VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Deividas SABAITIS

APSKRITIMINIŲ RASTRINIŲ SKALIŲ KOMPAKTINĖJE LAIKMENOJE TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MATAVIMŲ INŽINERIJA (10T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2014

Disertacija rengta 2009–2014 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Moksliniai vadovai

prof. habil. dr. Vytautas GINIOTIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T), (2009–2012).

doc. dr. Domantas BRUČAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T), (2012–2014).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2296-M mokslo literatūros knyga
http://leidykla.vgtu.lt

ISBN 978-609-457-753-6

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2014
© Deividas Sabaitis, 2014
deividas_sabaitis@yahoo.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Deividas SABAITIS

RESEARCH OF CIRCULAR RASTER SCALES IN COMPACT DISK

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MEASUREMENT ENGINEERING (10T)



Vilnius TECHNIKA 2014

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2014.

Scientific Supervisors

Prof Dr Habil Vytautas GINIOTIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T), (2009–2012).

Assoc Prof Dr Domantas BRUČAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T), (2012–2014).

Reziumė

Apskritiminės skalės šių dienų technologijose atlieka svarbų vaidmenį ir užtikrina tikslų kampo pasukimą įvairiausiuose apdirbimo centrų pasukimo staluose, perdavimo mechanizmuose, spektrometruose, teleskopuose ir t. t. Disertacijoje yra nagrinėjama tiek pagrindiniai, tiek klasikiniai kampų matavimo būdai, lazerinės matavimo sistemos, keitikliai. Pagrindinis šio tiriamojo darbo objektas yra kampinių apskritiminių skalių matavimo sistema, skirta naujo tipo kampinių skalių, kurios yra pagamintos ant CD pagrindo, pritaikant lazerines technologijas, įgyvendinimas. Naujo lazerinio padalų žymėjimo bei matavimo būdo, analizė ir teorinis pagrindimas.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir trys priedai.

Pirmajame skyriuje yra apžvelgiama literatūra ir jos šaltiniai, kuriais remiantis yra surenkama reikalinga informacija tolimesniam darbui. Išanalizuojami klasikiniai kampų matavimo būdai, įvertinti jų matavimo privalumai ir trūkumai. Nagrinėjama kampų matavimo įranga ir komparavimo būdai, kai kurių pamatinių etalonų tikslumo parametrai. Didelis dėmesys skiriamas apskritiminėms skalėms, jų brūkšnio padėties įvertinimo proceso tyrimui. Taip pat tikslinami disertacijos darbo uždaviniai. Skyriuje analizuojami šiuolaikiniai skalių matavimo būdai, kampo keitikliai, taip pat apžvelgiamos naujos optinės matavimo sistemos *CyberTECHNOLOGIES*, kurias galima pritaikyti naujų skalių matavimams atlikti.

Antrajame skyriuje pateikiami naujo optinio ir geodezinio justavimo įrenginio (centravimo – gulsčiavimo staliuko) analitiniai ir eksperimentiniai tyrimai. Gauti nauji, originalūs duomenys centravimo – gulsčiavimo staliuko stabilumui įvertinti.

Trečiame (paskutiniame) skyriuje yra atliekami eksperimentiniai skalių optiniai matavimai su skirtingomis optinėmis matavimų sistemomis. Skyriuje pateikiamas vaizdo gavimo matematinis modelis. Įvertinami vaizdo gavimo sistemos fiziniai dėl judesio atsirandantys ir kiti paklaidų šaltiniai. Gauti nauji, originalūs duomenys brūkšnio padėties paklaidoms įvertinti.

Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai: penki – konferencijų medžiagose, trys referuotose ISI duomenų bazėje. Darbo tema įregistruotas patentas Lietuvos patentų biure.

Abstract

The raster scales play a large role and ensures precise angle of rotation of a wide range of machining centers, rotary tables, transfer mechanisms, spectrometers, telescopes, etc in the nowadays technology. The thesis deals with both basic and classic angle measurement techniques, laser measurement systems and angle encoders. The main object of this research work is implementation of the angular measurement system for a new type angular scales, which are produced on CD base by applying laser technology. Analysis and theoretical justification of the new laser marking and measuring method. The dissertation consists of introduction, three chapters, conclusions, bibliography and author of publications on the topic as well and three annexes.

