, jolloin ne ovat havaittavissa koneensisäisellä mittauksella. Tarkimman lopputuleman aikaansaamiseksi on mitattava työstöstä aiheutuvat virheet ja kompensoitava näitä. (Liu 1999)

5.1 Mittausprosessi

Mittausprosessi voi olla työstöprosessin aikana, ennen sitä tai sen jälkeen. Mittaukset voidaan suorittaa työstökoneen sisällä tai ulkoisella mittalaitteella.

5.1.1 Kappaleen mittaus

Kappaleen mittaukseen hyödynnetään työstöratujen kompensointiin, kappaleen tarkastukseen tai työstökoneen kompensointiin. Mittauksen tarve on suunniteltava työstettävän kappaleen mukaan. Mittauksen suunnitteluun hyödynnetään ohjelmistoja mittauspisteiden määrittelyyn ja optimointiin. Mittausten kesto ja tarkkuus riippuvat mitattavien pisteiden lukumäärästä, joten niillä on suora vaikutus tuottavuuteen. Mitattavia pisteitä voidaan lisätä kohteisiin, joissa virheiden esiintyvyydet ovat todennäköisempiä. Esimerkiksi työstetyissä kaarteissa virheiden esiintyvyys voidaan olettaa suuremmaksi ja mitata kaarteesta useammalla pisteellä tarkemman tuloksen saamiseksi. Kappaleille asetettujen toleranssien mukaan voidaan painottaa enemmän mittauspisteitä oleellisten mittojen todentamiseen. (Cho & Seo 2002; Huang et al. 2014)

Mittauspisteiden määrityksellä on vaikutus mittaustulosten luotettavuuteen. Cho ja Seo (2002) tutkivat rouhinnan jälkeistä mittaukseen ja mittauspisteiden vaikutusta mittaustuloksiin. Rouhinnassa käytettiin pallopäistä työkalua. Pinnan virheiden mittauksissa työstöratujen mukaan valittujen mittauspisteiden virheiksi saatiin 95 µm ja tasaisen välin mukaan määritettyjen pisteiden virheeksi saatiin 285 µm. (Cho & Seo 2002) Mittauspisteiden valinta vaikuttaa huomattavasti mittaustuloksiin riippuen työstöstä.

Koskettavaan mittaukseen tarvittava aika voi olla kaksinkertainen verrattuna koskemattomaan mittaukseen laserilla, sillä koskettavassa mittauksessa mittausta suoritetaan piste kerrallaan, kun koskematon mittausta on jatkuvaa. Laserilla mittauksen pisteiden mittaussnopeus riippuu laserin taajuudesta. Mitä enemmän mittauspisteitä vaaditaan, sen enemmän koskematon mittausta säästää aikaa. (Ding et al. 2021) Pyyhkäisevällä koskettavalla mittauksella saadaan mitattua jatkuvasti pisteitä, jolloin ero laserilla mittaukseen ajallisesti on pienempi.

Suurten kappaleiden valmistuksessa mittausta tuottaa ongelmia kappaleen koon vuoksi. Koordinaattimittauskoneet suurille kappaleille eivät usein ole saatavilla tuotantotiloissa, jolloin mitattava kappale on siirrettävä. Mittausta työstökoneen sisällä välttää suurten kappaleiden siirron, jolloin säästetään aikaa. (Holub et al. 2018) Mittausta vaatii itsessään aikaa ja tarkkuus ei ole yhtä hyvä kuin koordinaattimittauskoneella, mutta tilanteen mukaan koneen sisäinen mittausta on parempi vaihtoehto.

5.1.2 Työkalun mittaus

Työkalun mittauksessa käytetään koneen sisäistä tai ulkopuolista mittausta. Koneen tuottavuuden maksimoimiseksi pyritään nostamaan koneen käyttöastetta. Käyttöastetta voidaan parantaa hyödyntämällä koneen ulkopuolista mittausta. Käytettävien työkalujen lukumäärä vaikuttaa mittaustapojen eroihin. Suurten työkalumäärien käyttö vaatii enemmän aikaa mittaukseen, jolloin tuottavuuden parantamiseksi mittaus on parempi suorittaa koneen ulkopuolella. Esiasetuslaitteen on tutkittu kasvattavan tuottavuutta 12,5 %:lla, kun kahdeksan tunnin vuoron aikana työkalunvaihtoja on kaksikymmentä (Smith 2008, s.254).

