

Olli Rämö

# Mittajärjestelmän kehittäminen röntgenlaitteen liikkeille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

25.4.2017

Tekijä Otsikko	Olli Rämö Mittajärjestelmän kehittäminen röntgenlaitteen liikkeille
Sivumäärä Aika	42 sivua + 6 liitettä 25.4.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	R&D Manager Rurik Englund Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Insinöörityössä kehitettiin mekaaninen mittajärjestelmä röntgenlaitteen liikkeille. Työn tilaaja oli KaVo Kerr Group Tuusula. Yrityksen valmistamaan kuvantamislaitteeseen oli tehty muutoksia, jotka aiheuttivat kuvaustapahtumassa ylimääräisiä liikkeitä. Mittajärjestelmällä oli tarkoitus selvittää kyseiset liikkeet.</p> <p>Kuvaustapahtuman aikana röntgenlaitteen röntgenlähde ja detektori pyörähtävät potilaan pään ympäri. Pyörähtävä osa on nimeltään pyörijä, ja juuri siihen oli tehty muutoksia painon suhteen. Työssä haluttiin selvittää painonmuutosten aiheuttamat liikkeet ja niiden suunta.</p> <p>Pyörijään kehitettiin erikseen asennettava mittasauva, jolla voitiin tutkia pyörijän liikkeitä. Mittasauvan liikkeitä mitattiin laseretäisyysmittarilla ja mittakelloilla eri suunnista ja korkeuksilta, jolloin voitiin selvittää pyörijän siirtymät ja kallistumat.</p> <p>Mittajärjestelmällä päästiin hyviin toistotarkkuuksiin, mikäli mittavälineitä ei jouduttu asentamaan uudelleen kesken kokeiden. Uudelleen asennettaessa mittaustulosten tarkkuus kärsi niin paljon, että erikseen mitattuja tuloksia ei voitu vertailla keskenään.</p> <p>Painonmuutosten mittaamiseen menetelmä soveltui kuitenkin hyvin, sillä pyörijän painoa voitiin muuttaa koskematta mittajärjestelmään. Tuloksista saatiin selville, kuinka pyörijän painon muuttaminen vaikuttaa sen liikkeisiin ja erityisesti kallistumiseen. Testeissä myös ilmeni, kuinka pyörijän sivuttaissuuntainen asema vaikuttaa oleellisesti pyörijän liikkeisiin.</p>	
Avainsanat	Mittajärjestelmä, röntgenlaite, mittaaminen, mittausepävarmuus

Author Title	Olli Rämö Measurement System for X-Ray Device Movements
Number of Pages Date	42 pages + 6 appendices 25 April 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructors	Rurik Englund, R&D Manager Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>In this Bachelor's thesis, a mechanical measurement system was developed for the movements of an x-ray device. The project was commissioned by KaVo Kerr Group Tuusula. An imaging device developed by the company had been modified resulting in excessive movements during imaging tests. The aim of this thesis was to define such movements using the measurement system.</p> <p>During imaging, the x-ray source and the detector of the x-ray device rotate around a patient's head. The weight of this rotating component, the rotating unit, had been modified. Therefore, this thesis aimed to determine the movements and directions caused by the weight adjustments.</p> <p>A separately installable measurement rod for the rotating unit was developed to determine the movements of the rotating unit. The movements of the rod were measured with a laser rangefinder and dial indicators in different directions and heights. This allowed for the examination of movements and inclinations of the rotating unit.</p> <p>The measurement system leads to good precision if the measurement devices did not have to be reinstalled during testing. When reinstalled, the precision of the measurement results was affected to the extent that the separately measured results could not be compared.</p> <p>In conclusion, it was discovered that the system was well suited for measuring weight modifications because it was possible to adjust the weight of the rotating unit without touching the measurement system. The results revealed that adjusting the weight of the rotating unit has an effect on its movements and particularly on its inclination. The tests also revealed that the lateral position of the rotating unit has a substantial effect on the movements of the rotating unit.</p>	
Keywords	Measurement system, x-ray device, measuring, measurement uncertainty

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Röntgenkuvanlaatuun vaikuttavat tekijät	2
2.1	Röntgenlaitteen parametrit	2
2.2	Sironta	3
2.3	Liikkeet ja geometrian vääristymät	4
3	Mittausmenetelmät ja mittauksen epävarmuus	5
3.1	Mittausmenetelmät	5
3.1.1	Mittakellot	5
3.1.2	Laseretäisyysmittaus	7
3.1.3	Lineaaripotentiomietrit	8
3.1.4	Ultraäänimittaus	9
3.2	Mittauksen epävarmuus	9
3.2.1	Mittavirheet	9
3.2.2	Epävarmuus ja epätarkkuus	10
3.2.3	Epävarmuuden määrittäminen	11
4	Tutkimuksen kohteena oleva röntgenlaite	12
4.1	Käyttötarkoitus	12
4.2	Tekniset ominaisuudet	13
4.3	Osat ja liikkeet	14
4.4	Kuvaustapahtuma	16
5	Mittausjärjestelyt	17
5.1	Mitattavat suureet	17
5.2	Tilastollinen koejärjestelmä	18
5.3	Mittaukstopahtuman suunnittelu	18
5.4	Mittavälineiden valmistus	20
5.5	Mittalaitteiden asennus	22
5.6	Mittajärjestelmän tarkkuuden arviointi	24

6	Mittausten suorittaminen ja tulokset	25
6.1	Toistettavuus	26
6.2	Painonmuutostestit	32
6.2.1	Testien suorittaminen	32
6.2.2	Oikean reunan tulokset	34
6.2.3	Vasemman reunan tulokset	36
7	Jatkokehitys	38
8	Yhteenveto	40
	Lähteet	41

#### Liitteet

Liite 1. Mittasauvan suoruuden mittaustulokset

Liite 2. Keyence LK-H152, tekniset tiedot

Liite 3. Mitutoyo 2046S, tekniset tiedot

Liite 4. Brown & Sharpe JET 512K, tekniset tiedot

Liite 5. Painonmuutosmittaus 1. Pyöräjän X-aseman oikean laidan tulokset (vain työn tilaajan käyttöön)

Liite 6. Painonmuutosmittaus 2. Pyöräjän X-aseman vasemman laidan tulokset (vain työn tilaajan käyttöön)

## 1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on kehittää mekaaninen mittajärjestelmä röntgenlaitteen kuvaustapahtuman aikaisille liikkeille. Mittajärjestelmän avulla pyritään selvittämään laitteen muuttuneiden mekaanisten osien ja kuvanlaadun välinen riippuvuus. Mittajärjestelmän tulee olla helposti asennettavissa ja sillä pitää voida mitata laitteen liikkeitä ilman, että laitteeseen tarvitsee kytkeä virtaa päälle. Kehitettävää mittajärjestelmää olisi tarkoitus jatkossa hyödyntää tuotekehityksen apuna, sekä sitä voitaisiin soveltaen käyttää myös muiden röntgenlaitteiden tutkimuksissa.

KaVo Kerr Group Tuusulan valmistamaan pään alueen kuvantamislaitteeseen on tehty muutoksia, joissa sen mekaanisia osia on vaihdettu kevyempiin. Laite pyörähtää kuvaustapahtuman aikana potilaan pään ympäri, ja juuri laitteen pyörähtävään osaan on tehty kyseiset muutokset. Muutosten myötä laite on alkanut tekemään uusia ja ennustamattomia, virheellisiä liikkeitä, joiden suuruutta ja suuntaa ei tiedetä. Virheelliset liikkeet ovat suuruusluokaltaan varsin pieniä, mutta ne saattavat pahimmillaan heikentää laitteella saatavaa röntgenkuvanlaatua.

KaVo Kerr Group Tuusula (entinen PaloDEx Group Oy) on terveysteknologian vientiyri-  
tys, jonka toimialana on suunnitella ja valmistaa laitteistoja hampaiston ja pään alueen kuvantamiseen. Yrityksen pääkonttori sijaitsee Tuusulassa, jossa suunnittelun ja markkinoinnin lisäksi, laitteet myös valmistetaan. [1.]

Tämän työn tutkimuksen kohteena ovat röntgensäteilyä kuvantamiseen käyttävät laitteet. Säteily luodaan törmäyttämällä elektroneja metallista anodia kohti, jolloin anodin atomit virittyvät uusille energiatasoille. Virittyneet atomit purkautuvat välittömästi lähettäen samalla röntgensäteilyä. Röntgensäteily ohjataan kuvattavaan kohtaan, jonka takana oleva sensori vastaanottaa lävitse päässeet säteet. Säteily siis läpäisee pelkästään kohteen pehmytkudokset, jolloin kovakudoksista saadaan muodostettua kuva. [2; 3.]

## 2 Röntgenkuvanlaatuun vaikuttavat tekijät

Röntgenkuvantamisen tarkoituksena on saada potilaasta mahdollisimman tarkka anatominen kuva. Röntgenkuvauksessa on tärkeää erottaa ihmisen eri kudostyyppit toisistaan, jotta kuvan tulkitseminen on ylipäättään mahdollista. Mitä tarkempaan kuvanlaatuun päästään, sitä luotettavammin voidaan kuvia tulkita.

Kuvanlaatuun vaikuttaa moni tekijä, joista suuri osa on sidottu laitteen tehoon ja suoriutuskykyyn. Kuvaustapahtuman aikaiset virheet ovat kuitenkin myös erittäin merkittäviä laatuun vaikuttavia tekijöitä. Seuraavissa kappaleissa perehdytään kuvanlaatuun vaikuttaviin tekijöihin ja mahdollisiin virhelähteisiin.

### 2.1 Röntgenlaitteen parametrit

Laitteen asetukset ja parametrit määrittävät, minkälaisia kuvia voidaan laitteella ylipäättään ottaa. Kehon eri anatomiset alueet vaativat erilaiset lähtöarvot säteilyn laadulta. Valittu röntgenlähteen anodimateriaali määrittää suoraan, minkä tyyppistä säteilyä laite lähettää, mutta muita säteilyn laatuun vaikuttavia parametreja voidaan yleensä hienosäätää kuvaustapahtuman mukaisesti. Muokattavia parametreja, jotka vaikuttavat säteilyn laatuun, ovat röntgenputkessa käytetty jännite ja virta, sekä röntgenlähteen suodatus.

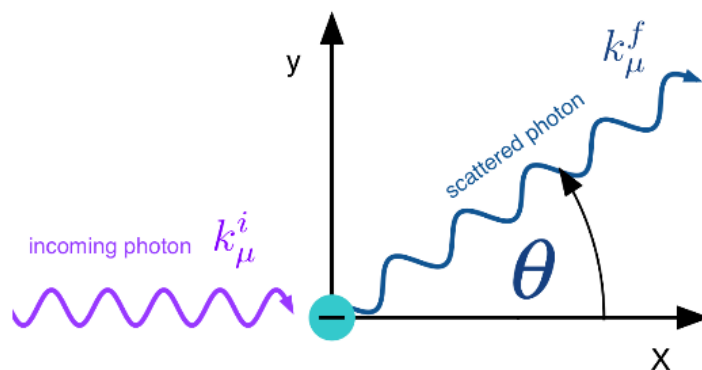
Jännitteen suuruus vaikuttaa röntgensäteiden aallonpituuteen. Jännitettä kasvattamalla röntgensäteiden aallonpituus pienenee ja lähtevien fotonien energia kasvaa. Fotonit läpäisevät kohteen helpommin, jolloin kuvan kontrastia saadaan parannettua. Myös potilaaseen kohdistuva säderasitus pienenee jännitettä kasvatettaessa. Anatomisesti erilaisille alueille käytetään erisuuruisia jännitteitä, jolloin kuvalle saadaan halutut ominaisuudet. [4, s. 186 - 190.]

Virtaa kasvattamalla voidaan lisätä röntgenlähteestä lähtevien fotonien lukumäärää. Virran suuruus ei vaikuta yksittäisten fotonien energian määrään. Fotonien määrää kasvattamalla saadaan lisää tarkkuutta kuvaan, ja myös altistusaikaa kasvattamalla saadaan kasvatettua kohteeseen osuvien fotonien kokonaismäärää. Aikaa lisäämällä tosin potilaan liikkeestä aiheutuvien virheiden määrä kasvaa, mutta virtaakaan ei voi lisätä rajattomasti, sillä se taas kuormittaa röntgenputkea. [4, s. 184 - 186.]

Suodatuksen avulla voidaan määrittää, minkä energiatason omaavat fotonit pääsevät kohteeseensa. Kuvauksen aiheuttamia haittoja voidaan vähentää suodattamalla matalaenergisiä fotoneita pois. Tarpeeksi matalan energiatason omaavat fotonit eivät läpäise pehmytkudoksia, mutta aiheuttavat soluissa muutoksia. Toisaalta erityyppisissä kuvauksissa saatetaan haluta suodattaa pois korkean energiantason fotoneita kontrastin parantamiseksi. Suodattimet sijaitsevat röntgenlähteen edessä, ja yleensä ne ovat muutaman mm:n paksuisia alumiini- tai kuparilevyjä. [2.]

## 2.2 Sironta

Sironnalla tarkoitetaan tässä tapauksessa Compton-sirontaa, jossa fotonin suunta ja aallonpituus muuttuvat sen osuessa kohteeseensa (kuva 1). Sironnut foton osuu väärään paikkaan säteitä keräävässä detektorissa ja täten heikentää saatavan kuvan laatua. Röntgenaaltojen sironta on lähes yhtä todennäköistä kaikkiin suuntiin, joten sen ennustaminen on hyvin vaikeaa. Sirontaa voidaan kuitenkin pienentää useilla eri keinoilla, ja sen minimoiminen on yksi tärkeistä kuvanlaatuun vaikuttavista tekijöistä. [2.]



Kuva 1. Fotonin Compton-sironta varautuneesta partikkelista. Sironneen fotonin aallonpituus ja suunta muuttuvat törmäyksen jälkeen. [5.]

Sirontaa voidaan pienentää kuvausteknisillä keinoilla, kuten rajoittamalla kuvan kokoa mahdollisimman pieneksi tai lisäämällä potilaan ja detektorin välistä etäisyyttä. Etäisyyttä kasvatettaessa sironneet säteet ehtivät väistää detektorin ja jatkavat matkaa detektorin ohitse. Varsin yleinen ja käytetty keino on myös lisätä hila kuvattavan kohteen ja detektorin väliin. Hila päästää lävitseen vain hilan rakojen suuntaiset säteet, jolloin sironneet säteet pysähtyvät hilaan. [2.]



Sirontaa pyritään pienentämään myös laskemalla röntgenlähteen jännitettä. Matalammilla energiatasoilla olevien fotonien Compton-sirontakulma on suurempi, jolloin sironneet fotonit väistävät helpommin detektorin. Jännitteen laskeminen kuitenkin kasvattaa potilaaseen kohdistuvaa säderasitusta. [2.]

### 2.3 Liikkeet ja geometrian vääristymät

Kuvaustapahtuman aikaiset virheliikkeet vaikuttavat kriittisesti kuvanlaatuun. Haitalliset liikkeet voivat olla joko potilaasta tai laitteesta johtuvia. Myös geometrian vääristymät saavat aikaan kuvanlaadun heikkenemistä.

Kuvanlaatuun vaikuttaa eniten potilaan liikkumattomuus. Potilaan kuvauksen aikainen liike saattaa pilata kuvan, jolloin kuvaus joudutaan uusimaan. Virheiden eliminoimiseksi potilas yleensä pyritään tukemaan kuvaustapahtuman ajaksi paikoilleen. Joissain kuvaustyypeissä jopa potilaan hengitys tai sydämenlyönti saattaa aiheuttaa kuvanlaadun heikkenemistä. Kuvasajan minimoinnilla voidaan kuitenkin helpoiten vähentää liikkeiden aiheuttamien häiriöiden ilmaantumista. Nykyisiin laitteisiin tehty ohjelmia, jotka osaa- vat jonkin verran kompensoida liikkeistä aiheutuvia virheitä. [2.]

Laitteen omat virheliikkeet aiheuttavat suuria heikentymiä saatavaan kuvanlaatuun. Oikeastaan laitteen stabiilius määrää maksimaalisen kuvantamistarkkuuden. Mikäli laitteen kuuluu liikkua kuvaustapahtuman aikana, on liikkeiden aiheuttamien virheiden ilmaantumistodennäköisyys huomattavan suuri. Laitteen tekemiä virheitä voivat olla esimerkiksi kallistumat, värähtelyt, nykäykset, pysähdykset jne. Ensisijaisesti virheet tulisi poistaa, mutta mikäli virheet ovat toistuvia ja säännönmukaisia, voidaan niitä yleensä kompensoida kuvaustapahtuman jälkeen tietokoneohjelmien avulla. [4, s. 196; 2.]

Geometrian vääristymistä johtuvien virheiden takia kuvanlaatu kärsii varsin paljon. Geometrisiä virheitä syntyy, mikäli kuvauksen keskipiste ei ole oikeassa kohdassa. Kuvan keskipisteen siirtyminen voi johtua sekä potilaasta että laitteesta. Potilaan asemointi väärin kuvan keskipisteeseen nähden on varsin tavallista, mutta myös laitteen sijainti kuvan keskipisteeseen nähden saattaa muuttua kesken kuvaustapahtuman. Varsinkin kuvattaessa liikkuvilla tai pyörivillä laitteilla, kuvan keskipisteen siirtymät ovat varsin tavallisia kuvanlaatuun liittyviä virheiden aiheuttajia. [4, s. 192 - 196.]