The first chapter is an overview of the literature and its sources, which is collected on the basis of the information required for further work. The classical angle measurement techniques are analyzed so that to assess their measuring advantages and imperfections. The angle measurement equipment and techniques such as the comparator are presented and parameters of precision some standarts are submitted. Great attention is intended for evaluation process of the investigation of circular scales, and their line position. Also revised dissertation work tasks. Modern measurement techniques for circular scales are analyzed, angle encoders, also the new optical measurement systems Cybertechnology are presented in this chapter.

In the second chapter was presented analytical and experimental research of the new optical and geodetic adjustment device (alignment – levelling table). The new, original data to evaluate stability of this device was found in this chapter as well.

The third (last) chapter is the experimental optical measurements with different optical measurement systems of the new CD circular scales. Section provides a mathematical model for imaging of the line. Found a new, original data to evaluate the errors of the position of the line.

The topic of the dissertation was published in 8 articles: five – conference proceedings, three in ISI database. The patent on the topic of the dissertation is registered in the patent bureau in Lithuania.

Žymėjimai

Simboliai

μm – mikrometras;

nm – nanometras;

20× – 20 kartų padidinimo;

50× – 50 kartų padidinimo;

$\overline{x}$ – imties vidurkis;

S – vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis;

M – matematinės vilties įvertis.

Santrumpos

3D – trimatis vaizdas;

BE – baigtinių elementų;

CD – angl. *digital optical disc*, duomenų laikmena;

CNC – angl. *computer numerical control*, kompiuterizuotas prietaisų valdymas;

CCD – angl. *charge-coupled device*, surištojo krūvio prietaisas;

Nd: YAG – angl. *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*, itrio aliuminio granato lazeris;

CO_2 – angl. *carbon dioxide laser*, anglies dioksido lazeris;

CMOS – angl. *complementary metal oxide semiconductor*, papildytojo metalo oksido ir puslaidininkio prietaisas;

ISI – angl. *International Statistical Institute*, tarptautinis statistikos institutas

NMI – Nacionalinė metrologijos institucija;

OPF – optinė perdavimo funkcija;

MPF – moduliacijos perdavimo funkcija;

PK – personalinis kompiuteris;

PTB – vok. *physikalisch-technische Bundesanstalt*, Vokietijos nacionalinis metrologijos institutas;

VTIF – vaizdo taško išplitimo funkcija;

NIST – Jungtinių Amerikos valstijų nacionalinis metrologijos institutas.

Turinys

ĮVADAS 1
Problemos formulavimas 1
Darbo aktualumas 2
Tyrimų objektas 3
Darbo tikslas 3
Darbo uždaviniai 3
Tyrimų metodika 4
Darbo mokslinis naujumas 4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė 4
Ginamieji teiginiai 5
Darbo rezultatų aprobavimas 5
Disertacijos struktūra 5

1. KAMPŲ MATAVIMO BŪDŲ IR OPTINIŲ MATAVIMO SISTEMŲ ANALIZĖ .. 7
1.1. Kampų matavimo sistemų tikslumo parametrų analizė 8
1.2. Kampų matavimo įranga ir komparavimo būdai 11
1.2.1. Poligonas/Autokolimatorius 11
1.2.2. Moore's 1440 Precision Index staliukas 13
1.2.3. Apskritiminės skalės-limbai 14
1.2.4. Fotoelektriniai kampų matavimo keitikliai 16
1.3. Lazerinis girometras 17
1.4. Kampų tikrinimo komparatorius 18
1.5. Klasikiniai kampų matavimo būdai 19
1.6. Optinės skalių matavimo sistemos 27
1.7. Brūkšnio padėties įvertinimo procesas 30
1.8. Brūkšnio detektavimo algoritmo analizė 37
1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas 42

2. OPTINIŲ IR GEODEZINIŲ PRIETAISŲ JUSTAVIMO ĮRENGINIO ANALITINIAI IR EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI 43
2.1. Centravimo–gulsčiavimo staliuko teoriniai tyrimai 44
2.2. Eksperimentiniai staliuko dinaminiai tyrimai 49
2.3. Centravimo–gulsčiavimo staliuko eigos matavimai 58
2.4. Antrojo skyriaus išvados 64