Ulkoisessa mittauksessa työkalun tieto siirretään manuaalisesti tai automaattisesti riippuen hyödynnettävistä ohjelmistoista. Koneen sisäinen mittaus ei vaadi erillistä tiedonsiirtoa, sillä kone suorittaa mittauksen itse. Työstökone hyödyntää mittaustulosta työstö-
ratojen korjaamiseen, jotta työstöjälki vastaa suunniteltua jälkeä. Työkaluilla on työstö-
ratojen suunnittelussa annettu nominaaliset arvot, jotka muuttuvat mittauksen jälkeen. (Fallah et al. 2019)

Koneen sisäistä mittausta käytetään työstö-
ratojen korjaamisen lisäksi työkalun työstön aikaiseen kunnon tarkistukseen, jossa verrataan työkalun mittaustulosta viime mittaukseen. Tuloksen poiketessa liian paljon, voidaan todeta työkalun olevan epäsopiva työstöön tai rikki ja säästyä mahdollisilta törmäyksiltä. Rikkinäisen työkalun tunnistus mahdollistaa automatisoinnin ja parantaa miehittämättömän työstön luotettavuutta. Mittauksen suorituksen tapahtuessa työstöprosessin aikana, se on suoritettava työstökoneen sisällä.

Mittaus mahdollistaa terän kuluneisuuden arvioinnin, jolloin terän kestävyyttä voidaan arvioida ja mahdollisesti käyttää teräpaloja pidempään, kuin suositeltu työstöaika teräpalalle. Työkalujen teräpaloja vaihdetaan liian usein välttääkseen terärikkoo kesken työstön, koska terän kuluneisuudesta ei ole tarpeeksi tietoa työstön jälkeen (Denkena 2013). Teräpalojen kesto arvioidaan empiirisillä malleilla ja keston arviointiin voidaan käyttää työstövoimien ja tärinän monitorointia tai teräpalan kuluneisuuden mittausta. Toistuva mittaus työstökoneen sisällä vaikuttaa koneen tuottavuuteen, joten koneenulko-
puolinen mittaus soveltuu paremmin terän kunnon tarkasteluun. Kuluneisuuden mit-
taus onnistuu ulkoisella esiasetuslaitteella, jolla saadaan kuluneisuuden arvo terälle ja kuva terästä, jota mittauksen suorittaja voi arvioida kokemuksen perusteella. Ehtona terä-
palan vaihdolle toimii terän kestoajan arvio. Terän kestoajan arvion ollessa pienempi verrattuna työstöaikaan, on teräpala vaihdettava uuteen (Denkena 2013).

5.2 Työstön kompensointi

Kompensointi voi tapahtua kompensoimalla työstörajoja kappaleen mittauksen jälkeen tai kompensoimalla työstökoneen virheitä kalibroimalla työstökoneen ohjausta ennen työstöä. Työstörajojen kompensointiin mittaus on suoritettava työstöprosessin aikana.

Kompensointia varten tarvitaan mittausdataa, josta johdetaan kappaleen virheet kompensointia varten. Matemaattisella virheiden mallinnuksella välitetään tieto työstörajoihin. Mallinnettavien virheiden lukumäärä riippuu työstökoneen akselien lukumäärästä. Akselien määrän kasvaessa virheiden määrä kasvaa ja myös kompensoinnin tärkeys korostuu. Kompensoinnin toteutus eroaa työstökoneiden välillä riippuen niiden konfiguraatioista. Kolmiakselisen työstön kompensointistrategia ei toimi viisiakselisen koneen kompleksisille muodoille ja niiden virheille (Huang et al. 2014).

Kompensoinnilla voidaan parantaa työstön tarkkuutta, mutta rajallisesti, sillä kaikista virheistä ei voida saada luotettavaa dataa. Kompensoinnin on oltava jatkuvaa, sillä työstöarvojen ja olosuhteiden muuttuessa kompensoinnin tehokkuus heikkenee. Monet virheet työstössä riippuvat työstömenetelmästä, työkaluista ja työstettävästä materiaalista. Riippuvuuksien takia kompensoinnin ja siihen vaadittavien mittausten tulisi olla osa prosessia. Kompensointi on keino, jota voidaan hyödyntää tarpeen mukaan riippuen työstöltä vaadittavista toleransseista. Mittaus on aikaa vievä prosessi, joten se vaikuttaa tuottavuuteen, jolloin on tehtävä kompromissi käytetyn ajan ja vaaditun tarkkuuden välillä.