### 3 Mittausmenetelmät ja mittauksen epävarmuus

#### 3.1 Mittausmenetelmät

Työn tutkimuksen kohteena ovat röntgenlaitteen mekaaniset siirtymät, joten seuraavissa kappaleissa esitellään aseman mittaamiseen sopivia mittausmenetelmiä. Vain sellaiset menetelmät on valittu mukaan esittelyyn, jotka ovat kelvollisia ja joita harkittiin työn aiheena olevan ongelman ratkaisemiseen.

##### 3.1.1 Mittakellot

Mittakellojen toiminta perustuu mittauskaraan, jonka kärjellä kosketetaan mitattavaa kohdetta. Mittauskaran lineaarinen liike muutetaan kellon mekanismista riippuen näytölle mittauslukemaksi. Palautusvoiman karalle antaa kierrejousi, jonka jäykkyys määrää tarvittavan mittausvoiman. [6.]

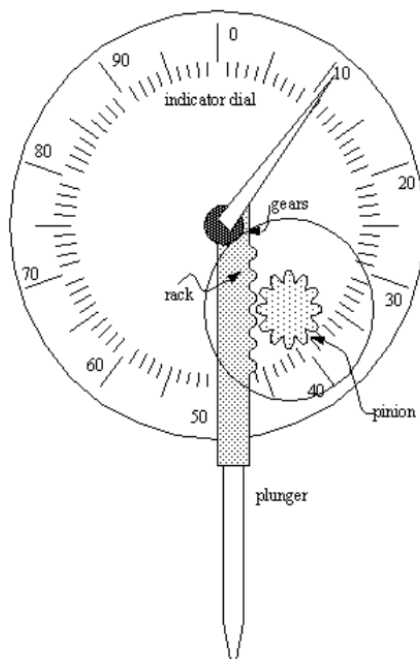
Mittakellot soveltuvat erityisen hyvin pyörivien osien liikkeiden ja epäkeskisyyksien mittaamiseen. Haasteen tuo niiden asentaminen kohtisuoraan kellon kärkeen nähden. Mittakelloille on saatavissa pyöreitä ja tasaisia mittauskärkiä, jotka soveltuvat eri mittauskohteisiin. Tasaiset mittauskärjet soveltuvat hyvin pyöreiden pintojen mittaamiseen, kun taas pyöreillä mittauskärjillä voidaan helposti mitata tasaisia pintoja. [6.]

Mittakellon kiinnityksen on oltava tukeva, jotta mittautuloksista saadaan luotettavia. Yleensä mittakelloja käytetäänkin niille suunniteltujen mittakellonjalkojen kanssa, jotka mahdollistavat kellon tukevan kiinnityksen ja kärjen tarkan asemoinnin. Mittakellonjalat ovat käytännössä nivellettyjä kiinnitysvarsia, jotka kiinnittyvät alustaan magneeteilla.

Mittakelloja on analogisia ja digitaalisia, joiden toimintaperiaate poikkeaa hieman toisistaan. Seuraavaksi perehdytään mittakellojen eri toimintamekanismeihin.

## Analoginen mittakello

Analogisessa mittakellossa karasta on tehty hammastanko (kuva 2), joka muuttaa hammaspyörän avulla karan siirtymän osoittimen pyöriväksi liikkeeksi. Mittaustarkkuus on tyypillisesti 0,01 mm ja mitta-alue noin 10 mm. Kuitenkin tarkimmilla analogisilla mittakelloilla voidaan päästä jopa 0,001 mm:n mittaustarkkuuteen. [6.]



Kuva 2. Analogisen mittakellon toimintaperiaate [7].

Analogiset mittakellot ovat hyvin helppokäyttöisiä ja varsin tarkkoja, joten ne soveltuvat moniin käyttötarkoituksiin. Haittoina voidaan lähinnä pitää koneiston sisäistä kitkaa ja mittaustarkkuuden heikkenemistä kulumisen myötä. [6.]

## Digitaalinen mittakello

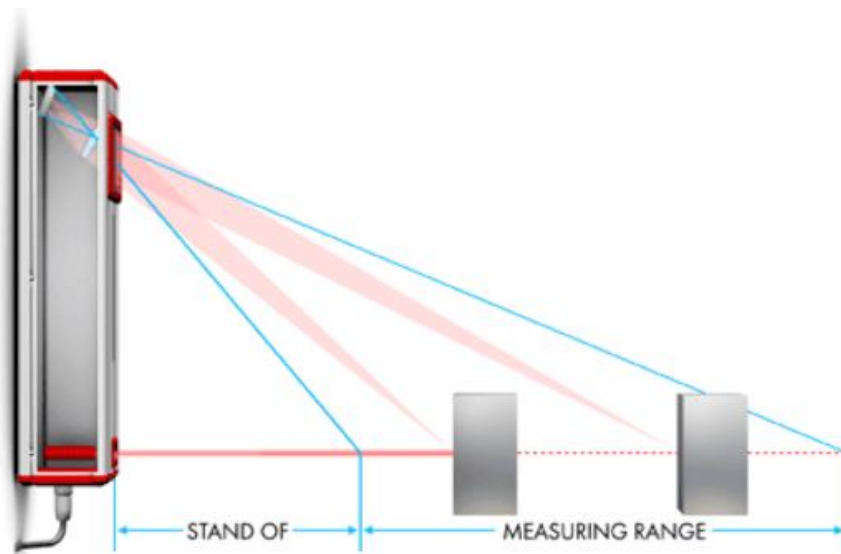
Digitaalisten mittakellon toiminta perustuu lineaarisen enkooderin ja asteikon väliseen toimintaan. Mitta-asteikko on tehty mittakellon karaan, joka kulkee enkooderin lävitse. Digitaalisilla mittakelloilla päästään yleensä 0,001 mm:n mittaustarkkuuteen. [8.]

Digitaalisten mittakellojen lisähyötyjä, suuremman tarkkuuden lisäksi, on tiedon siirto suoraan tietokoneelle. Mittaustulosten käsittely- ja lukuvirheitä saadaan minimoitua, ja lisäksi tiedon kerääminen liikkeen aikana on mahdollista.

### 3.1.2 Laseretäisyysmittaus

Laseretäisyysmittauksessa käytettävät anturit voivat perustua joko kolmiomittaukseen, taajuusmuutokseen tai valon kulkuajan laskemiseen. Kaikissa tapauksissa mittalaite lähettää lasersäteen, joka heijastumisen jälkeen osuu mittalaitteen detektoriin.

Kolmiomittauksessa detektori on hieman eri paikassa säteen lähettimeen nähden. Kun näiden välinen etäisyys tunnetaan tarkasti, voidaan laskea heijastuneen säteen kulman avulla etäisyys geometrisesti (kuva 3). Kolmiomittauksen avulla päästään hyvin tarkkaan etäisyyden mittaustulokseen. [9; 10.]



Kuva 3. Kolmiomittauksen toimintaperiaate [10].

Taajuusmuutoksen avulla laskettaessa lähetetään pitkä pulssi, jonka taajuutta muutetaan tasaisesti. Takaisin heijastuneen pulssin ja lähtevän pulssin vaihesiirtymästä voidaan laskea kuljettu matka. Kuitenkin kaikkein yksinkertaisin laserin avulla suoritettava mittausten menetelmä on laskea valon kulku-aika. Valonnopeus on vakio, joten matkan selvittämiseksi täytyy vain laskea säteen lähettämisestä heijastuksen vastaan ottamiseen kulunut aika. [9.]

Laseretäisyysmittareiden merkittävä etu on niiden kosketuksettomaan mittaukseen perustuva toiminta. Mittarit eivät kulu mekaanisista rasituksista, ja ne soveltuvat hyvin eri pinnoille ja muodoille. Myös sellaisia laseretäisyysmittareita on saatavilla, joilla voidaan

mitata nesteiden tasoja tai hyvin kuumia pintoja. Laseretäisyysmittarit soveltuvat kuitenkin erittäin hyvin tarkkuutta vaativiin mittauksiin, ja tarkimmilla mittareilla voidaan päästä jopa mikrometrin tarkkuuteen. [9.]

### 3.1.3 Lineaaripotentiometrit

Potentiometreissä mittaus perustuu resistanssin muutokseen. Mittalaite koostuu vastusmateriaalista ja liukukontaktista, joiden välistä resistanssia mitataan. Lineaaripotentiometreillä mitattaessa mittalaitteen kärki säätää vastusmateriaalin pituutta, jolloin resistanssi muuttuu samassa suhteessa. Tyypillinen tarkkuustyöhön suunniteltu lineaaripotentiometri näkyy kuvassa 4. [11.]



Kuva 4. Lineaaripotentiometri [12].

Lineaaripotentiometreilla päästään parhaimmillaan alle mikrometrin mittaustarkkuuteen, joten se soveltuu varsin hyvin tarkkuutta vaativiin mittaushetkeisiin. Kuten kaikilla kosketukseen perustuvilla mittaushetkeillä, vaatii lineaaripotentiometri mitattaessa karalle mittaushetkeä, joka saattaa muuttaa mittaushetkeä. Myös karan asentaminen kohtisuoraan mitattavaa pintaa vasten voi aiheuttaa mittaushetkeen epätarkkuutta. Edellä mainitut haitat ovat yleensä kuitenkin minimaalisia, ja lähinnä ainoana merkittävänä huonona puolena voidaan pitää mekaanisten osien kulumista ja tämän myötä mittaushetken heikkenemistä. [11.]

### 3.1.4 Ultraäänimittaus

Ultraäänellä etäisyyttä mitattaessa yleisin toimintaperiaate on kaikumittaus. Ultraäänisensori lähettää ääniaallon mitattavaan kohteeseensa, jonka kaiku pyritään tallentamaan. Mittaaminen perustuu ääniaallon käyttämään aikaan mitattavan kohteen ja mittarin välillä. [13.]

Ultraäänimittauksen etuja ovat mittalaitteiden edullisuus ja niiden kesto mekaanisia rasituksia kohtaan. Parhaimmillaan ne ovat kohteissa, joissa täytyy mitata epäsäännöllisen pinnan muotoa, tai useampaa kohdetta samanaikaisesti. Nestepintojen mittaaminen sekä väliaineiden lävitse mittaaminen onnistuu myös ultraäänimittareilla. Tarkimmilla ultraäänimittareilla voidaan päästä jopa 0,05 %:n mittaustarkkuuteen suhteessa mittausalueeseen. Tosin ilman lämpötila täytyy tuntea, jotta mittaustuloksista saadaan tarkkoja. [13; 14.]

## 3.2 Mittauksen epävarmuus

Mitattaessa syntyy virheitä, joten mittaustuloksiin liittyy aina epävarmuutta. Tässä luvussa käydään läpi eri virhetyypit ja niiden aiheuttaman epävarmuuden huomioiminen.

### 3.2.1 Mittavirheet

Mittavirheellä tarkoitetaan väärän arvon saamista mittaustuloksista. Mittavirheet voidaan jakaa kolmeen eri virhetyyppiin, jotka tulee huomioida sekä mittaustilanteessa että mittaustuloksia käsitellessä.

Mittaustapahtumassa toistuvaa ja säännönmukaista virhettä kutsutaan systemaattiseksi virheeksi. Virhe johtuu yleensä mittalaitteesta tai mittauksen suorittajasta. Mittalaitteen kalibrointi tai mittalaitteen virheellinen lukeminen ovat yleisiä syitä systemaattisen virheen ilmaantumiselle. Myös ulkoiset tekijät, kuten lämpötilan muutoksien huomiotta jättäminen, voivat aiheuttaa mittaustuloksiin systemaattisia virheitä. Systemaattinen virhe tulee löytää, sen merkitys arvioida ja lopuksi poistaa. Mikäli systemaattista virhettä ei voida poistaa, tulee se käsitellä yhdessä muiden virheiden kanssa. [15; 16.]

Satunnaisvirheet ovat virheitä, joiden ilmaantuminen tai suuruus eivät ole säännönmukaisia. Satunnaiset virheet harvoin vääristävät merkittävästi tuloksia, mutta niiden olemassaolo voidaan todeta toistamalla sama mittaustuloksia useaan kertaan. Satunnaisvirheet erottuvat tuloksista yksittäisinä poikkeamina, jotka voidaan yleensä jättää huomiotta. Histogrammi on hyvä apuväline satunnaisvirheiden poistoon, sillä sen piirtämisellä saadaan mittaustuloksista jakauma, josta satunnaisvirheet erottuvat selkeästi. [15; 16.]

Karkeat virheet syntyvät mittalaitteen epätarkoituksenmukaisesta käsittelystä tai mitta-asteikon vääristä lukemisesta. Myös mittalaitteen toimintahäiriöt tai tietojen tallennuksessa tapahtuvat virheet aiheuttavat karkeita virheitä. Karkeat virheet tulee poistaa kokonaan mittaustuloksista ja niitä ei enää oleteta olevan mittaustuloksia tulkittaessa. Karkeita mittavirheitä voidaan minimoida käyttämällä digitaalisia mittavälineitä, jolloin ihmisen tekemien virheiden mahdollisuus pienenee. [15.]

### 3.2.2 Epävarmuus ja epätarkkuus

Epävarmuus kertoo mittausten odotetun vaihtelun eli sen, millä välillä saatu mittaustulos sijaitsee tietyn tilastollisen todennäköisyyden mukaan. Epävarmuutta voidaan arvioida mittaustulosten hajonnalla, johon vaikuttavat satunnaisvirheet. Mikäli epävarmuuden haluaa esittää virheiden absoluuttisina määrinä, lasketaan mittaustulosten jakaumalle tilastollinen luottamus- tai varmuusväli. Ilman mittauksen epävarmuuden määrittämistä mittaustulosta ei voida pitää jäljitettävänä, joten silloin mittaustulos ei ole kunnolla vertailukelpoinen edellisiin tuloksiin tai referenssiarvoihin. [17, s. 67; 5.]

Mikäli mittaustuloksista ei ole poistettu tai ei pystytä poistamaan systemaattisia virheitä, puhutaan mittausepätarkkuudesta. Epätarkkuus siis ilmoittaa mittauksen kokonaisvirheiden määrän. [15.]

### 3.2.3 Epävarmuuden määrittäminen

Mittausten epävarmuus voidaan määrittää toistokokeiden perusteella. Seuraavissa epävarmuuslaskuissa käytetään standardiepävarmuutta, joka vastaa keskihajontaa ja normaalijakauman 68 %:n luottamusväliä. Luottamusväli siis kertoo, kuinka suurella todennäköisyydellä saatu mittaustulos esiintyisi toistettaessa kyseisellä luottamusvälillä. [17, s. 67]

Jos halutaan tietää, kuinka paljon yksittäiset mittaustulokset keskimäärin poikkeavat keskiarvosta, lasketaan niiden keskihajonta kaavalla (1) [17, s. 65].

$$s = \sqrt{\frac{\sum_n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$s$  on arvio keskihajonnalle

$n$  on mittaustulosten lukumäärä

$x_i$  on mittaustulos

$\bar{x}$  on mittausten keskiarvo

Kaikkien mittaustulosten keskiarvon epävarmuutta kuvaa keskiarvon keskihajonta, joka lasketaan kaavalla (2). Keskiarvon keskihajonta ilmoittaa koko testin toistotarkkuuden, ja sitä voidaan käyttää verrattaessa toistotestien toistettavuutta keskenään. [17, s. 66]

$$\sigma_s = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

$\sigma_s$  on keskiarvon keskihajonta



## 4 Tutkimuksen kohteena oleva röntgenlaite

Tässä kappaleessa esitellään tutkimuksen kohteena oleva laite, jotta myöhemmin on helpompi ymmärtää laitteelle tehtyjen mittausten merkitystä. Laitteen tärkeimpään ominaisuuteen eli kuvantamiseen ei kuitenkaan tässä työssä perehdytä kovin syvällisesti, sillä painoarvo on mittausjärjestelmän kehittämisessä laitteen liikkeille.

### 4.1 Käyttötarkoitus

Tutkimuksen kohteena oleva laite on myyntinimeltään Orthopantomograph OP 300 Digital Panoramic X-Ray System (kuva 5). Laite on tarkoitettu seisovan potilaan pään alueen kuvantamiseen. Laitteella on mahdollista ottaa koko suun alueen kattavia panoraamakuvia, sekä 3D-kuvia, joilla voidaan luoda malli potilaan kallostä. Laite on myös mahdollista varustaa cephalo-kuvantamisominaisuudella, jolloin otetaan vain yksi kuva potilaasta suuremmalla säteilyn intensiteetillä. [18.]



Kuva 5. Tutkimuksen kohteena oleva röntgenlaite Orthopantomograph OP 300 [19].

## 4.2 Tekniset ominaisuudet

Seuraavassa esitetään laitteen parametrit, joista suurin osa on säädettävissä kuvausta-  
pahtuman mukaiseksi. Huomiota kannattaa kiinnittää lähinnä skannaus- ja altistusaiko-  
jen pituuteen. [18.]