3. NAUJO OPTINIO PADALŲ ŽYMĖJIMO BRŪKŠNIO PADĖTIES ĮVERTINIMO PROCESO TYRIMAS 65
3.1. CD disko skalių (padalų) žymėjimas naudojant CO_2 LA-7050 ir Nd:YAG 50DP tipų lazerius 66
3.2. Brūkšnio detektavimo algoritmas 72
3.3. Optiniai CD skalių rastrų matavimai 83
3.4. Trečiojo skyriaus išvados 97

BENDROSIOS IŠVADOS 99

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 101

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS DISERTACIJOS TEMA . 111

PRIEDAI 113
A priedas. Skalių matavimai optine matavimų sistema. Signalų apdorojimas 114
B priedas. CD skalės 1 brėžinys 130
C priedas. CD skalės 2 brėžinys 131
D priedas. Patentas: optinių ir geodezinių prietaisų justavimo įrenginys 132

Contents

INTRODUCTION 1
Topicality of the problem 1
Actuality of the work 2
Object of research 3
Aim of the work 3
Tasks of the work 3
Methodology of research 4
Scientific novelty 4
Practical value of research 4
Defended propositions 5
Approbation of work results 5
Structure and contents of the work 5

1. THE OVERVIEW OF ANGLE MEASUREMENT METHODS. THE ANALYSIS OF ESTABLISHING THE LINE POSITION 7
1.1. Analysis of accuracy of the angle measurement system 8
1.2. Anle measuring equipments and methods of comparation 11
1.2.1. Polygon/Autocollimator 11
1.2.2. Moore's 1440 Precision Index table 13
1.2.3. Circular scales-limb 14
1.2.4. Photoelectric of angle measurement encoders 16
1.3. Laser gyroscope 17
1.4. Angle measurement comparator 18
1.5. Classic methods of measuring angle 19
1.6. Optical measurement systems of circular scales 27
1.7. The analysis of establishing the line position 30
1.8. The analysis of the line of detection of algorithm 37

1.9. Conclusions of 1st chapter and tasks of the thesis 42

2. THE ADJUSTMENT MECHANISM FOR OPTICAL AND GEODESIC DEVICES. ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ALIGNMENT-LEVELLING TABLE 43

2.1. Theoretical research of centering-levelling table 44
2.2. Experimental dinamic research of centering-levelling table 49
2.3. The movement measurement of centering-levelling table 58
2.4. Conclusion of 2th chapter 64

3. THE EVALUATION PROCESS RESEARCH OF THE LINE POSITION IN THE NEW OPTICAL STEP NOTATION 65

3.1. Raster marking using different types of laser: CO2 LA-7050 ir Nd:YAG 50DP on CD disc 66
3.2. Algorithm of the line detection 72
3.3. Optical measurement of raster on CD disc 83
3.4. Conclusion of 3th chapter 97

GENERAL CONCLUSIONS 99

REFERENCES 101

LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION 111

APPENDIXES 113

Appendix A. Measurement of the scale using optical measurement system. Processing of signals 114
Appendix B. Drawing Nr.1 of the CD scale 130
Appendix C. Drawing Nr.2 of the CD scale 131
Appendix D. Patent: adjusting device for optical and geodetic instruments 132

Įvadas

Problemos formulavimas

Metrologija ir matavimų technologija užima svarbią vietą šiuolaikinėje visuomenėje. Matavimų mokslo uždavinys yra išplėsti objektyvių matavimų ribas. Didėjant visuomenės poreikiams nuolat tobulinamos matavimų technologijos, taikomi pažangiausi jų projektavimo ir įgyvendinimo metodai. Metrologinė infrastruktūra sudaro svarbią išsivysčiusių šalių technologinės infrastruktūros dalį.

Informacinės kampų matavimo sistemos bei jų elementai – rastrinės ir kodinės skalės, kampo keitikliai, žiediniai lazeriai (lazeriniai girometrai) yra labai plačiai naudojami automatizuotose staklėse ir mašinose, robotų valdymo sistemose, matavimo prietaisuose ir navigacijos įrenginiuose. Linijinių poslinkių mechanizmai ir mašinos bei matavimo technika yra labai gerai išnagrinėti ir aprūpinti matavimo technika bei etalonais. To negalima pasakyti apie kampinių matavimų prietaisus ir sistemas. Kampų matavimo sistemų tikslumo parametrų tikrinimas reikalauja specialios įrangos ir kampo etalonų panaudojimo, o didelė šiuolaikiniuose įrenginiuose ir prietaisuose naudojamų kampų matavimo sistemų įvairovė dar labiau apsunkina šį uždavinį.