5.2.1 Työstörajojen kompensointi

Työstörajojen kompensoinnilla tarkoitetaan työstetyn jäljen vertaamista työstörajojen nominaalisiin arvoihin. Mittaamalla pisteitä kappaleen pinnalta voidaan verrata tuloksia ideaaliseen tilanteeseen ja todeta mittavirheet. Työstörajoja voidaan muokata virheen verran, jotta työstöjälki olisi mahdollisimman lähellä haluttua jälkeä. (Huang et al. 2014) Työstöjälkeen vaikuttavien tekijöiden arviointi on haastavaa, mutta työstöjäljen mittaaminen on mahdollista ja siten myös työstörajojen kompensointi.

Työstörajojen kompensointi vaatii aina mittauksen enne kompensointia luotettavan tuloksen aikaansaamiseksi. Työstörajojen kompensointia varten olosuhteiden muutokset ovat minimoitava. Kappaleen koneistus lopulliseen kokoon on suoritettava viimeistelemällä kappale kahdesti, jolloin ennen mittausta on suoritettava viimeistely. Kahdesti viimeistelemällä saadaan luotettavaa ensimmäisestä viimeistelystä, kun olosuhteet ja työs-

töradat ovat mahdollisimman lähellä viimeistelykertojen välillä. Työstöprosessi on suunniteltava etukäteen, jotta koneistettavaa materiaalia on tarpeeksi viimeistelyn suorittamiseen kahdesti.

Jung et al. (2006) tutkivat kompensoinnin vaikutusta mittaamalla kappaleen ennen viimeistelyä. Tutkimuksessaan he käyttivät koskettavaa mittausta koneen sisäisessä mittauksessa, jossa kompensoidun työstön jälkeen kappaleessa esiintyneet virheet vähenivät lineaariakselien x,y ja z suuntiin 90, 78 ja 92 %. (Jung et al. 2006) He et al. (2012) tutkivat kappaleen lieriömyyden ja kohtisuoruuden virheitä ja saivat parannettua näitä 30,77 % ja 28,57 %, hyödyntämällä kappaleen paikoituksen mittausta ja kompensointia.

5.2.2 Työstökoneen kompensointi

Kompensoinnilla voidaan kalibroida työstökone ilman erillisiä mittalaitteita vaan hyödynnetään kappaleen mittaukseen soveltuvia mittavälineitä. Kalibrointi kappaleen mittauksella säästää aikaa verrattuna standardien mukaisiin kalibrointeihin. Kappaleen mittaus ei korvaa koneen kalibrointia standardien mukaisesti, mutta on apuvälineenä ja nopeampana vaihtoehto. Koneen kalibrointi kappaleen mittauksella mahdollistaa automatisoinnin ja tämän vuoksi nopeuttaa mittauksen suoritusta, sillä se ei vaadi osaavaa työntekijää kalibroinnin suorittamiseksi. Kalibrointia voidaan hyödyntää viisiakseliselle työstökoneelle. (Zimmermann & Ibaraki 2020)

Kalibroinnissa kompensoidaan lineaari- ja rotaatioakselien aiheuttamia virheitä. Virheiden todentamiseen voidaan hyödyntää koneistettua kappaletta tai esimerkiksi kalibroitua palloa referenssinä (Erkan et al. 2011; Zimmermann & Ibaraki 2020).

5.3 Joustava valmistus

Joustava valmistusjärjestelmä mahdollistaa tuotannossa pienet eräkoot ja tuotteen kustomoinnin asiakkaan tarpeen mukaan. Laaja valikoima ja tuotteiden kustomointi tuo valmistukseen haasteita, sillä tuotantoprosessi vaihtelee riippuen valmistettavasta tuotteesta. Työstön näkökulmasta olosuhteet muuttuvat jatkuvasti työstettävän tuotteen mukaan. Työstöratojen toimivuus, työkalujen vaihtuvuus ja työstettävien materiaalien vaihtuvuus kaikki vaikuttavat työstön onnistumiseen. Onnistumisen takaamiseksi olosuhteet ja näistä aiheutuvat virheet on otettava huomioon.