### Yleiset tiedot laitteesta

- generaattori 75 - 150 kHz
- polttopiste 0,5 mm IEC 336
- röntgenputken jännite 57 - 90 kV
- röntgenputken virta 3,2 - 16 mA

### Panoraamakuvaus

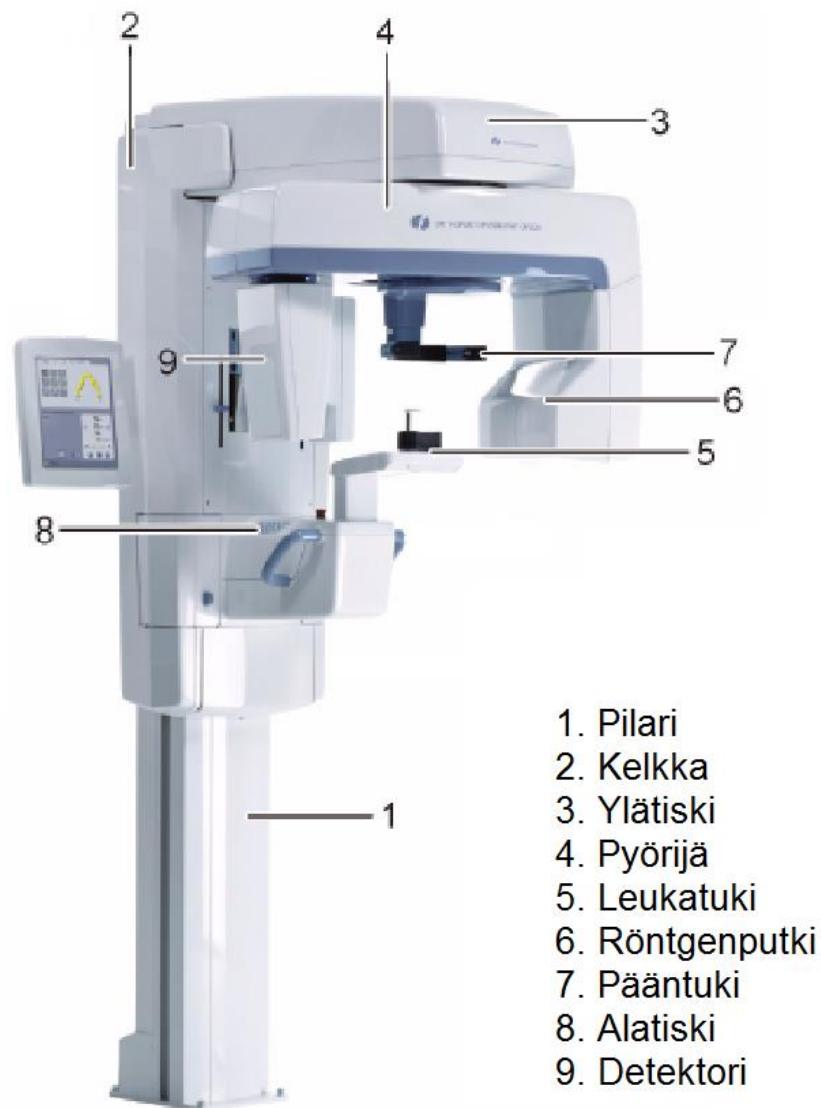
- kuvan pikselikoko 100  $\mu\text{m}$
- skannausaika 8,6 - 16,1 s
- altistusaika 8,6 - 16,1 s
- kuvan korkeus 151 mm

### 3D-kuvaus

- kuvan vokselikoko 85 - 420  $\mu\text{m}$
- skannausaika 10 - 40 s
- altistusaika 1,2 - 9 s, sykkivä röntgen
- kuvan koko minimi/maksimi (50 x 50/130 x 150) mm

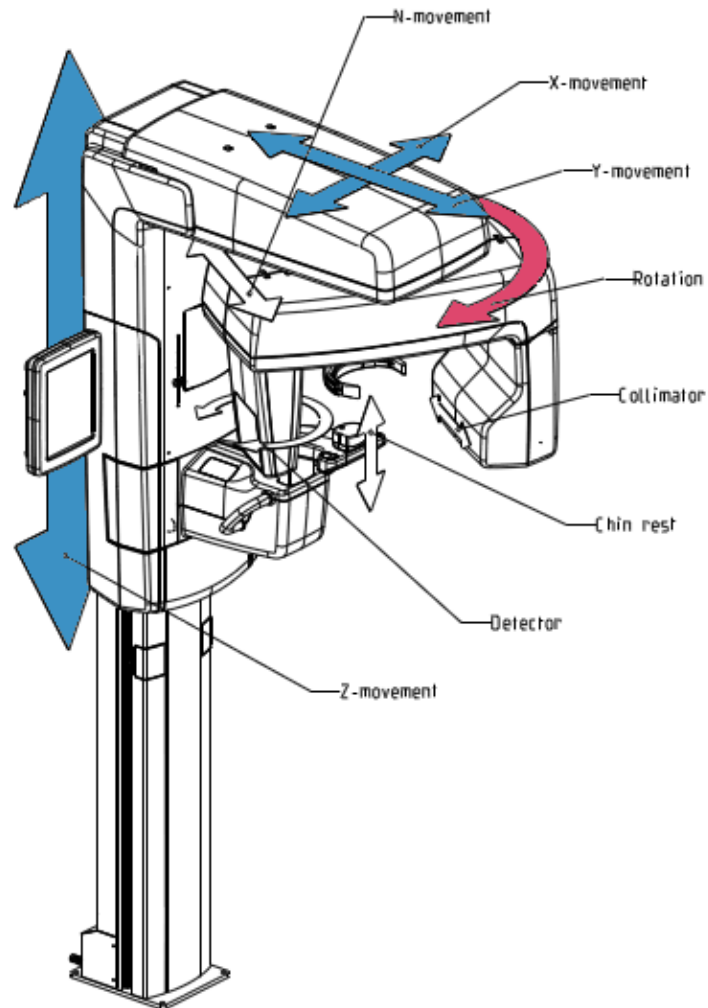
#### 4.3 Osat ja liikkeet

Kuvasta 6 ilmenevät laitteen tärkeimmät osakokonaisuudet, joihin jatkossa viitataan samoilla nimillä. Laite voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääosaan, jotka ovat *pilari*, *kelkka* ja *pyörijä*. Pyörijään kuuluu laitteen röntgenlähde eli putkipää ja röntgensäteet havaitseva detektori. Laitteen kelkka jaetaan lisäksi kahteen osaan: ylä- ja alatiskiksi. Alatiski sisältää potilaan asemoimiseen tarvittavan leukatuen. Pyörijän lävitse tulee potilaan asemoimiseen tarkoitettu päätuki, joka on kiinni ylätiskissä. [19, s. 9 - 10.]



Kuva 6. Laitteen osakokonaisuudet [19].

Laitteen kaikki liikkeet näkyvät kuvassa 7. Väreillä on merkattu ne liikkeet, joita on tarkoitus tutkia tässä työssä. Punaisella on merkitty pyörijän liike, joka on tärkein tutkimuksen alaisena olevista liikkeistä. Sinisellä on merkitty niitä laitteen liikkeitä, jotka eivät muutu kuvaustapahtuman aikana, mutta joiden aseman arvellaan vaikuttavan kuvanlaatuun.

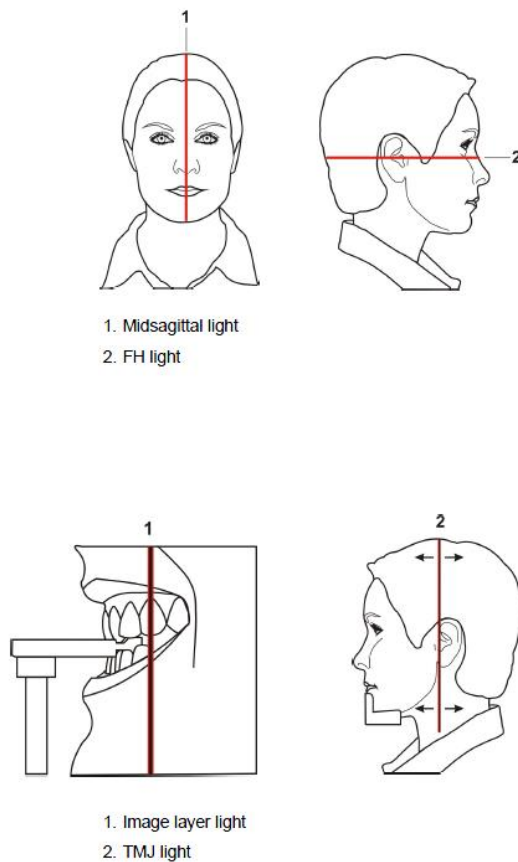


Kuva 7. Laitteen kaikki liikkeet. Punaisella merkittynä pyörijän pyörähdysliike [19].

#### 4.4 Kuvaustapahtuma

Laitteen röntgenlähteen korkeus säädetään potilaalle sopivaksi pilarin korkeutta säätämällä. Potilas asettuu seisomaan kuvaustapahtuman ajaksi röntgenlaitteen alle ja potilaan pää asemoidaan keskelle kuvan keskipistettä. Asemointi suoritetaan leuka- ja päätukien avulla, jotka samalla helpottavat potilaan paikoillaan pysymistä. Asemoinnin jälkeen pään asento vielä kohdistetaan laitteessa kiinni olevien laservalojen avulla (kuva 8). Potilaan tulee purra kevyesti leukatukeen kiinnitettyä purupalaa koko kuvaustapahtuman ajan, jotta leuka pysyy paikoillaan ja hampaat erillään toisistaan. Potilas pitää kiinni laitteen sivuilla olevista käsituista koko kuvaustapahtuman ajan, jotta kuvattavan asento tukevoituisi entisestään. Kuvaustapahtuman aikana laitteen röntgenlähde ja detektori kiertävät potilaan pään ympäri, ottaen samalla röntgenkuvia potilaan päästä jokaisesta suunnasta. [18.]

Kuvaustapahtuma kestää kuvaustyyppistä riippuen 9 - 40 sekuntia. Kuvauksen jälkeen tietokoneohjelma yhdistää kuvat yhdeksi panoraamakuvaksi tai 3D-malliksi, josta voidaan tarkastella potilaan koko suun aluetta samanaikaisesti. [18.]



Kuva 8. Potilaan pään kohdistaminen laservalojen avulla [19].

## 5 Mittausjärjestelyt

### 5.1 Mitattavat suureet

Työn tavoitteena oli kehittää mekaaninen mittajärjestelmä laitteen pyörijän liikkeiden selvittämiseksi. Kuvauksen kohdistuksen tulisi osua potilaan pään keskelle eli kuvan keskipisteeseen. Kuvan keskipiste on siis ”kiinni” potilaassa ja se sijaitsee laitteen pyörähdysakselilla (punainen rasti kuvassa 9). Kuvan keskipisteeseen nähden laitteen röntgenlähteen ja detektorin tulisi pysyä koko kuvauksen ajan samalla etäisyydellä, jotta geometrisia vääristymiä ei tulisi. Röntgenlähde ja detektori ovat kiinteästi laitteen pyörijässä, joten mittajärjestelmää suunniteltaessa oletettiin, että niiden keskinäinen väli pysyy kuvauksen aikana muuttumattomana.

Röntgenlähteen ja detektorin etäisyyden kuvan keskipisteeseen nähden oletetaan muuttuvan pyörähdysten aikana, joten niiden asemat halutaan mitata pyörähdysten eri vaiheissa. Pyörijä myös saattaa kallistua kuvauksen aikana, joten kallistumat tulisi mitata aseman mittauksen yhteydessä. Asemien ja kallistumien mittaamisella voidaan laskea kuvan keskipisteen todellinen sijainti, jolloin saadaan selville laitteeseen tehtyjen muutosten aiheuttamat virheliikkeet.



Kuva 9. Kuvauksen keskipiste merkattuna punaisella rastilla [19].

## 5.2 Tilastollinen koejärjestelmä

Tilastollisen koejärjestelmän mukaisella tutkimusmenetelmällä tarkoitetaan muutoksen ja oletetun ilmiön välisen suhteen selittämistä tai kuvaamista. Yksinkertaisimmillaan se tarkoittaa tuloksen ennustamista tehtyjen muutosten johdosta. Ilmiön tutkiminen tilastollisen koejärjestelmän periaatteella on systemaattinen toimenpide, jossa yleensä valitut muuttujat pidetään vakioina ja haluttua muutosta vaihdellaan erisuuruksena, jolloin nähdään muutoksen vaikutus tutkittavassa ilmiössä. Menetelmän suunnittelu sisältää koejärjestelyiden suunnittelemisen neutraaleissa oloissa. Tärkeimmät huomiot koejärjestelyiden suunnittelussa ovat järjestelmän kelvollisuus mitattavan ilmiön tunnistamiseksi, saatavien tulosten luotettavuus ja kokeiden toistettavuus. [20.]

Tilastollisen koejärjestelmän periaatteella voitaisiin tutkia laitteeseen tehtyjen muutosten vaikutusta pyörijän liikkeisiin. Myös laitteen osille tehtävien yksittäisten muutosten vaikutuksen suuntaa voitaisiin arvioida, mikäli pätevä mittajärjestelmä kehitettäisiin.

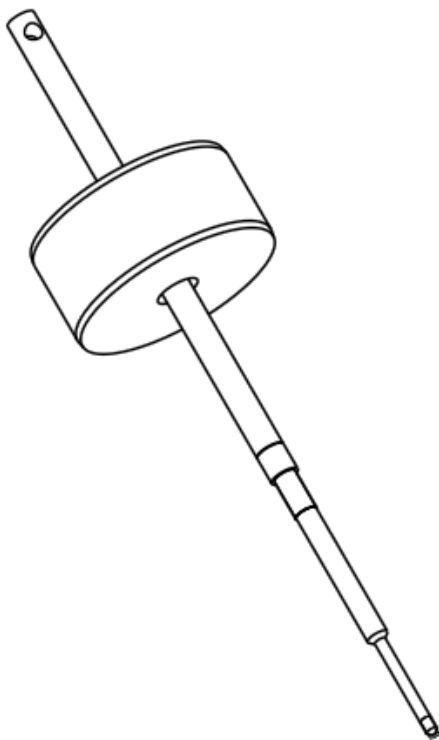
## 5.3 Mittaustapahtuman suunnittelu

Mittauksissa kiinnostuksen kohteena olivat siis laitteen detektorin ja röntgenlähteen asemat pyörähdysten aikana. Koska laitteen kuvan keskipiste sijaitsee pyörähdysakselin keskellä, päätettiin sitä hyödyntää mittauksen suorittamisessa. Mittauksia varten tehtiin erillinen mittasauva, joka kiinnitettiin laitteen pyörähdysakselille kiinni pyörijään. Sauvan siirtymiä ja kallistumia mittaamalla saataisiin selville pyörijän liikkeet, joiden avulla voitaisiin myöhemmin laskea detektorin ja röntgenlähteen todelliset sijainnit pyörähdysten aikana.

Pyörijä pystyy tekemään pyörähdysten aikana myös lineaariliikettä kahteen eri suuntaan. X-suuntainen liike muuttaa pyörijän painopisteen sijaintia, jolloin koko pyörijä kallistuu. Y-suuntainen liike on kuvaustapahtuman aikana lukittu, mutta sen mahdollistaminen aiheuttaa pyörijään välyksiä ja täten myös mahdollisesti kuvanlaatuun heikentymiä. X- ja Y-asetat ovat esitettyinä kuvassa 7. Suunniteltava mittasauvan kiinnitys ei saisi lukita kyseisiä liikkeitä, vaan sauvan pitäisi mallintaa mahdollisimman tarkasti pyörijän todellisia liikkeitä. Tämän takia mittasauvaa ei voitu kiinnittää suoraan laitteen ylätiskissä sijaitsevalle pyörähdysakselille, vaan se piti kiinnittää pyörijän runkoon.

Pyöräjän pyörähdysliike tapahtuu laitteen yläosassa olevien laakerien avulla. Laakerien välissä on putki, jonka lävitse tulee laitteen pääntuki. Putkea hyödynnettiin pyörähdysakselin keskittämiseksi suunnittelemalla siihen kohdistuspala, jonka avulla mittasauva saatiin kohdistettua keskelle pyörähdysakselia. Laitteen pääntuki tosin piti poistaa, ennen kuin kohdistuspalan asentaminen oli mahdollista.

Kohdistuspalan lävitse tuotiin mittasauva, joka kiinnitettiin kiinnityspaloilla pyöräjään (kuva 10). Kohdistuspala ja mittasauvan pääty purettiin kohdistamisen jälkeen, jolloin mittasauvan kärki jäi laitteen pyörähdysakselille kiinnityspalojen varaan.



Kuva 10. Luonnos mittasauvasta ja kohdistuspalasta.

Sauvan asemaa mitattiin laseretäisyysmittarilla ja analogisilla mittakelloilla. Kelloilla suoritettiin kaikki testit, joissa tarvittiin samanaikaisia mittaustuloksia useasta eri suunnasta ja eri korkeuksilta. Laseria taas käytettiin vain niissä testeissä, joissa tarvittiin mittaustulos pelkästään yhdestä suunnasta. Mittakelloilla mitattaessa mittaustarkkuus oli hei-



kompi kuin laserilla, mutta kuitenkin testien kannalta riittävän hyvä. Yrityksellä oli valmiina yksi kolmiomittaukseen perustuva laseretäisyysmittari ja runsaasti analogisia mittakelloja.