Linijiniai matavimo būdai, matavimo sistemos, jų elementai yra pakankamai išsamiai išnagrinėti monografijoje (Giniotis 2005). Tačiau yra kur

kas sudėtingiau tiriant kampų matavimo būdus, tikrinant prietaisų tikslumo parametrus bei atliekant apskritiminių skalių matavimus. Visa tai reikalauja ne tik specialios įrangos, bet ir žinių kampų matavimo raidoje, tam, kad būtų galima analizuoti bei tobulinti esamus kampų matavimo būdus, galbūt ieškoti kūrybos naujiems matavimo bei skalių gamybos būdams įgyvendinti. Verta paminėti, jog dauguma klasikinių matavimo kampų būdų turi vienokių ar kitokių trūkumų pvz. keturių mikroskopų matavimas, dėl jų gabaritų neleidžia matuoti mažų diametrų skales, arba matavimas daugiakampe prizme ir autokalimatoriumi taip pat riboja galimų limbų diametrą, kituose matavimo būdų atvejuose nepriimtinas sukimosi netolygumo atsitiktinės paklaidos, kurios sudaro nuo 1"-3" vertę, tad pastarosios yra nepriimtinos tiksliems skalių matavimams. Skalių gamybos technologijos reikalauja ypatingų technologijų ir specialios įrangos ar jų atskirų komponentų sudėtingumo bei patikimumo. Pvz., mechaniniams brūkšnelių įpjovimams naudojami labai maži peiliukai, kurių antgaliai laikui bėgant atbunka ir juos reikia galąsti iš naujo. Kiek tobulesnis yra fotolitografinis būdas, kur skalės yra ėsdinamos ir paskui užgarinamos metalų sluoksniu vakuume taikant Diodur, Zerodur, Aurodur bei kitas gamybos technologijas.

Darbe pagrindinis dėmesys skirtas įvertinti naujų apskritiminių skalių gamybos technologijos įtaką kampo tikslumui bei skalių matavimo stendo konstrukcijos įtaką kampo matavimo tikslumui. Nors atliekami tyrimai taikomi konkrečios kampų matavimo sistemos tikslumo uždaviniams spręsti, jų rezultatai turi platesnę taikomąją prasmę ir gali būti panaudoti kuriant ir kitos paskirties precizines sistemas, pasižyminčias kokybiškai naujomis savybėmis.

Darbo aktualumas

Brūkšniniai kampo matai naudojami kaip palyginimo matai kampiniams poslinkiams CNC (angl. *computer numerical control*) staklėse, koordinatinėse matavimo priemonėse, daugelyje įrenginių. Viena iš svarbiausių jų charakteristikų – brūkšnių padėties paklaidų dydžiai. Realios jų reikšmės gali būti nustatomos tik kalibravimu. Todėl tokių matų gamyba, tiekimas pripažintiems pasaulio vartotojams įmanomas tik išsprendus sieties su kampo vieneto etalonu klausimą. Gamybą užtikrinantis kalibravimas turi būti realizuotas įterptinės metrologijos sąlygomis, tai yra, kai nesudaromos etaloninės kalibravimo sąlygos.

Rastrinių skalių ir keitiklių matavimo analizė pabrėžia šiuolaikinių matavimo technikos didelių reikalavimų gausą. Šioje srityje išlieka aktualūs teoriniai ir techniniai klausimai:

1. Limbų ir rastrinių skalių matavimo būdų ir priemonių kūrimas, leidžiantis didinti matuojamųjų verčių skaičių bei sudaryti galimybes.
2. Mažo diametro limbų ir mažų matmenų ilgio skalių matavimo problemos.
3. Naujų informacinių matavimo sistemų ir kampų bei ilgių matų tikslumo didinimo metodai ir priemones.