Mittausmenetelmien automatisointi työkalujen hallinnassa ja kappaleen mittauksessa mahdollistavat kompensoinnin ja laadun varmistamisen pienien eräkokojen valmistuksessa. Mittaukset ovat välttämättömiä laajan automatisoinnin ja miehittämättömän työn toteutuksen kannalta (Yoshimi & Takashi 2017, s. 155).

6. MITTAUSEPÄVARMUUS

Työstökoneen tarkkuus on valittava haluttujen toleranssien mukaan. Tarkemman koneen hankinta lisää kustannuksia ja ei ole kannattavaa. Työstökoneen tarkkuus on optimoitu kustannuksien suhteen. (Liang & Shih 2016, s.95) Tarkkuustyöstöön vaadittavat mittalaitteet pystyvät parempiin toistuvuuden arvoihin, joita seuraavissa luvuissa esitellään, mutta niiden hyödyntäminen ei ole tavallisessa työstössä kannattavaa.

Mittalaitteiden tarkkuutta kuvataan toistuvuuden avulla, sillä kaikkien mittalaitteiden tarkkuus riippuu niiden kalibroinnista. Mittaustulosten tarkkuuteen vaikuttaa suuresti mittausolosuhteet, jolloin mittalaitteen valinnalla on suuri merkitys.

6.1 Työkalun mittausepävarmuus

Työkalun mittauksessa laitevalmistaja Renishaw:n mukaan koneen sisäiset mittalaitteet jyrsinkoneille ovat toistuvuudeltaan $0,75\text{--}1,5\ \mu\text{m}$ (2σ) (Renishaw 2022). Koneen ulkoisen esiasetuslaitteen toistuvuus on laitevalmistaja Big Daishowa:n mukaan $<1\ \mu\text{m}$:n (2σ) (Big Daishowa 2022).

Työkalun mittauksen tarkkuus koneen sisällä riippuu syötöstä ja karan pyörimisnopeudesta. Nämä arvot vaikuttavat mittauksen aikaan, joten mittauksen tarkkuuden tarve on optimoitu ajan suhteen. (Smith 2008, s. 249–250)

Mittauksen olosuhteet vaikuttavat myös tulosten tarkkuuteen. Mitä lähemmäksi mittauksessa päästään työstön aikaista olosuhdetta, sitä enemmän mittaustulos kuvaa työkalun toimintaa työstön aikana. Olosuhteilla tarkoitetaan lämmön ja pyörimisliikkeestä aiheutuvia dynaamisia vaikutuksia.

Esiasetuslaitteella mittauksen olosuhde ei vastaa työstön olosuhdetta, jolloin mittauksen tarkkuus ei vastaa työstökoneen sisäistä tarkkuutta, vaikka mittausmenetelmien toistuvuudet ovat samaa kokoluokkaa. Esiasetuslaite on herkempi käyttäjävirheille, sillä mittaus on manuaalinen, jolloin mittatuloksen tarkkuus voi kärsiä.

6.2 Kappaleen mittausepävarmuus

Laitevalmistaja Renishaw:n mukaan kosketusmittalaitteet kappaleen mittaukseen vaihtelevat toistuvuudeltaan $0,25\text{--}2\ \mu\text{m}$ (2σ) välillä (Renishaw 2022). Toistuvuus on tässä kontekstissa yhden suunnan toistuvuus, koska mittaussuunta vaikuttaa mittaustulokseen.

Blecha et al. (2022) mukaan työstökone on suurin epävarmuustekijä mittauksessa. Työstökoneiden kalibrointi ja tarkkuus toimivat rajoittavina tekijöinä mittaustulosten tarkkuudelle. Mittalaitteiden tarkkuutta vaaditaan mittauksissa, ettei epätarkkuuksien summa mittauksissa kasva turhaan.

Holub et al. (2018) tutkivat työstökoneen soveltuvuutta kappaleen mittauksessa. Työstökoneella mitattiin kappaleen pituutta yhden akselin suunnassa, ja mittaustuloksen toleranssiksi saatiin 15 µm. Mittauksen toleranssi kasvaa tuotantoympäristössä, jos työstökoneen ja ympäristön lämpötilavaihteluita ei säädellä. Mittaustoleranssi ei kuvaa koko kappaleen mittausta, sillä tutkimuksen toteutuksen kannalta on käytetty vain yhtä akseliä. Kolmen tai viiden akselin mittauksessa toleranssi kasvaa. (Holub et al. 2018)