Mittakelloja tarvittiin liikkeiden mittaamista varten neljä kappaletta, koska samaan aikaan haluttiin mitata X- ja Y-suuntaista siirtymää sekä kallistusta näiden akselien ympäri. Mittakellot asennettiin laitteen alatiskiinkin, jossa kuvauksen keskipiste sijaitsee. Mittakellojen asentamiseen käytettiin mittakellonjaljoja, joilla voitiin hienosäätää mittakellojen asema suhteessa mittasauvaan. Myös laserin kiinnityksessä käytettiin muokattua mittakellonjaljaa.

Pyöräjän aseman arvoja täytyi mitata tasaisin välein ja otosten lukumäärän tuli olla riittävän suuri. Pyöräjän kulma-aseman määrittämiseen käytettiinkin ylähyllyn akselin päällä olevaa optokampaa (kuva 14). Optokampa on sama, jolla laite itse määrittää oman asemansa pyörähdysten eri vaiheissa.

#### 5.4 Mittavälineiden valmistus

Mittasauvana käytettiin 20 mm halkaisijaltaan olevaa akselia. Sauvan kärki muotoiltiin niin, että siinä oli kaksi eri halkaisijan omaavaa mittauspintaa (kuva 11). Sauvan kärkeen tehtiin myös kierteet erillisen mittakärjen asettamista varten. Kiinnitys pyörijään tapahtui kierrelitoksen avulla ja asemoinnin ohjauspintana toimi mittasauvassa oleva kierteiden otsapinta. Sauvan keskelle tehtiin ruuviliitos, jotta sen pääty olisi mahdollista purkaa sauvan asemoinnin jälkeen.

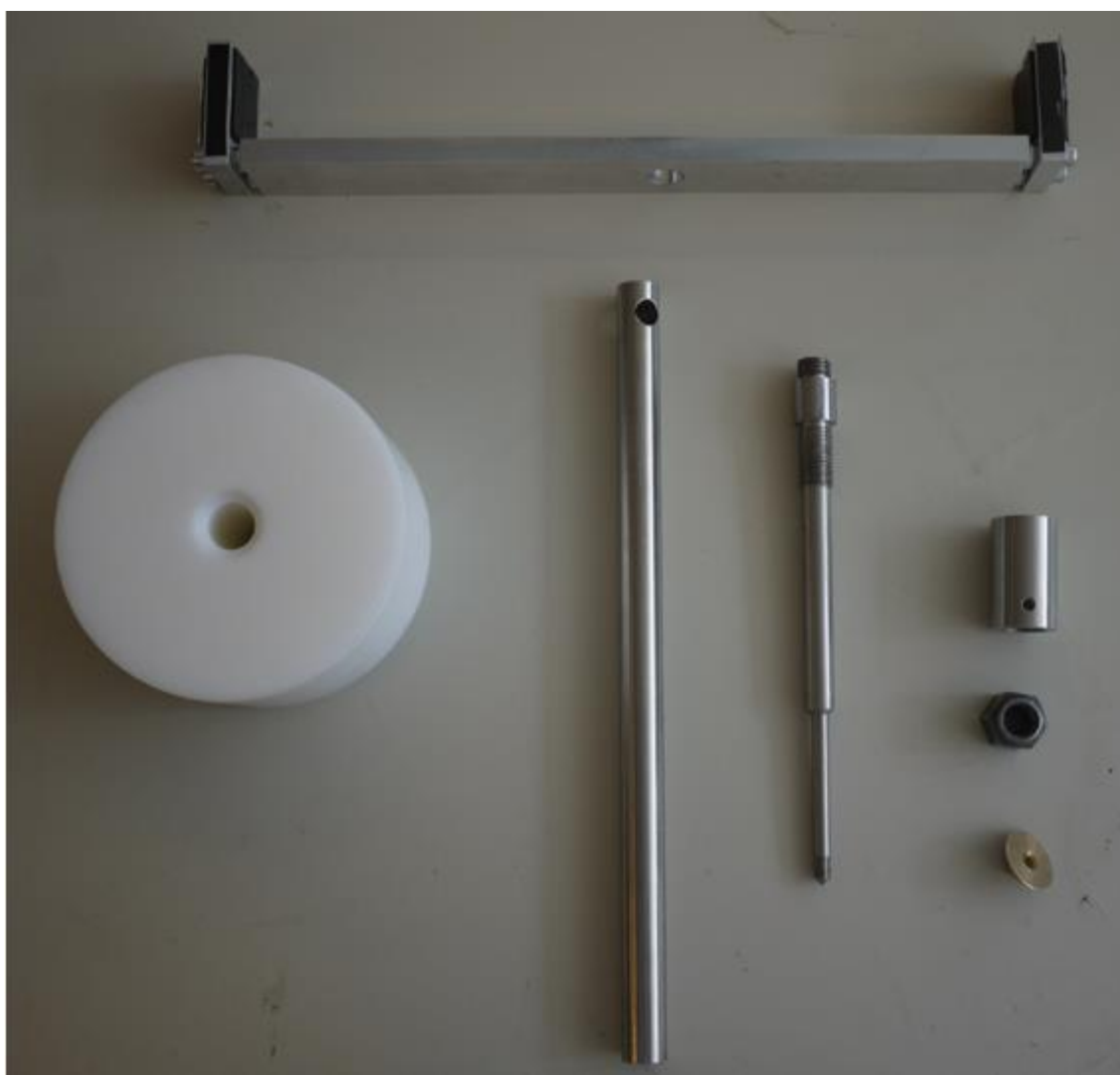
Mittasauvan liitoskohtaan suunniteltiin myös hyvin pienellä toleranssilla mitoitettu kohdistusholkki (kuva 11), joka suuntasi sauvan osat keskenään samansuuntaisiksi. Holkki oli mittasauvassa kiinni pelkästään mittavälineiden asennuksen aikana, minkä jälkeen se purettiin pois.

Mittasauvan pintojen suoruus tarkistettiin koordinaattimittalaitteella, jotta se voitaisiin ottaa huomioon tuloksien yhteydessä. Sauvasta otettu mittaustulos löytyy liitteestä 1.

Mittasauvan asemointia varten suunniteltiin erillinen kohdistuspala. Materiaalina käytettiin POM-muovia sen hyvien liukuominaisuuksien sekä mainion kulutuskestävyyden

vuoksi. Kohdistuspalan seinämän korkeus maksimoitiin virheen minimoimiseksi ja pinnat toleroitiin mahdollisimman tiukoiksi, mutta kuitenkin niin, että kohdistuspalan asentaminen ja purkaminen olisi mahdollista.

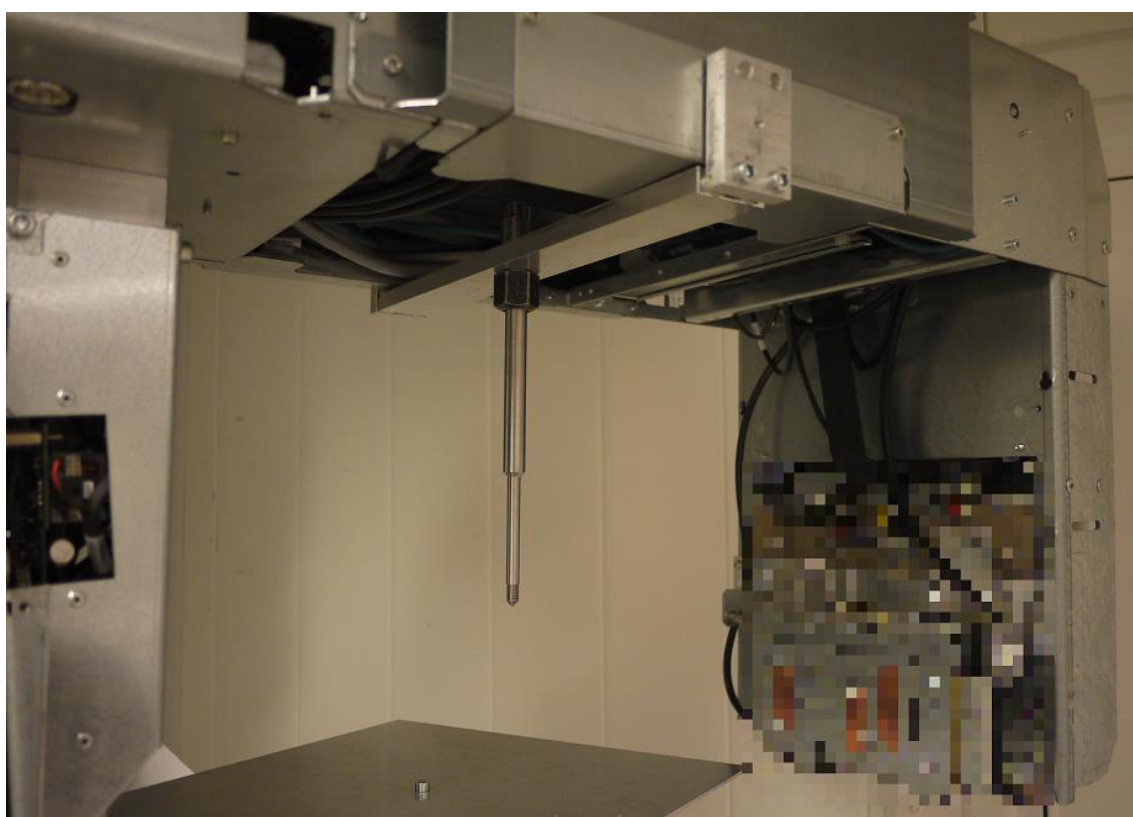
Mittasauvan kiinnitys pyörijään toteutettiin alumiinisen kiinnityslevyn avulla. Kiinnityslevyn päädyissä oli palat, jotka puristivat levyn kiinni pyörijään. Puristus tapahtui ruuviliitosten avulla ja puristusta voitiin säätää ruuvien väliin laitettavien aluslevyjen avulla. Päätypaloihin kiinnitettiin vielä kumiset levyt asennuksen tukevoittamiseksi.



Kuva 11. Kaikki mittavälineet. Ylhäällä alumiininen kiinnityslevy; vasemmalla kohdistuspala; keskellä mittasauva purettuna; oikealla kohdistusholkki, sauvan kiinnitysmutteri ja mittakärki.

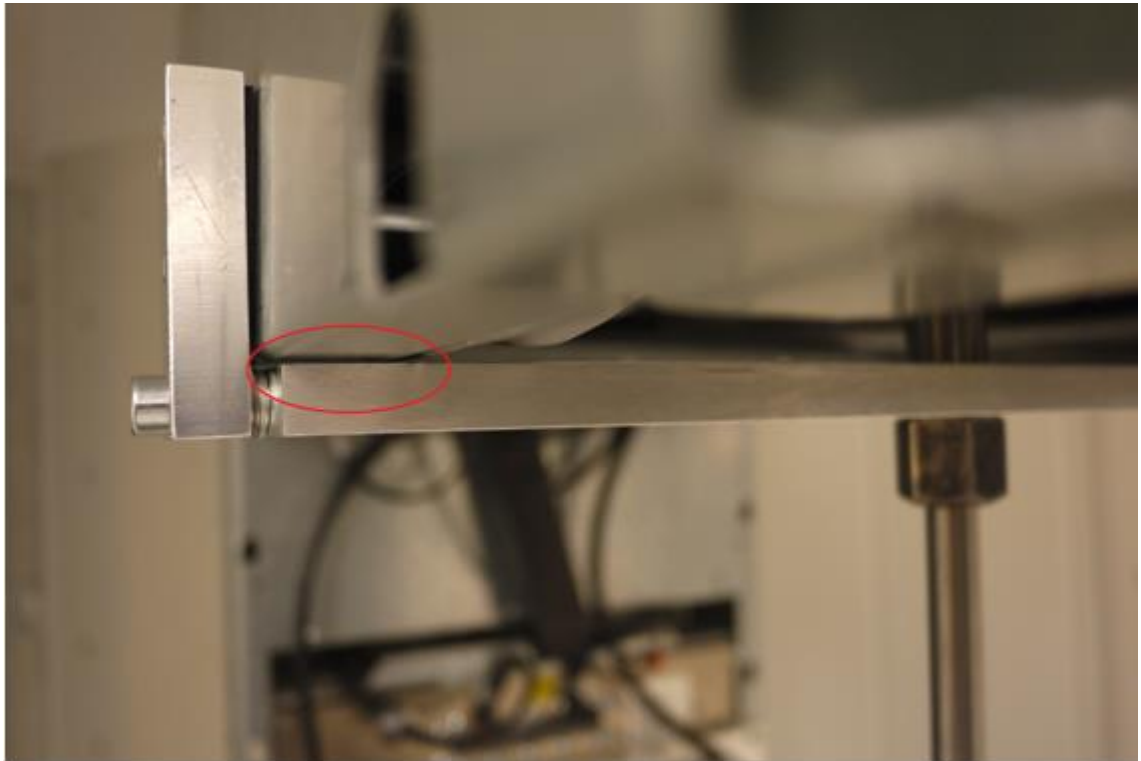
## 5.5 Mittalaitteiden asennus

Mittalaitteiden asennus (kuva 12) oli yksi kriittisimmistä mittaustarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Asennus pyrittiin tekemään joka kerta samalla tavalla, jotta tuloksista saataisiin mahdollisimman säännönmukaisia ja täten vertailukelpoisia. Laitteiston turhaa purkamista mittausten välillä pyrittiin kaikissa mittauksissa minimoimaan. Mittasauvaa ei esimerkiksi irrotettu ollenkaan alumiinisesta kiinnityslevystä mittausten välillä, jotta sen kulma ei olisi muuttunut. Osien asennus suoritettiin aina samassa järjestyksessä ja kiinnityspalat pyrittiin kiristämään joka kerta samalla tavalla.



Kuva 12. Mittalaitteisto asennettuna pyöräjän runkoon kiinni.

Oikein asennetun mittalaitteiston pystyi tunnistamaan kiinnittämisen jälkeen, jolloin huono asennus voitiin korjata. Oikein asennettuna mittasauvan pääty irtosi kohdistuspa-  
lasta köykäisesti, jolloin mittasauvan tiedettiin olevan linjassa laitteen keskiakseliin näh-  
den. Myös kiinnityslevyn ja pyörijän väliin tuli jäädä rako, mistä voitiin todeta sauvan  
kiinnityksen olevan keskiakselin suuntainen, eikä pyörijän runkoon pakotettu (kuva 13).  
Raon tuli olla samansuuruinen myös mittauksen lopussa, jolloin tiedettiin, että alumiini-  
nen kiinnityslevy ei ollut valunut alaspäin mittaustapahtuman aikana.



Kuva 13. Oikein asennetussa mittalaitteistossa kiinnityslevyn ja pyörijän väliin jää rako.

## 5.6 Mittajärjestelmän tarkkuuden arviointi

Mittajärjestelmään liittyy monta toisistaan irrallista osakokonaisuutta, jotka kaikki aiheuttavat mittaustulokseen virhettä. Mittauksen epätarkkuus eli virheiden yhteenlaskettu summa lasketaan saaduista mittaustuloksista, ja niistä voidaan systemaattiset virheet poistamalla laskea mittausten luotettavuus. Luotettavuus kertoo tutkittavan menetelmän mittaustarkkuuden. [15.]

Seuraavassa luetellaan tärkeimpiä virhelähteitä, jotka voivat aiheuttaa systemaattisia ja satunnaisia virheitä mittaustulokseen. Virheet on purettu yleiseltä tasolta hieman kohdistetummaksi suoritettuja testejä kohtaan, jotta niiden ehkäisemiseen ja korjaamiseen perehtyminen olisi myöhemmin selkeämpää. Suurin osa virheistä aiheuttaa kuitenkin mittaustulokseen systemaattisia virheitä, joiden löytäminen voi olla hankalaa.

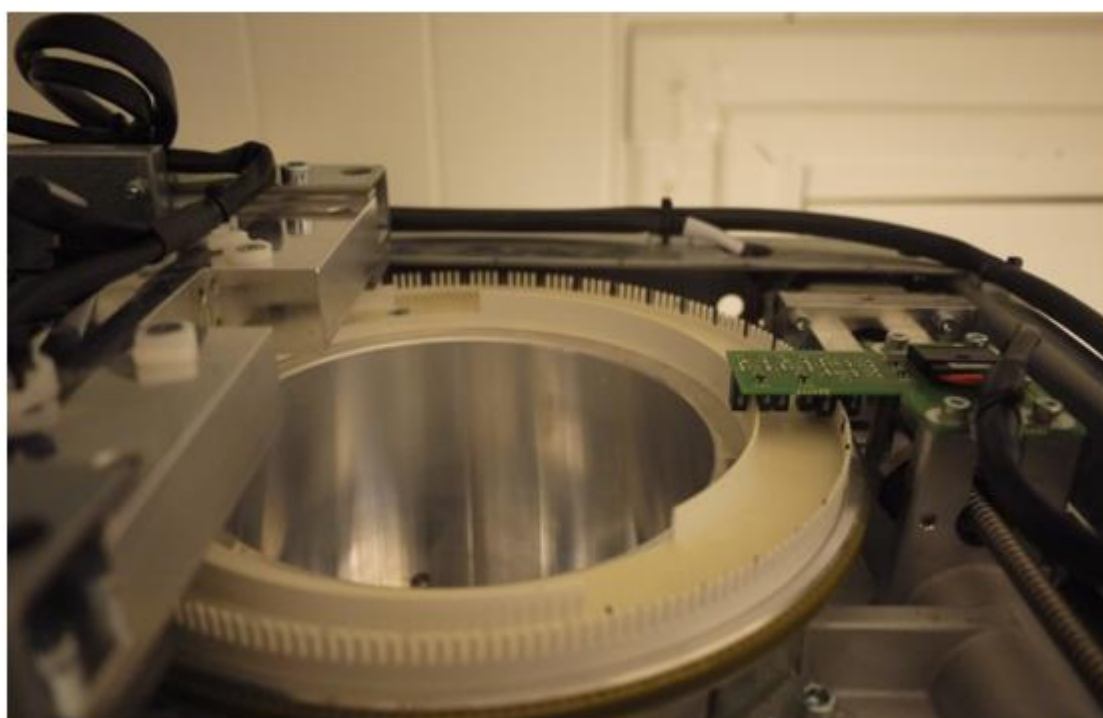
Kyseiselle mittajärjestelmälle virhelähteitä ovat

- mittasauvan, mittasauvan jatkovarren, kohdistusholkin ja kohdistuspalan geometriset virheet
- mittasauvan asentamisesta johtuvat virheet ja kiinnityksen pitävyys
- mittalaitteiden asennuksesta aiheutuvat virheet ja mittakellonjalkojen jousto
- mittalaitteiden tuoma ylimääräinen paino
- pyörijän X- ja Y-asemien muutokset kesken mittaustapahtuman
- pyörijän kulman asemoinnista johtuva virhe
- mittalaitteiden kalibrointi ja lukuvirheet.

Tässä työssä mittajärjestelmän epävarmuus määritetään suoritettujen toistokokeiden mittaustuloksista, jotta tiedetään, kuinka paljon komponenttien uudelleen asentaminen vaikuttaa mittaustulokseen. Myös kaikki virheet tulevat huomioiduiksi oikean suuruusina, kun epävarmuutta lasketaan mitatuista arvoista.

## 6 Mittausten suorittaminen ja tulokset

Kaikki mittaukset suoritettiin laitteen pyörijää käsin pyörittämällä, jolloin laitteen ei tarvinnut olla käynnissä. Pyörähdyskulma määritettiin laitteen ylätiskissä olevan optokamman ja optohaarukan avulla, jotka esitetään kuvassa 14. Optokampa oli jaettu 225 piikkiin, joten kahden piikin välinen kulma oli 1,6 astetta. Optokammasta väritettiin tussilla joka viides piikki kulma-aseman lukemisen helpottamiseksi. Kulman arvo luettiin aina optohaarukan ja piikin rajapinnasta. Laite oli kaikissa testeissä mittaustulosten lukuhetkellä pysähdyksissä.



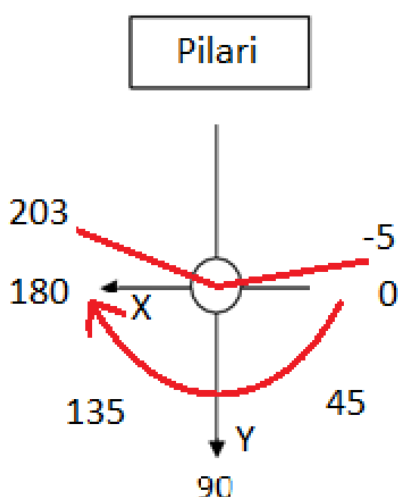
Kuva 14. Laitteen optokampa ja -haarukka, joiden avulla määritettiin pyörijän kulma-asema.

## 6.1 Toistettavuus

Mittajärjestelmän asentamisen jälkeen ensimmäisenä mitattiin testin toistotarkkuutta. Toistotarkkuuden mittaamisella voitiin arvioida, onko testi toistettavissa ja ovatko myöhemmistä mittauksista saatavat tulokset keskenään vertailukelpoisia. Tässä työssä *toistotarkkuudella tarkoitetaan keskihajontaa*. Mittaustulosten kuvaajista on tarkoituksella jätetty akselien yksiköitä pois työn tilaajan pyynnöstä.

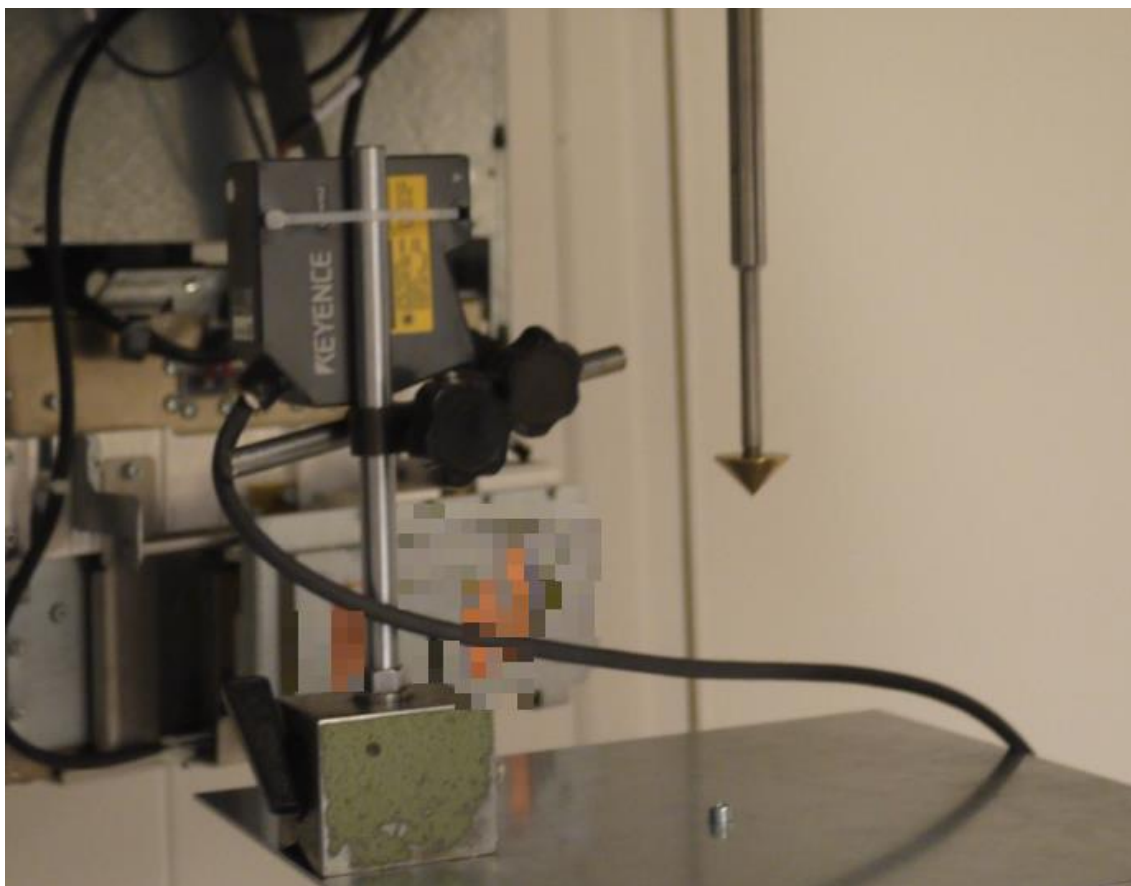
Sama liikerata toistettiin laitteella useaan kertaan ja tulokset kirjattiin ylös. Laitteen ylätiskin Y-asema oli ajettu päätyyn asti, eli mahdollisimman kauas laitteen kelkasta, ja pyörijän X-asema vietiin aivan oikeaan reunaan saakka (ks. kuva 7). Ylätiski ja pyörijä vietiin ääriasemiin siksi, että niiden asemat eivät pääsisi muuttumaan testin aikana. Laitteen pilari oli nostettu korkeimmalle asetukselle. Testeihin valittiin laitteen ääriasemia myös siksi, että laitteen oletetut liikkeet näkyisivät mahdollisimman selkeästi mitattavista tuloksista.

Mittauspisteitä otettiin 16 asteen välein 208 asteen matkalta, jolla tutkittavien muutosten oletettiin olevan. Pyörijän liikerata näkyy kuvassa 15. Mittaukset aloitettiin pyörijän ollessa lähtöasemassaan -5 asteen kulmassa, jolloin pyörijä oli asemoitu niin, että röntgenlähde oli laitteen oikealla puolella. Kuvasta näkyvät myös akselit ja niiden positiiviset suunnat, jotka pidettiin samoina kaikkien testien ajan.



Kuva 15. Pyörijän liikerata testeissä.

Toistettavuuden mittaaminen suoritettiin yhdellä Keyencen LK-H152-laseretäisyysmittarilla (ks. liite 2) ottamalla mittaustuloksia laitteen Y-akselin suuntaan. Laserin toistotarkkuus on liitteen 2 mukaisesti  $0,25\ \mu\text{m}$ . Laserin mittauspiste asetoitiin mittasauvalle 100 mm alaspäin pyörijän rungosta ja kohdistettiin keskelle mittasauvaa. Kokeiden aikana tarkkailtiin jatkuvasti lasersäteen sijaintia mittasauvalla, jotta muutokset voitaisiin huomioda tulosten käsittelyssä. Kuvassa 16 esitetään testijärjestelyt toistokokeille.

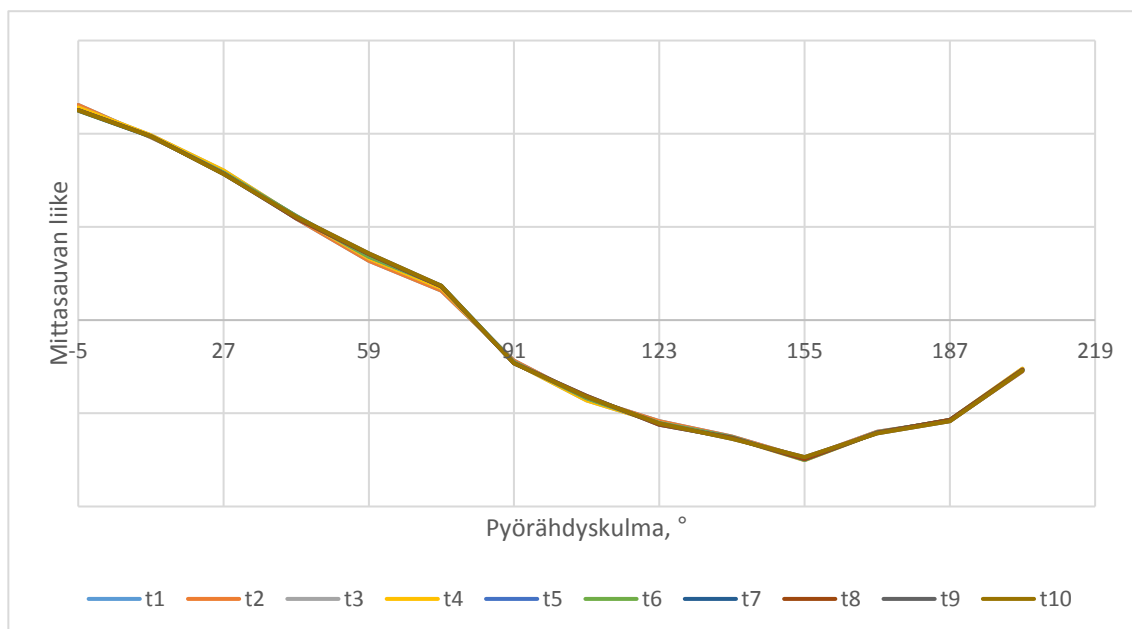


Kuva 16. Laseretäisyysmittari asennettuna laitteen alatiskiä toistokokeita varten.

Kaikki tulokset keskiarvotettiin, jotta niiden keskinäinen vertailu olisi helpompaa. Tämä tarkoittaa sitä, että mittaustuloksista lasketut siirtymät sijoittuivat taulukoissa nollan molemmiin puolin. Toimitus suoritettiin otoskohtaisesti, vähentämällä jokaisesta mittaustuloksesta kaikkien mittauspisteiden keskiarvo. Kuvaajia vertailtaessa tulokset vääristyvät hieman, mutta ilman keskiarvottamista olisi niiden keskinäinen vertailu varsin hankalaa.



Ensimmäisenä testattiin *laitteen toistotarkkuutta ilman mittasauvan irrottamista pyöräjän rungosta* otosten välillä. Myös laseretäisyysmittari pidettiin koko toistokokeen ajan paikoillaan. Koe toistettiin kymmenen kertaa luotettavien tulosten aikaansaamiseksi. Lasersäde palautui jokaisen mittauksen jälkeen samaan pisteeseen, kun pyörijä oli tuotu takaisin lähtöasemaansa. Kuvassa 17 esitetään testistä saadut tulokset.

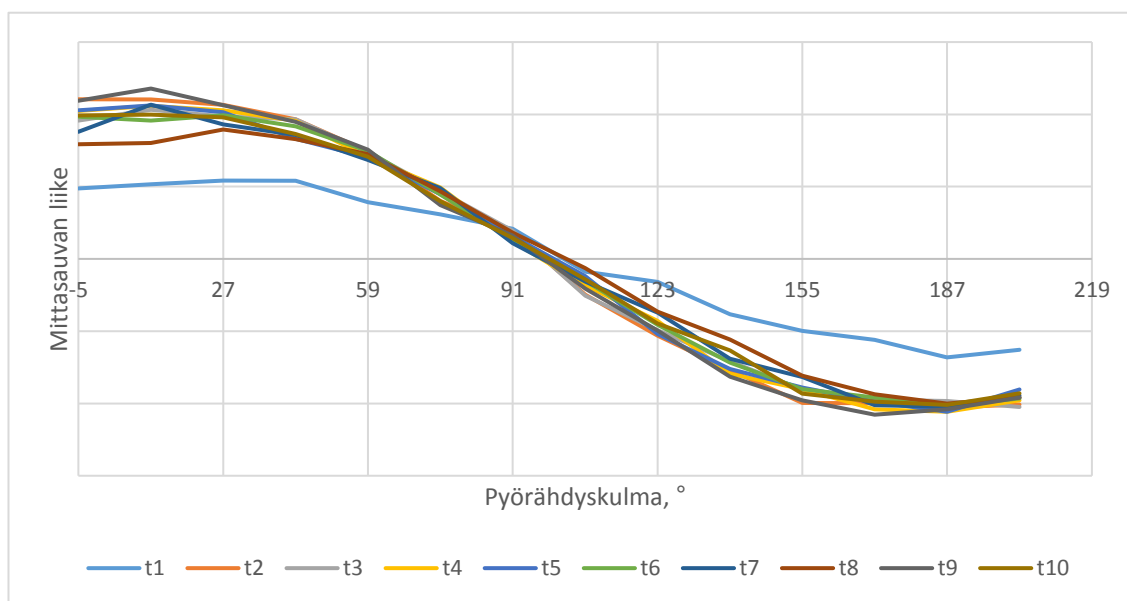


Kuva 17. Laitteen toistotarkkuuden mittaus, kun mittalaitteisto pysyy muuttumattomana otosten välillä.

Tuloksista nähdään, että pyöräjän liike toistuu joka kerta lähes samalla tavalla. Keskihajonta (kaava 1) yhdelle mittapisteelle on  $0,0069 \text{ mm}$ . Keskiarvon keskihajonta (kaava 2) eli koko testin toistotarkkuus on  $0,0022 \text{ mm}$ .

Tuloksista voidaan päätellä, että mittalaitteet pysyvät testin aikana paikoillaan ja ettei pyörijä liiku itseksään X- ja Y-akselien suuntaan. Ainoat virhettä aiheuttavat tekijät ovat todennäköisesti vain pyöräjän asemointi- ja lukuvirheet.

Seuraavaksi testattiin *laseretäisyyssmittarin kiinnityksestä aiheutuvaa virhettä*. Oletuksena oli, että laseria uudelleen kiinnittäessä se ei kohdistu täsmälleen samaan paikkaan, jolloin saadaan hieman eri mittaustuloksia. Mittasauva pidettiin paikoillaan koko testin ajan, ilman, että sitä olisi joutunut kohdistamaan uudelleen otosten välissä. Jokaisen pyöräytyksen jälkeen laseri irrotettiin alustasta ja kohdistettiin uudelleen mittasauvaan. Mittasauvaan väritettiin pieni piste, joka helpotti kohdistamisen onnistumista. Laseri pyrittiin joka kerta asemoimaan niin, että lasersäde olisi kohtisuorassa mittasauvaan nähden. Koe toistettiin kymmenen kertaa ja mittaustulokset löytyvät kuvasta 18.