6.3 Mittalaitteiden kalibrointi

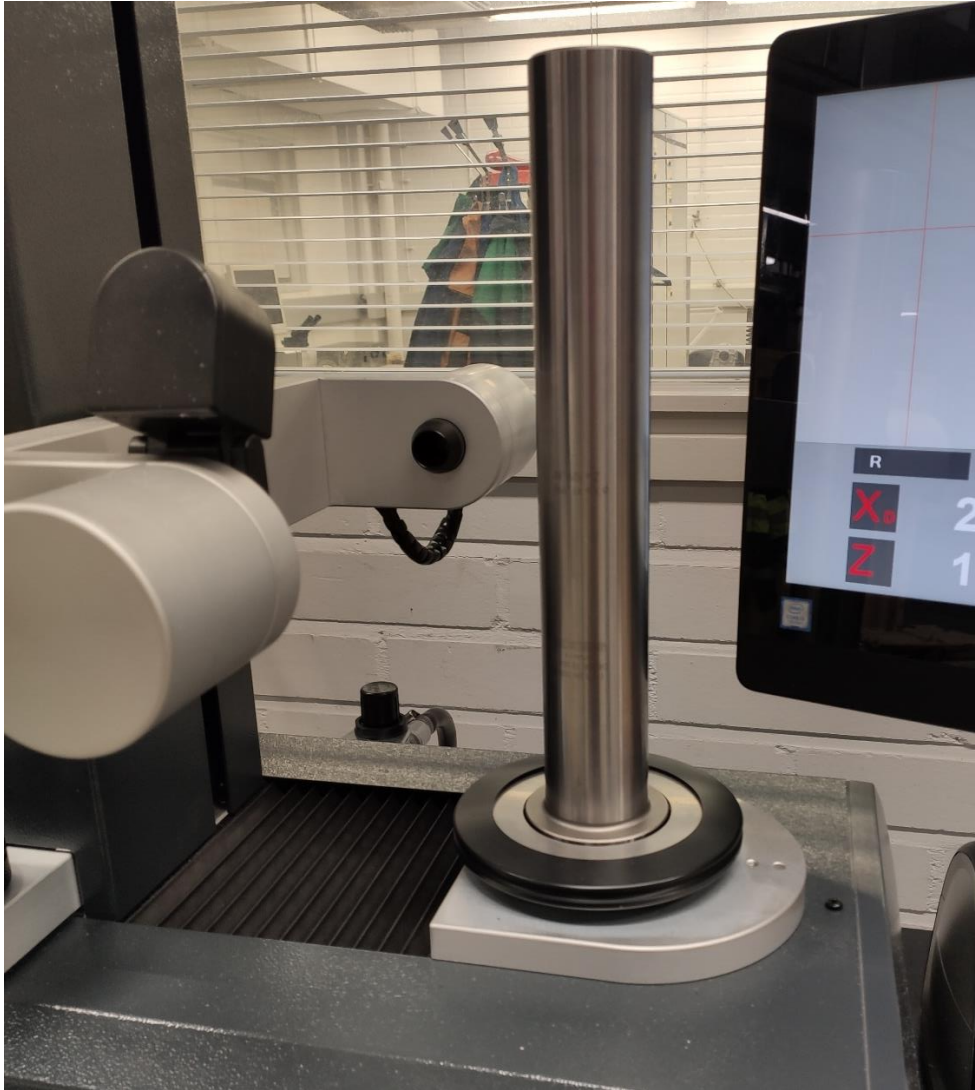
Mittavälineiden tarkkuus riippuu niiden kyvystä toistaa mittausta ja niiden kalibroinnista. Toistuvuuden arvo määräytyy mittalaitteen rakenteen mukaan ja laitevalmistaja ilmoittaa toistuvuuden arvon mittalaitteelle. Kalibrointi täytyy suorittaa tietyn aikavälein mittalaitteen tarkkuuden takaamiseksi. Kalibroinnilla pyritään minimoimaan systemaattinen virhe mittauksessa.

Koneen sisäisen työkalun mittauksen kalibroinnissa käytetään kalibrointia mittaesinettä, jota käytetään referenssinä. Mittaesineen tunnettuja mittoja verrataan mittalaitteella saattuihin mittaustuloksiin, joiden avulla määritetään mittalaitteen systemaattinen virhe. Esi-asetuslaitteen kalibrointi hyödyntää samankaltaista mittaesinettä, johon mittaustuloksia voidaan verrata.