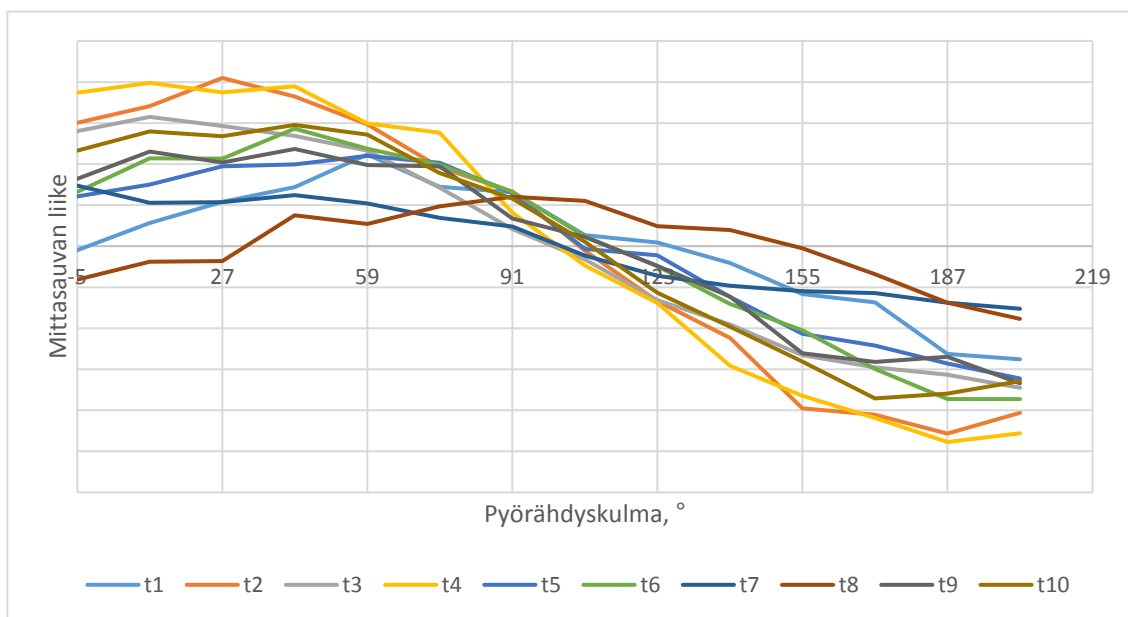


Kuva 18. Laitteen toistotarkkuuden mittaaminen, kun laseri asemoitiin uudelleen otosten välissä. Mittasauva pysyi paikoillaan koko testin ajan.

Ensimmäisen otoksen t1 arvot eivät noudata muita saatuja arvoja, minkä syynä on todennäköisesti mittasauvan liikahtaminen kyseisen otoksen jälkeen. Kyseinen otos on kuitenkin huomioitu toistotarkkuuden laskelmissa, sillä varmaa syytä otoksen poikkeavuudelle ei voi sanoa. Muuten saadut arvot noudattavat edelleen melko hyvin samaa käyrää.

Keskihajonnaksi saadaan  $0,1188 \text{ mm}$  ja keskiarvon keskihajonnaksi  $0,0038 \text{ mm}$ . Toistotarkkuus on laskettujen arvojen perusteella edelleen melko hyvä, vaikka hajonta kasvaakin laserin uudelleen asemoinnin takia huomattavasti aikaisempaan toistokokeeseen verrattuna.

Lopuksi mitattiin vielä *kiinnityksen toistotarkkuutta sauvan irrottamiseen nähden*. Mittasauva irrotettiin pyöräjän rungosta, minkä jälkeen se kiinnitettiin uudestaan kohdistuspaalaa apuna käyttäen. Mittasauvaa ei kuitenkaan missään vaiheessa irrotettu sen alumiinista kiinnityslevystä, jotta sauvan kulma ei olisi muuttunut testien aikana. Laseri irrotettiin jokaisen toiston välissä ja asemoitiin uudelleen samaan pisteeseen. Kaikki asennukset suoritettiin niin, että oikein asennetun mittasauvan ehdot täyttyivät. Koe toistettiin kymmenen kertaa ja tulokset löytyvät kuvasta 19.



Kuva 19. Laitteen toistotarkkuuden mittaaminen, kun kaikki mittavälineet asennettiin uudelleen otosten välissä.

Suurin osa otoksista noudattaa pääpiirteittäin samaa käyrää, mutta muutamat otokset poikkeavat muodoltaan huomattavasti. Jokainen asennus suoritettiin oikein, joten tarkempiin tuloksiin ei olisi mahdollista päästä runsaammalla harjoittelun määrällä.

Keskihajonnaksi saadaan  $0,1917 \text{ mm}$  ja keskiarvon keskihajonnaksi  $0,0606 \text{ mm}$ . Tuloksista nähdään, että toistotarkkuus laskee huomattavasti, mikäli kaikki testiin liittyvät asennukset joudutaan suorittamaan uudelleen. Yksittäiset testit kyseisellä menetelmällä eivät ole kovin vertailukelpoisia.

Pelkän sauvan uudelleen asentamisesta aiheutuvan virheen voi laskea vähentämällä mittauksen kokonaiskeskihajonnasta laserin uudelleenasemoinnin aiheuttaman keskihajonnan. Lasku suoritetaan kaavalla (3), jolla voidaan huomioida toisistaan riippumattomien epävarmuuskomponenttien aiheuttamaa virhettä. [16.]

$$u_c = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2)} \quad (3)$$

$u_c$  on mittauksen kokonaisepävarmuus

$u$  on yksittäinen epävarmuuskomponentti

Mittasauvan ja laserin asemoinnin oletetaan olevan toisistaan riippumattomia tapahtumia, jolloin pelkän mittasauvan uudelleen asentamisesta aiheutuva keskihajonta on 0,1505 mm.

Toistokokeista selviää, että koko mittajärjestelmän asentaminen aiheuttaa mittaustuloksiin erittäin suurta virhettä. Mittajärjestelmällä otetut tulokset eivät ole luotettavia, mikäli mittalaitteiden asennus joudutaan suorittamaan uudelleen otosten välissä.

Mittalaitteita irrottamatta menetelmän toistotarkkuus on kuitenkin hyvä. Tämänhetkisellä mittajärjestelmällä voidaan tehdä vertailukokeita, joissa laitetta pystytään muuttamaan otosten välillä koskematta mittalaitteisiin. Alkuperäisenä tavoitteena oli saada selville pyörijään tehtyjen painonmuutosten aiheuttamat liikkeet, ja niiden selvittämiseen mittajärjestelmä on käypä. Tosin absoluuttisia pyörijän sijainteja suhteessa alatiskiinkin ei voi mittajärjestelmällä todentaa, mutta muutosten suunnat ja suuruudet voidaan kyllä havaita.

## 6.2 Painonmuutostestit

### 6.2.1 Testien suorittaminen

Pyöräjän painonmuutosten aiheuttamaa liikettä mitattiin neljän mittakellon avulla, joiden testijärjestelyt näkyvät kuvassa 20. Käytössä oli kaksi kappaletta Mitutoyo 2046S- (ks. liite 3) ja kaksi kappaletta Brown & Sharpe JET 512K-mittakelloa (ks. liite 4). Mittakellot asetettiin X- ja Y-akseleille 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden ja mittakärjet asetoitiin mittasauvan paksulle osuudelle. Päälekkäin asetettiin samanmalliset mittakellot ja niiden välinen etäisyys pyrittiin saamaan mahdollisimman suureksi, jotta sauvan kallistumat näkyisivät testituloksista selkeästi. Ylemmän mittasauvan etäisyys pyöräjän rungosta oli 45 mm ja mittakellojen välinen etäisyys 77 mm.



Kuva 20. Mittakellot asennettuna painonmuutosmittauksia varten.

Mittauspisteitä otettiin 8 asteen välein 208 asteen matkalta, mikä oli täysin sama kokonaispyörähdys kuin aikaisemmissa toistokokeissa (kuva 15). Pyöräjän aloitus- ja lopetus-asetat pidettiin myös samoina toistokokeisiin nähden. Mittauspisteiden lukumäärää kasvatettiin, koska haluttiin eliminoida satunnaisvirheiden aiheuttamaa epätarkkuutta. Toistoja samoilla järjestelyillä tehtiin vain yhden kerran, joten tulosten piti olla täysin luotettavia.

Koe suoritettiin kaksi kertaa, joista ensimmäisessä pyöräjän X-asema oli viety aivan oikeaan reunaan ja toisessa vasempaan reunaan (pyöräjän X-asema näkyy kuvassa 7). Molemmissa tapauksissa pyöräjän liikettä mitattiin samoilla painonlisäyksillä, joita kasvatettiin testin edetessä. Pilarin korkeus ja ylätiskin Y-asema pidettiin samoina kuin aikaisemmissa toistokokeissa. Mittasauvaa tai mittakelloja ei irrotettu ollenkaan testin aikana laitteesta, jotta tuloksista saatiin vertailukelpoisia keskenään.

Pyöräjän liikkeitä mitattiin neljällä erisuuruusella kokonaismassalla. Ensimmäisenä liikkeitä mitattiin ilman painojen lisäyksiä, mikä vastasi uutta kevennettyä pyörijää. Muissa otoksissa pyörijään lisättiin painoja vaihtelevilla massoilla, jotta nähtäisiin mihin suuntaan painonlisäys muuttaa pyöräjän liikettä. Painot olivat lyijylevyjä, jotka kiinnitettiin pyöräjän röntgenlähteen yläpuolelle muutosten todelliseen kohtaan.

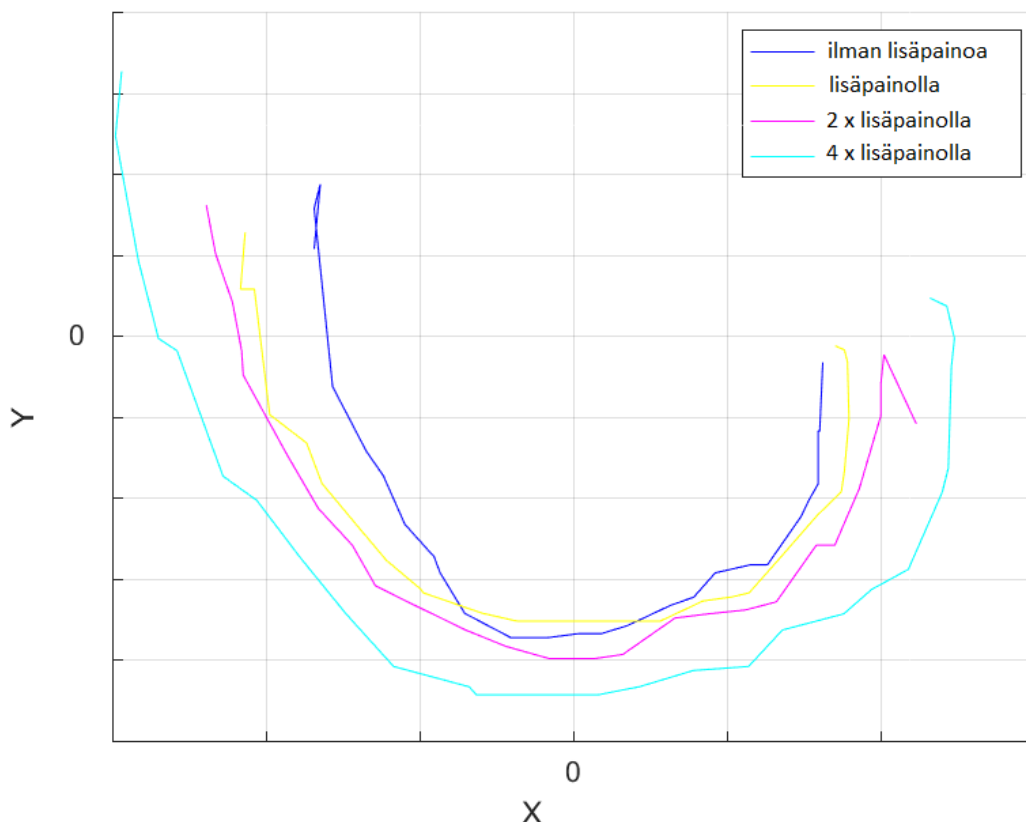
Seuraavaksi pyöräjän painoa lisättiin niin, että sen uusi kokonaismassa vastasi vanhan pyöräjän massaa. Painojen vaikutusta selvitettiin kaksinkertaistamalla lisätty paino ja lopuksi painoa lisättiin vielä nelinkertainen määrä alkuperäiseen painonlisäykseen nähden.

Pyöräjän painonmuutoksille tehdyt kokeet olivat periaatteessa tilastollisen koejärjestelmän mukaisia kokeita. Mittaustulokset olivat vertailukelpoisia saman testin eri otosten välillä, joten muutoksen suuntaa voitiin arvioida tulosten perusteella. Järjestelmällä saatuja tuloksia ei kuitenkaan voitu suoraan verrata aikaisemmin tehtyihin testeihin, mikä olisi ensiarvoisen tärkeää, jos kaikkia tuloksia haluttaisiin käsitellä tilastollisen koejärjestelmän periaatteiden mukaan.

Seuraavissa kappaleissa esitellään mitattuja tuloksia pyöräjän X-aseman ollessa *oikeassa* ja *vasemmassa* reunassa.

### 6.2.2 Oikean reunan tulokset

Kuvassa 21 mittasauvan liike on asetettu XY-koordinaatistoon. Mittaustulokset on siirretty origon ympärille, jotta tulosten lukeminen olisi selkeämpää. Testissä pyöräjän X-asema oli viety aivan oikeaan reunaan asti ja esiteltävät mittaustulokset on otettu mittasauvan ylälaidasta.



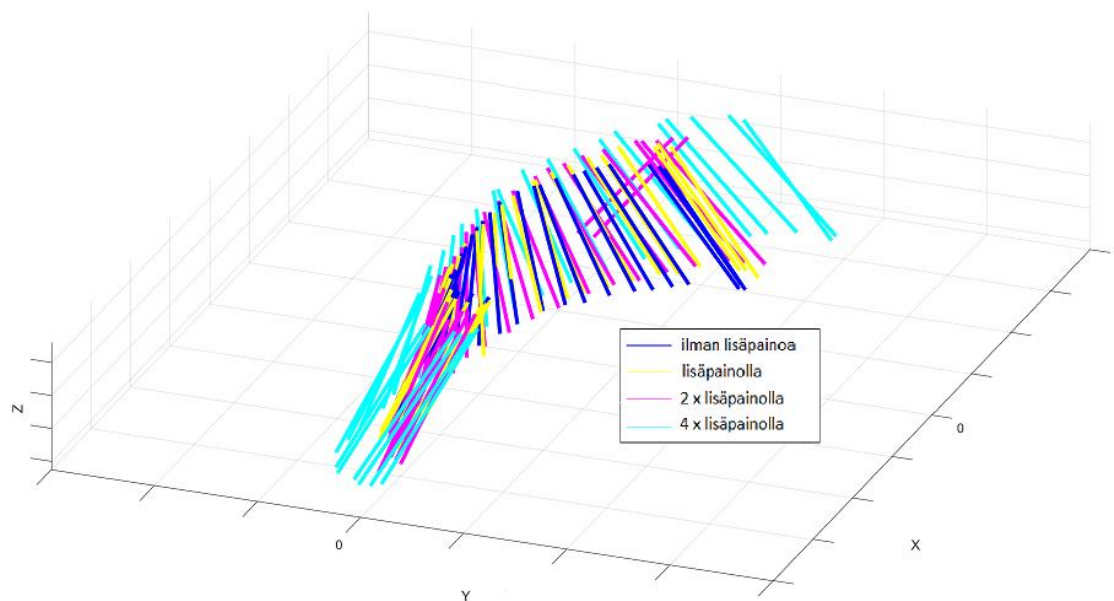
Kuva 21. Mittasauvan liike oikeassa reunassa ylälaidasta mitattuna.

Kuvasta voidaan huomata, kuinka liike muuttuu painonlisäyksen johdosta. Mittasauvan liikkeet kertovat lähinnä pyöräjän kallistumisesta, joten pyöräjän absoluuttisia X- tai Y-suunnan siirtymiä ei ole kuvasta mahdollista todeta. Kuvaa tulkittaessa käyrien ympyrämäisyys kertoo liikkeen säännönmukaisuudesta ja ympyrän koko kallistumien suuruudesta. Pyöräjän kallistuminen on jo itsessään haitallista, mutta vielä haitallisempaa on kallistuman vaihtelu kesken pyörähdysliikkeen.

Mittaustulosten perusteella pyöräjän liike on pääosin säännönmukaista ja painon lisääminen vaikuttaa liikkeisiin samansuuntaisesti. Merkittävää edeltävästä kuvasta on huomata, kuinka sauvan Y-suunnan siirtymät pienenevät pienellä painon lisäämisellä ja käy-

rän ympyrämaisyys paranee. Kallistuminen on siis silloin pyörähdysen puolivälissä pienempää ja koko pyörähdysliike on säännönmukaisempi. Suurella painon lisäämisellä ei enää saavuteta etuja.

Kuvassa 22 mittasauvan liike on piirretty ylä- ja alalaidan mittaustulosten perusteella 3D-koordinaatistoon. Kuvasta voidaan havaita painon lisäämisen vaikutus pyörijän liikkeisiin.