Koskettavan mittalaitteen mittakärjen poikkeaman pituus kosketuksen todentamisessa on kalibroitava. Poikkeaman pituus riippuu mittaussuunnasta, jolloin kalibrointi on suoritettava eri mittaussuunnista. (Ihara & Nagasawa 2013; Li et al. 2020)



Kuva 4: Työkalun koneen sisäisen mittauksen kalibroinnissa käytettävä mittaesine



Kuva 5: Esiasetuslaitteen kalibroinnissa käytettävä mittaesine

7. PÄÄTELMÄT

Mittauksilla työstökoneen yhteydessä pyritään parantamaan työstökoneen tuottavuutta ja tarkkuutta. Viallisten kappaleiden valmistusta ehkäistään mittauksilla, jotka varmistavat työstön laatua. Eri mittausmenetelmillä voidaan myös lyhentää työstökoneen asetus-aikaa, jolloin tuottavuus kasvaa. Tarkkuutta voidaan parantaa kompensoimalla mittauksilla havaittuja virheitä ennen työstön viimeistelyä.

Työkalun paikoitus on pakollinen toimenpide työstön kannalta. Paikoittaminen voidaan suorittaa koneen sisäisesti tai ulkoisesti. Sisäisessä mittauksessa mittauksen olosuhteet ovat lähellä työstön olosuhdetta. Ulkoisella mittauksella voidaan säästää aikaa, kun mittauksen aikana voidaan työstää työstökoneella. Koneensisäistä mittausta hyödynnetään myös työkalun ehjyyden tarkistuksessa, jotta työstökoneetta voidaan käyttää miehittämättömänä.

Kappaleen mittausta hyödynnetään kappaleen paikoitukseen uudelleen kiinnityksen yhteydessä tai työstöjäljen arvioinnissa kompensointia varten. Kappaleen mittaus ei ole pakollinen, sillä sen tarvetta voidaan välttää uudelleen kiinnityksen ehkäisyllä ja nollapistekiinnittämisellä. Työstöjälkeä ei tarvitse kesken työstön seurata, jos työstökoneen tarkkuus on kappaleen toleransseihin nähden tarpeeksi tarkka, jolloin viallisen kappaleen valmistuksen todennäköisyys on pieni. Mittauksen suoritukseen hyödynnetään karaan kiinnitettävää mittalaitetta, jolla määritetään pisteitä kappaleen pinnalta. Kappaleen paikoitus voi säästää asetusajassa, jos käytössä ei ole nollapistekiinnitystä. Kappaleen mittauksessa tarkkuuteen vaikuttaa suuresti työstökoneen akselien liikkeiden tarkkuus, joten mittaustuloksien luotettavuus riippuu työstökoneesta.

Työstökoneen kalibrointi voidaan suorittaa kappaleen mittauksen periaatteella, jolloin kalibrointi voidaan automatisoida. Kalibroinnilla parannetaan työstökoneen ohjauksen tarkkuutta, jolloin mittavirheitä voidaan ehkäistä työstössä.

Mittausten tarvetta on arvioitava, sillä turha mittaaminen on aikaa vievää ja laskee tuottavuutta. Eri mittausmenetelmien kesken on myös valittava oikea. Kappaleen mittaukseen koskettava mittalaite on optista monipuolisempi. Optinen mittalaite kappaleen mittauksessa soveltuu taas paremmin yksinkertaisten vapaamuotoisten kappaleiden mittaukseen, sen nopeuden takia.

Mittausten hyöty korostuu joustavassa tuotannossa, jossa pienet eräkoot tuottavat haasteita työstöarvojen ja työstöjäljen ennakkoinnissa. Viallisten kappaleiden valmistus yksittäiskappaleiden tai muutaman kappaleen valmistuksessa aiheuttaa suuren prosentuaalisen vaikutuksen valmistuksen kuluihin.

Mittausten vaikutusta on vaikea arvioida, sillä niiden vaikutukset riippuvat valmistusprosessista. Tarvetta mittauksille on siis arvioitava jokaiselle prosessille erikseen. Mittaukset mahdollistavat suuren hyödyn tietyissä tilanteissa, jonka takia se on huomioitava mahdollisuutena parantaa työstökoneiden tuottavuutta ja tarkkuutta.

LÄHTEET

- Blecha, P., Holub, M., Marek, T., Jankovych, R., Misun, F., Smolik, J. & Marchalka, M. (2022). Capability of measurement with a touch probe on CNC machine tools. *Measurement: journal of the International Measurement Confederation*. Vol. 195. '
- Big Daishowa (2022). CNC Tool Presetters. Verkkosivu. Viitattu 4.12.2022
<https://www.bigdaishowa.com/en/products/measuring-instruments/tool-presetters>
- Chen, J.-Y., Lin, Y.-L., Lin, C.-C. & Lee, B.-Y. (2017). Development of inspection system for tool presetter. *Engineering for a Changing World: Proceedings; 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau*. Vol. 59.
- Cho, M.-W. & Seo, T.-I. (2002). Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on CAD/CAM/CAI integration. *International journal of advanced manufacturing technology*. Vol. 19, pp. 607–617.
- Denkena, B., Krüger, M. & Schmidt, J. (2014). Condition-based tool management for small batch production. *International journal of advanced manufacturing technology*. Vol. 74, pp. 471–480.
- Erkan, T., Mayer, R., Dupont, Y. (2011) Volumetric distortion assessment of a five-axis machine by probing a 3D reconfigurable uncalibrated master ball artefact. *Precision engineering*. Vol. 35 (1), pp. 116–125.
- Fallah, S. M., Trautner, T. & Pauker, F. (2019). Integrated tool lifecycle. *Procedia CIRP*. Vol. 79, pp. 257-262.
- He, G., Yang, B., Ding, B. & Jia, H. (2012). Modeling and Compensation Technology for the Comprehensive Errors of Fixture System. *Chinese journal of mechanical engineering*. Vol. 25, pp. 385–391.
- Holub, M., Jankovych, R., Andrs, O. & Kolibal, Z. (2018). Capability assessment of CNC machining centres as measuring devices. *Measurement*. Vol. 118, pp. 52-60.
- Huang, N., Bi, Q., Wang, Y. & Sun, C. (2014). 5-Axis adaptive flank milling of flexible thin-walled parts based on the on-machine measurement. *International journal of machine tools & manufacture*. Vol. 84, pp. 1–8.
- Ihara, Y. & Nagasawa, T. (2013). Fundamental study of the on-machine measurement in the machining center with a touch trigger probe. *International journal of automation technology*. Vol. 7, pp. 523–536.
- Li, S., Zeng, L., Feng, P., Yu, D. (2020) An accurate probe pre-travel error compensation model for five-axis on-machine inspection system. *Precision engineering*. Vol. 62, pp. 256–264.
- Liang, S. & Shih, A. J. (2016). *Analysis of Machining and Machine Tools*. 1st ed. 2016. New York, NY: Springer US.
- Lopez de Lacalle, N. & Lamikiz Mentxaka, A. (2009). *Machine Tools for High Performance Machining*. 1st ed. 2009. London: Springer London.

Nishikawa, S., Ohno, K., Mori, M. & Fujishima, M. (2014). Non-contact Type On-machine Measurement System for Turbine Blade. *Procedia CIRP*. Vol. 24, pp. 1–6.

Renishaw (2020). Probing systems for CNC machine tools. Pdf-dokumentti. Viitattu 4.12.2022. <https://www.renishaw.com/media/pdf/en/d4c5ab9c08f34402a560779ac1a65828.pdf>

Smith, G. T. (2008). *Cutting tool technology: industrial handbook*. London: Springer.

Smith, G. T. (2016). *Machine Tool Metrology: An Industrial Handbook*. 1st ed. Cham: Springer International Publishing.

Vieira, M., Baptista, E. A., Araki, L., Smith, S. & Schmitz, T. (2018). The role of tool pre-setting in milling stability uncertainty. *Procedia Manufacturing*. Vol. 26, pp. 164-172.

Yoshimi, I. & Takashi, M. (2017). *Theory and Practice in Machining Systems*. 1st ed. 2017. Cham: Springer International Publishing.

Zimmermann, N. & Ibaraki, S. (2020) Self-calibration of rotary axis and linear axes error motions by an automated on-machine probing test cycle. *International journal of advanced manufacturing technology*. Vol. 107 (5-6), pp. 2107–2120.

Zou, X., Zhao, X., Li, G., Li, Z. & Sun, T. (2017). Non-contact on-machine measurement using a chromatic confocal probe for an ultra-precision turning machine. *International journal of advanced manufacturing technology*. Vol. 90, pp. 2163–2172.