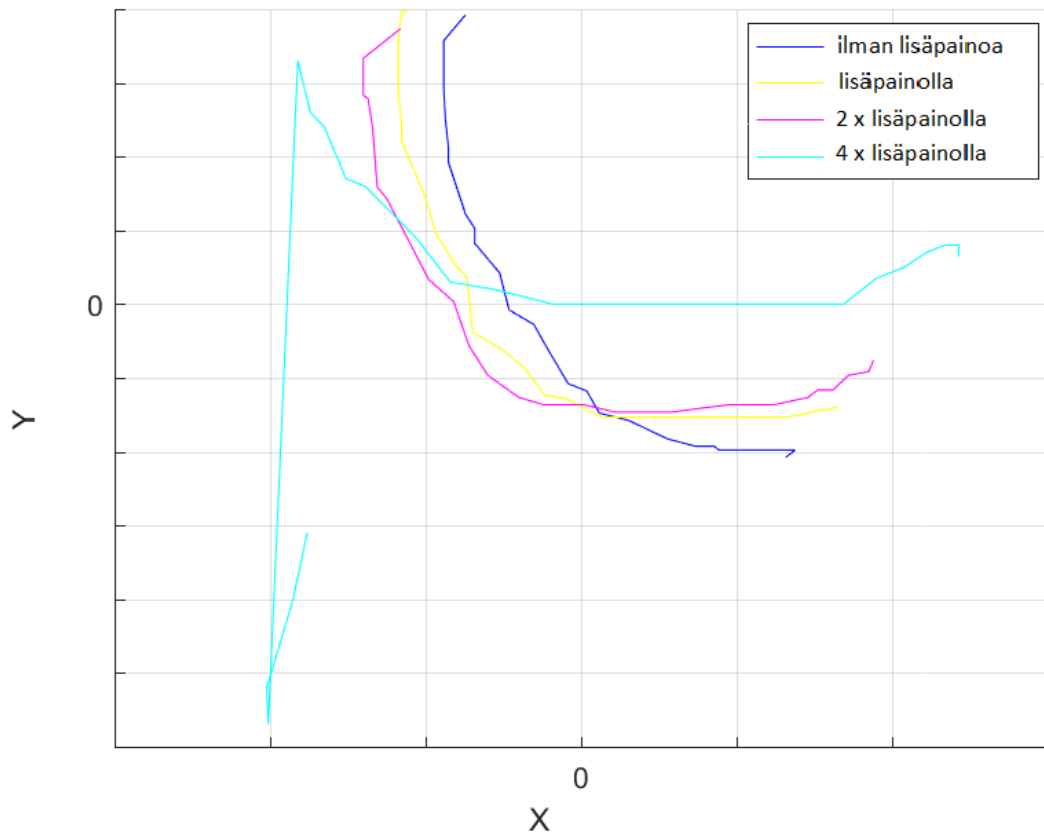


Kuva 22. Mittasauvan liike 3D-koordinaatistossa, kun pyörijän x-asema on oikeassa reunassa.



### 6.2.3 Vasemman reunan tulokset

Samat mittaukset suoritettiin pyörijälle, jonka X-asema oli viety vasempaan reunaan. Pyöräjän siirtäminen toiselle puolelle muuttaa sen painopisteen sijaintia, ja oletetusti mittauksissa muutosten tulisi olla suurempia. Kuvassa 23 näkyvät ylälaidan mittaustulokset XY-koordinaatistossa

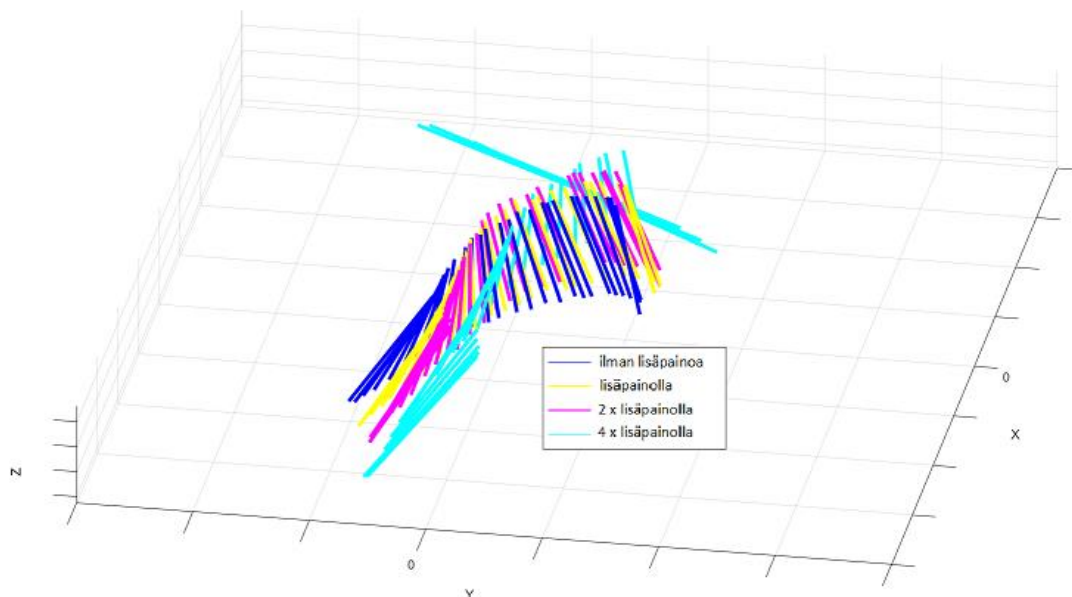


Kuva 23. Mittasauvan liike vasemmassa reunassa ylälaidasta mitattuna.

Vertaamalla edellä esitettyjä tuloksia kuvan 20 tuloksiin voidaan todeta, kuinka pyöräjän X-asema vaikuttaa oleellisesti pyöräjän liikkeisiin. Kyseisestä testistä havaitaan myös, kuinka vähäinen painon lisääminen pienentää mittasauvan Y-suunnan liikettä. Liikkeen pienentyminen on suunnilleen saman suuruista, mutta se ilmaantuu eri kohdassa pyöräytystä kuin aikaisemmassa testissä. Ilman lisäpainoja olevan pyöräjän liikkeet voimistuivat vasta pyöräytyksen lopussa, kun aikaisemmin ne ilmaantuivat pyöräytyksen keskivaiheilla. Suuret hyppäykset nelinkertaisella lisäpainolla ovat virheitä, joten niitä ei tarvitse huomioida.

Liiallisen painon lisääminen näyttää vaikuttavan vielä kriittisemmin kyseisessä testissä. Pyörijä on täysin epätasapainossa ja suorastaan vääntyy pyöräytyksen aikana.

Kuvassa 24 mittasauvan liike on piirretty 3D-koordinaatistoon. Kuvasta voidaan selkeästi havaita, kuinka sauvan liike on varsin suurta, mikäli painoa kasvatetaan paljon. Myös ilman lisättyä painoa pyöräjän kallistuminen on silmiinpistävän suurta.



Kuva 24. Mittasauvan liike 3D-koordinaatistossa, kun pyöräjän x-asema on vasemmassa reunassa.

Lähtökohtana painonmuutostesteihin oli verrata uuden kevennetyn ja vanhan pyöräjän eroja pyörähdysten aikana. Testeissä saatiin selville, kuinka pyöräjälle tehty kevennys aiheutti pyöräjän suurempaa ja epäsäännöllisempää kallistumista pyörähdysten aikana. Testeissä havaittiin myös, kuinka pyöräjän X-asema vaikuttaa oleellisesti pyöräjän liikkeisiin.

## 7 Jatkokehitys

Työssä suunnitellun mittajärjestelmän suurimpana heikkoutena oli sen kiinnittämisestä aiheutuva epätarkkuus. Mittauksia voitiin tehdä luotettavasti, mikäli testilaitteistoa ei purettu mittausten välillä, mutta toisistaan erillään tehdyt testit eivät olleet keskenään vertailukelpoisia. Kiinnityksen tulisi olla tarkempi ja säännönmukaisempi, jotta kaikki erikseen tehdyt testit olisivat keskenään vertailukelpoisia.

Mittalaitteistossa on myös useassa kohdassa välyksiä ja liitoksia, jotka aiheuttavat mittaustuloksiin virhettä. Liitosten ja kohdistuspintojen määrää pienentämällä voitaisiin päästä parempaan tulosten toistettavuuteen. Jo pelkästään yksittäisten osien tarkemmalla valmistamisella voitaisiin saada parempia mittaustuloksia.

Toisena kehityskohteena on mittalaitteiston asentaminen. Ennen laitteiston asentamista on röntgenlaitteen pääntuki purettava laitteesta. Purku on välttämätön, jotta mittasauva saadaan asennettua keskelle pyörähdysakselia, mutta tulevaisuudessa se olisi hyvä toteuttaa jollain muulla tavalla. Asentaminen olisi huomattavan paljon nopeampaa, ja se olisi myös mahdollista tehdä laitteille, jotka ovat jo asiakkaalla käytössä. Asentamiseen ei tarvittaisi niin perusteellista koulutusta ja testin suorittaminen tehtaan ulkopuoliselle laitteelle ei olisi enää kynnyskysymys.

Asentaminen vaatii aina kaksi henkilöä, sillä mittalaitteisto ei pysy omatoimisesti kiinni laitteessa ennen kiristämistä. Osat ovat hankalia asentaa, ja kiristämisen jälkeen ei ole enää mahdollisuutta hienosäätää mittalaitteistoa. Oikein asentaminen vaatii useamman harjoittelukerran, ja oikein opittunakin asentaminen vaatii paljon aikaa. Mittalaitteiston käyttömukavuutta lisäisi huomattavasti se, että se olisi yhden henkilön asennettavissa ja jälkikäteen vielä säädettävissä.

Kolmantena voidaan pitää mittalaitteiden asentamisesta ja lukemisesta aiheutuvia ongelmia. Tällä hetkellä mittalaitteiden kohdistaminen ja lukeminen on hidasta. Antureiden tulisi olla automaattisia, jotta mittaustulokset saataisiin tallennettua suoraan tietokoneelle. Lukuvirheitä ei enää tulisi ja testin suoritus aika lyhenisi murto-osaan tämänhetkisestä. Mittalaitteiden suorituskkyä voitaisiin helposti parantaa käyttämällä useaa pientä laseretäisyysmittaria tai digitaalisia mittakelloja. Automaattisten antureiden suurena etuna olisi myös mahdollisuus tallentaa tietoja pyöräjän liikkeistä pyörähdysten aikana, jolloin pyöräjän mahdolliset värähtelyt saataisiin tallennettua.

Mittalaitteet täytyy kohdistaa yksi kerallaan, jolloin niiden etäisyydet ja kulmat tulee mitata joka kerta uudelleen. Mittalaitteille olisi hyvä valmistaa erikseen suunniteltu kehikko, jossa ne pysyisivät paikoillaan, ja niin, että niiden kulmaa voisi vielä tarvittaessa hienosäätää.

Edellä mainituista parannusehdotuksista suurin osa olisi mahdollista toteuttaa kohtalaisen pienellä vaivalla. Mittaustulosten pitäisi siis olla vertailukelpoisia keskenään, vaikka kaikki mittalaitteet asennettaisiin uudelleen mittausten välissä. Tämä mahdollistaisi toimivan tilastollisen koejärjestelmän kehittämisen laitteille.

## 8 Yhteenveto

Tämän insinööri työn tarkoituksena oli kehittää mekaaninen mittajärjestelmä röntgenlaitteen liikkeille ja selvittää sen avulla laitteeseen tehtyjen muutosten vaikutuksia. Ensimmäisesti haluttiin tutkia laitteen pyöräjän keventämisestä aiheutuvia liikkeiden muutoksia.

Liikkeiden selvittämistä varten kehitettiin laitteeseen erikseen asennettava mittasauva, jonka liikettä mittaamalla voitiin selvittää pyöräjän liikkeet. Mittasauvaa mitattiin laseretäisyysmittarin ja mittakellojen avulla, samalla kun laitteen pyöräjän kulmaa muutettiin. Mittajärjestelmällä voitiin mitata pyöräjän liikkeitä, ilman että laitteeseen tarvitsi kytkeä virtaa. Tosin laitteesta piti purkaa pääntuki, jotta mittajärjestelmän asentaminen oli mahdollista.

Mittajärjestelmän toistotarkkuudeksi, mikäli mittalaitteet asennetaan uudelleen testien välillä, saatiin yksittäiselle mittauspisteelle noin 0,1917 mm. Mittaustarkkuus voi kuulostaa hyvältä, mutta on liian heikko vertailukelpoisten tulosten saamiseksi. Kuitenkin järjestelmän toistotarkkuus ilman mittalaitteiden uudelleen asentamista oli erittäin hyvä. Yksittäisten mittauspisteiden toistotarkkuus oli jopa 0,0069 mm, joten sen avulla voitiin saada vertailukelpoisia tuloksia.

Pyöräjälle tehtiin painonmuutostestejä, joiden avulla pyrittiin selvittämään laitteen käyttäytymistä kuvaustapahtuman aikana. Kokeista ilmeni, että painon vähentäminen pyörjästä muuttaa pyöräjän liikerataa ja täten saattaa aiheuttaa kuvanlaadun heikentymistä. Suuret painonlisäykset aiheuttivat samankaltaisia muutoksia. Testeistä ilmeni myös pyöräjän sivuttaissuuntaisen X-aseman merkittävä vaikutus pyörähdysten aikaisiin liikkeisiin.

Mittajärjestelmän asentamisesta ja muista virheistä aiheutuvien epätarkkuuksien vuoksi ei ole vielä mahdollista suorittaa täysimittaisia tilastollisen koemenetelmän mukaisia testejä. Luvussa 7 esiteltyjen parannusehdotusten avulla voitaisiin mittajärjestelmällä saavuttaa tarpeeksi suuri mittaustarkkuus, jolloin kaikki mittaustulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Työn ongelman ratkaisemiseen mittajärjestelmä kuitenkin soveltui, ja mittajärjestelmälle asetetut tavoitteet saavutettiin.

## Lähteet

- 1 Tietoa yrityksestä. 2017. PaloDEx Group internetsivut. Verkkodokumentti. <<http://www.palodexgroup.com/fi/>>. Luettu 17.2.2017.
- 2 Jauhiainen, Jukka. 2007. Röntgenkuvaus, digitaalinen kuvaus ja tietokonetomografia. Luentomateriaali. Oulun ammattikorkeakoulu. Verkkodokumentti. <[www.oamk.fi/~jjauhiainen/opetus/mittalaitteet/mittalaitteet07-v1.1.pdf](http://www.oamk.fi/~jjauhiainen/opetus/mittalaitteet/mittalaitteet07-v1.1.pdf)>. Luettu 21.2.2017.
- 3 Hampaiden röntgenkuvaus. 2017. Verkkodokumentti. <<https://fi.webdento.com/hampaiden-rontgenkuvaus/>>. Luettu 17.2.2017.
- 4 Cullinan, Angeline. 1987. Producing Quality Radiographs. Philadelphia: J.B. Lippincott Company.
- 5 Compton Scattering. 2016. Verkkodokumentti. <[http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern\\_lab\\_manual/Compton\\_Scattering.html](http://wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/Compton_Scattering.html)>. Luettu 2.3.2017.
- 6 Dial Indicator-Principle, Diagram, Working, Application. 2015. Verkkodokumentti. <<http://www.mechengg.net/2015/12/dial-indicator-principle-working-diagram.html>>. Luettu 22.2.2017.
- 7 Instruments, Dial Indicators. 2017. Verkkodokumentti. <[http://engineeronadisk.com/V2/book\\_implementation/engineeronadisk-20.html](http://engineeronadisk.com/V2/book_implementation/engineeronadisk-20.html)>. Luettu 27.2.2017.
- 8 Digital Dial Gauge. 2016. Verkkodokumentti. <<http://www.samatools.it/en/departments/8/Digital-dial-gauge.html>>. Luettu 22.2.2017.
- 9 Principles Of Measurement Used By Laser Sensors. 2017. Verkkodokumentti. <<http://www.acuitylaser.com/measurement-principles>>. Luettu 23.2.2017.
- 10 Multi Track Thickness Measurement. 2017. Verkkodokumentti. <<https://www.lap-laser.com/metals-industries/products/ctg-ctlwg/measurement-principles/>>. Luettu 2.3.2017.
- 11 Potentiometri. 2017. Verkkodokumentti. <<https://kompo2010.wikispaces.com/Potentiometri>>. Luettu 24.2.2017.
- 12 Linear Position Sensor. 2017. Verkkodokumentti. <<http://www.directindustry.com/prod/novotechnik/product-13745-518281.html>>. Luettu 2.3.2017.
- 13 Toivokoski, Kari. 2001. Kaikumittaukset ultraäänellä. Tutkielma. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Verkkodokumentti. <[robotti.wdfiles.com/local--files/an-turit/ultra\\_kari\\_toivokoski.pdf](http://robotti.wdfiles.com/local--files/an-turit/ultra_kari_toivokoski.pdf)>. Luettu 24.2.2017.

- 14 RPS – 412A High Accuracy Ultrasonic Sensor. 2015. Verkkodokumentti. <<http://www.migatron.com/high-accuracy-sensor/>>. Luettu 2.3.2017.
- 15 Mittaustulosten käsittely. 2017. Luentomateriaali. Aalto-yliopisto. Verkkodokumentti. <<http://physics.aalto.fi/pub/kurssit/Tfy-3.15xx/Luentomat/Tulostenkäsittely.pdf>>. Luettu 24.2.2017.
- 16 Kiviluoma, Panu. 2016. Mittausepävarmuus ja raportointi. Verkkodokumentti. <<https://mycourses.aalto.fi/course/view.php?id=13889&section=1&lang=sv>>. Luettu 30.3.2017.
- 17 Pietiläinen Antti, Merimaa Mikko, Niemi Tapio, Kärhä Petri & Shpak Maksim. 2012. Mittaustekniikan perusteiden laboratoriotyöt. Aalto-yliopisto. Espoo: Uni-grafia Oy.
- 18 Orthopantomograph OP300 MAXIO. 2014. Verkkodokumentti. <<http://www.instrumentariumdental.com/en/product/op300-maxio/>>. Luettu 20.2.2017.
- 19 Instrumentarium Dental, PaloDEX Group Oy. 2012. Orthopantomograph OP300 Service Manual. Revision 3.
- 20 Introduction to Design of Experiments. 2017. The Pennsylvania State University. Verkkodokumentti. <<https://onlinecourses.science.psu.edu/stat503/node/5>>. Luettu 28.3.2017.

## Mittasauvan suoruuden mittaustulokset

akseli,1 [mm]

akseli



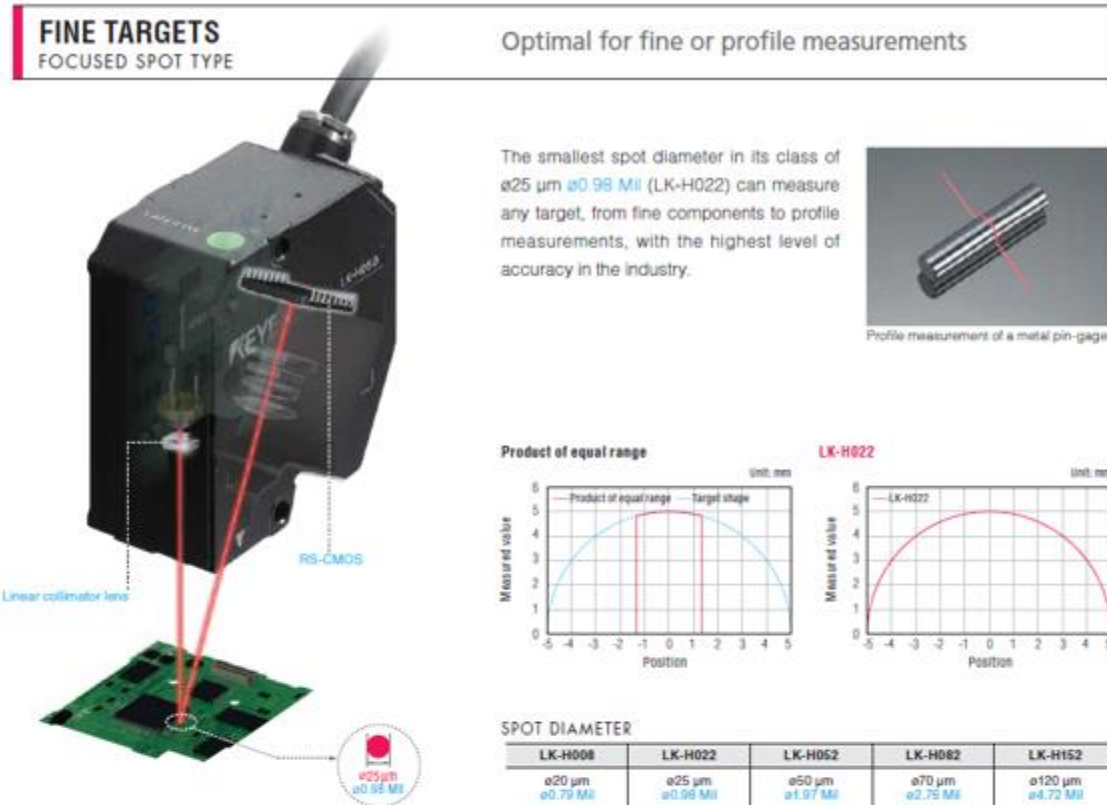
# INSTRUMENTARIUM imaging

Käyttäjä	Seppo Rissanen	Mittaus käynnös	6.3.2017 14:29
Tonittaja		Puh/Fax	
email		Asiakas nimi	
Osan nimi		Päätösnumero	
Measuring machine			

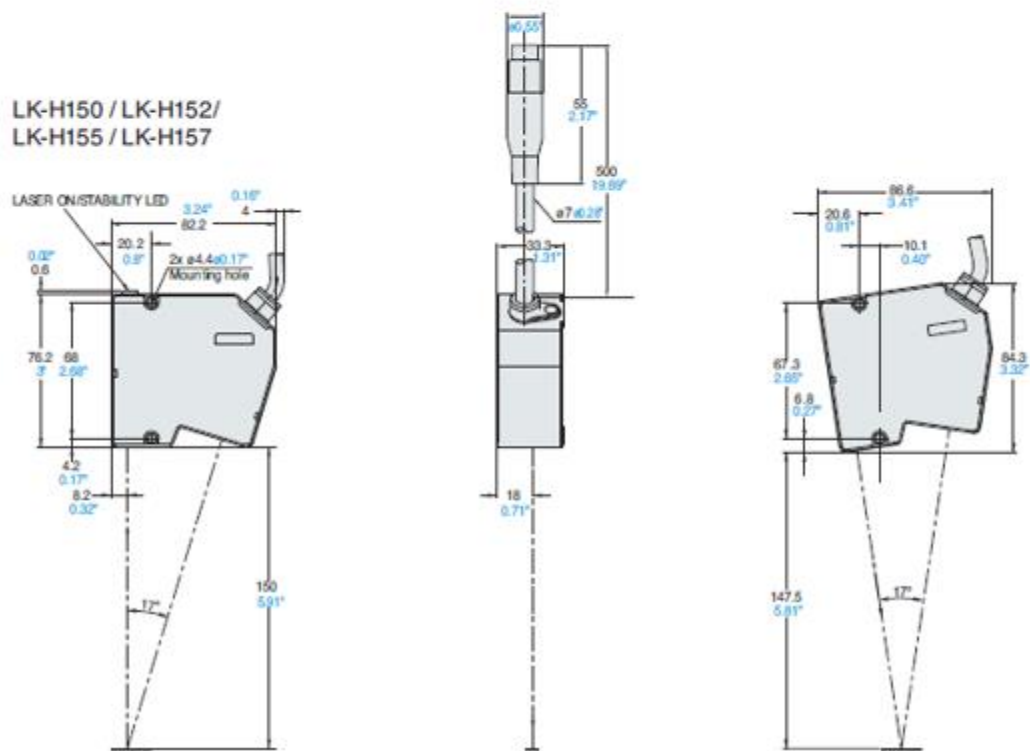
Paikka Y halk. 20 (1)	NM= 0.000 YT= 0.100 AT= -0.100	AV= 0.079 DV= 0.079	-----*****
Paikka Z halk. 20 (1)	NM= 0.000 YT= 0.100 AT= -0.100	AV= 0.111 DV= 0.111	ER= 0.011
Paikka Y halk. 13.2 (2)	NM= 0.000 YT= 0.100 AT= -0.100	AV= 0.184 DV= 0.184	ER= 0.084
Paikka Z halk. 13.2 (2)	NM= 0.000 YT= 0.100 AT= -0.100	AV= 0.417 DV= 0.417	ER= 0.317
Paikka Y halk. 7.9 (2)	NM= 0.000 YT= 0.100 AT= -0.100	AV= 0.288 DV= 0.288	ER= 0.188
Paikka Z halk. 7.9 (2)	NM= 0.000 YT= 0.100 AT= -0.100	AV= 0.243 DV= 0.243	ER= 0.143







## Keyence LK-H152, tekniset tiedot



### LK-H150 / LK-H152/ LK-H155 / LK-H157



Fine target measurement (focused spot type)

Laser Class II	Laser Class IIIa	Reference distance & Measurement range	Repeatability	Beam spot dimensions
LK-H022	LK-H020	 17 mm 0.67" 20 mm 0.79" 23 mm 0.91" Measurement range 20 mm ± 3 mm 0.79" ± 0.12"	0.02 µm 0.0008 Mil	ø25 µm ø0.98 Mil
LK-H052	LK-H050	 40 mm 1.57" 50 mm 1.97" 60 mm 2.36" Measurement range 50 mm ± 10 mm 1.97" ± 0.39"	0.025 µm 0.001 Mil	ø50 µm ø1.97 Mil
LK-H082	LK-H080	 62 mm 2.44" 80 mm 3.15" 98 mm 3.86" Measurement range 80 mm ± 18 mm 3.15" ± 0.71"	0.1 µm 0.004 Mil	ø70 µm ø2.76 Mil
LK-H152	LK-H150	 110 mm 4.33" 150 mm 5.91" 190 mm 7.48" Measurement range 150 mm ± 40 mm 5.91" ± 1.57"	0.25 µm 0.01 Mil	ø120 µm ø4.72 Mil

Fine target measurement (focused spot type)

Model	LK-H008	LK-H020	LK-H022	LK-H050	LK-H052	LK-H080	LK-H082	LK-H150	LK-H152
Mounting mode	Specular reflection	Diffuse reflection	Diffuse reflection	Diffuse reflection	Diffuse reflection	Diffuse reflection	Diffuse reflection	Diffuse reflection	Diffuse reflection
Reference distance	8 mm 0.32"	20 mm 0.79"	20 mm 0.79"	50 mm 1.97"	50 mm 1.97"	80 mm 3.15"	80 mm 3.15"	150 mm 5.91"	150 mm 5.91"
Measurement range <sup>1</sup>	±0.5 mm ±0.02"	±3 mm ±0.12"	±3 mm ±0.12"	±10 mm ±0.39"	±10 mm ±0.39"	±18 mm ±0.71"	±18 mm ±0.71"	±40 mm ±1.57"	±40 mm ±1.57"
Light source	Red semiconductor laser								
	Wavelength	655 nm	650 nm	650 nm	650 nm	650 nm	655 nm	650 nm	655 nm
	Laser class	IEC 60825-1 Class 1	Class 3R	Class 2	Class 3R	Class 2	Class 3R	Class 2	Class 3R
	FDA(CDRH)21CFR Part 1040.10	Class II	Class IIIa	Class II	Class IIIa	Class II	Class IIIa	Class II	Class IIIa
	Output	0.3mW	4.8mW	0.95mW	4.8mW	0.95mW	4.8mW	0.95mW	4.8mW
Spot diameter (at reference distance)	ø20 µm	ø25 µm	ø25 µm	ø50 µm	ø50 µm	ø70 µm	ø70 µm	ø120 µm	ø120 µm
Linearity <sup>2</sup>	±0.05% of F.S. (F.S.=1 mm 0.04")	±0.02% of F.S. (F.S.= 6 mm 0.24")	±0.02% of F.S. (F.S.= 6 mm 0.24")	±0.02% of F.S. (F.S.= 20 mm 0.79")	±0.02% of F.S. (F.S.= 20 mm 0.79")	±0.02% of F.S. (F.S.= 36 mm 1.42")	±0.02% of F.S. (F.S.= 36 mm 1.42")	±0.02% of F.S. (F.S.= 80 mm 3.15")	±0.02% of F.S. (F.S.= 80 mm 3.15")
Repeatability <sup>3</sup>	0.005 µm (0.001µm)	0.02 µm (0.01µm)	0.02 µm (0.01µm)	0.025 µm	0.025 µm	0.1µm	0.1µm	0.25 µm	0.25 µm
Sampling cycle	2.55/5/10/20/50/100/200/500/1000 µs (9 steps selectable)								
Temperature fluctuation	0.02% of F.S./°C (F.S.=1 mm 0.04")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 6 mm 0.24")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 6 mm 0.24")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 20 mm 0.79")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 20 mm 0.79")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 36 mm 1.42")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 36 mm 1.42")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 80 mm 3.15")	0.01% of F.S./°C (F.S.= 80 mm 3.15")
Environment resistance	Enclosure rating	IP67							
	Ambient light	Incandescent lamp or fluorescent lamp: 10000 lux max.							
	Ambient temperature	0 to +50°C 32 to 122°F <sup>4</sup>	0 to +50°C 32 to 122°F				0 to +50°C 32 to 122°F <sup>4</sup>		
	Relative humidity	35 to 85%RH (No condensation)							
	Vibration resistance	10 to 55 Hz, 1.5 mm 0.06" double amplitude in X, Y, and Z directions, 2 hours respectively							
Material	Aluminum die-cast								
Weight	Approx. 240 g	Approx. 230g	Approx. 230g	Approx. 260g	Approx. 260g	Approx. 280g	Approx. 280g	Approx. 300g	Approx. 300g

<sup>1</sup> Measurement range when the sampling cycle is 20 µs or more. <sup>2</sup> This value is obtained when the KEYENCE standard target (White diffuse workpiece or workpiece with a metal mirror surface only for the LK-H008) is measured in the normal measurement mode.  
<sup>3</sup> This value is obtained when the KEYENCE standard target (White diffuse workpiece or workpiece with a metal mirror surface only for the LK-H008) is measured at the reference distance with the number of averaging measurements set to 16384.  
<sup>4</sup> The value in parentheses is a typical example of a measurement with the number of averaging measurements set to 65536 and the sampling cycle to 200 µs. <sup>4</sup> When the ambient temperature rises to 40°C 104°F or more, mount this on a metal plate before use.

## Dial Indicators

An inspection certificate is attached as standard.  
Refer to page IX for details.

- Standard 0.01mm graduation dial indicators having a bezel with an outside diameter of 57mm. All types come with limit markers and a bezel clamp as standard.
- The bezel clamp and lifting lever (optional) can be attached to either the right or left side. These parts can be easily installed and removed without any tools.
- Both the stem and the spindle are made of high-strength quench-hardened stainless steel.
- A carbide contact point is fitted.
- The grand gear is made of stainless steel with high resistance to wear and deformation.
- Application of a hard coating on the surface of the crystal makes the gauge highly scratch- and chemical-resistant.

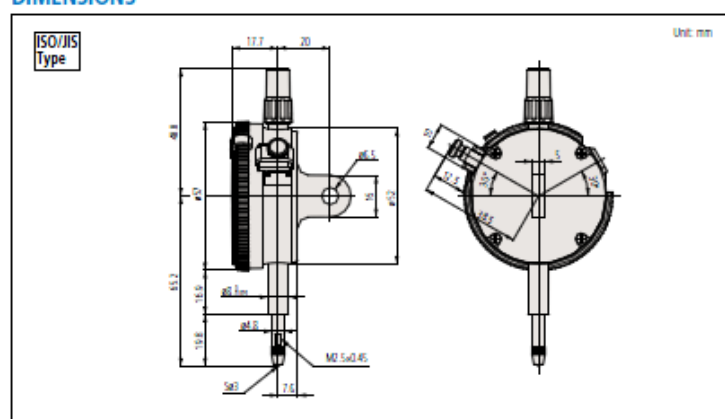


ISO/IS type


Metric		Accuracy										Repeatability		Dial reading		Measuring force	
Order No.		Graduation	Range (range/rev)	Overall				Retrace		1/10 Rev	1 Rev	Repeatability	Dial reading	Measuring force			
w/ lug	Flat-back																
20465	20465B	0.01mm	10mm (1mm)	13µm	3µm	5µm	10µm	3µm	±0-100	1.4N or less							
20465-09	20465B-09	0.01mm	10mm (1mm)	15µm	3µm	5µm	10µm	3µm	±0-100	1.4N or less							
20465-60	20465B-60	0.01mm	10mm (1mm)	13µm	3µm	5µm	10µm	3µm	±0-100	2.5N or less							


\*Use in a vertical position only (contact point downward)


## Unit 100





Brown & Sharpe JET 512K, tekniset tiedot






















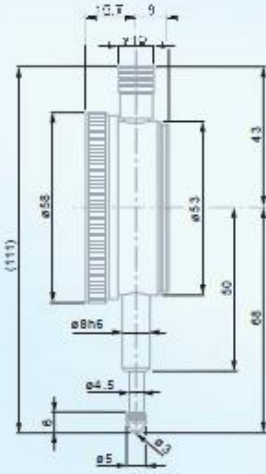
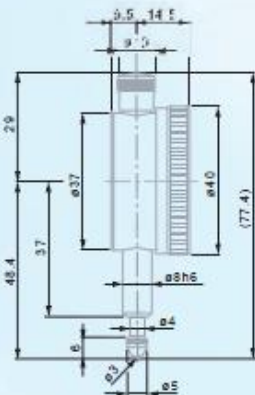

















### JET Type Dial Gages
















#### Inch models

											
	in	mm	in	in	in			Total Reading error (in)	Repeat-ability in	Hyste-resis in	N
314AK	.0005	40	.200	.212	.020	0 +10 -20		.0006	.00015	.00015	1.4
513AK	.0005	58	.400	.420	.050	0 +25 -50		.0007	.00015	.00015	1.4

#### Metric models

											
	mm	mm	mm	mm	mm			Total Reading error (µm)	Repeat-ability µm	Hyste-resis µm	N
313K	0.01	40	5	5.4	0.5	0 +25 -50		14	3	3	1.4
512K	0.01	58	10	10.5	1	0 +50 +100		17	3	3	1.4

Rapp Industrial Sales  
888 789-7277

E-35