Tyrimų objektas

Disertacijos tyrimų objektas yra naujų apskritiminių skalių kampų matavimo sistema. Tyrimas apima:

1. Panašių sistemų ir šiai problemai spręsti skirtų tyrimų analizę.
2. Brūkšnių padėties nustatymo algoritmo panaudojimą, jo analizę, optimizavimą, matematinių modelių sprendimo metodus.
3. Kampinių paklaidų kylančių dėl apskritiminės skalės gamybos technologijos įsisavinimo, jų kompensavimo metodus ir priemones.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas sukurti naują, kampinių apskritiminių skalių matavimo sistemą skirtą naujo tipo skalių, kurios yra ant CD pagrindo ir gaminamos naudojant lazerines technologijas, kalibravimui atlikti.

Darbo uždaviniai

Norint įgyvendinti darbo tikslą būtina surasti sprendimą šiems darbo uždaviniams:

1. Sukurti kampinių apskritiminių skalių matavimo sistemą, skirtą naujo tipo skalių kalibravimui atlikti.
2. Sudaryti kampinių apskritiminių skalių matavimo sistemos dinaminius ir matematinius.
3. Išanalizuoti būdingas apskritiminių skalių kampines paklaidas, panaudojant skirtingas brūkšnio formavimo ant tiriamų skalių technologijas ir ištirti pagaminimo technologijos įtaką apskritiminių skalių tikslumui.
4. Sudaryti apskritiminių skalių kampinių įverčių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimo metodiką.

Tyrimų metodika

Teoriniai tyrimai remiasi vaizdų apdorojimo teorijos, teorinės optikos, mechatronikos ir matavimų teorijos principais, panaudojant programinę įrangą *Matlab*, *SolidWorks* ir *OriginPro.* Sukurti ir analizuoti matematiniai sistemų modeliai. Pagrindiniai statistiniai skaičiavimai buvo atlikti naudojant statistinius paketus *Microsoft Excel* ir *OriginPro.*

Apskritiminių skalių kampų matavimai buvo atlikti naudojant optinį kampų matavimo stendą su pjezo pavara bei *Heidenhain* kampo keitikliu (RON 905). Sukurto naujo optinių ir geodezinių prietaisų justavimo įrenginio eksperimentiniai bei dinaminiai tyrimai atlikti mikroskopu NIKON MM-400 ir autokolimatorium „Taylor Hobson precision".

Darbo mokslinis naujumas

Šiame moksliniame darbe gauti tokie nauji rezultatai:

1. Sukurta kampinių apskritiminių skalių matavimo sistema skirta naujo tipo skalių kalibravimui atlikti.
2. Sukurtas ir pagamintas optinių ir geodezinių prietaisų justavimo įrenginys, kuris pritaikytas tiriamos matavimo sistemos kampų matavimo tikslumo gerinimui.
3. Nustatyta skirtingos brūkšnio formavimo ant tiriamų skalių technologijos įtaka apskritiminių skalių formuojamo brūkšnio kokybei ir gautoms kampinėms paklaidoms įvertinti.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Atlikus literatūros šaltinių, teorinių ir fizinių modelių tyrimus, o taip pat ištyrus šiuolaikinių aukštųjų technologijų teikiamas galimybes, nustatytos skirtingais gamybos būdais pagamintų apskritiminių skalių būdingos paklaidos.

Gauti duomenys panaudoti apskritiminių skalių kampų matavimo stendo matavimo rezultato neapibrėžčiai įvertinti.

Tyrimo rezultatai panaudoti naujo pozicionavimo staliuko, kuris naudojamas naujai sukurtame apskritiminių skalių kampų matavimo stende, konstrukcijai tobulinti.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurtą apskritiminių skalių matavimo sistemą galima taikyti naujo tipo skalių kalibravimui atlikti.
2. Sudarytą metodiką galima taikyti skirtingais gamybos būdais pagamintų apskritiminių skalių brūkšnių padėties kampo tikslumui įvertinti.
3. Sudarytą metodiką galima taikyti apskritiminių skalių kampinių įverčių matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimui atlikti.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbti 3 straipsniai recenzuojamuose moksliniuose žurnaluose: žurnale Solid State Phenomena (in *ISI Web of Science)*, Geodesy and cartography (*in DB Approved by CSL)* taip pat Mechanika.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje, Vilniuje, 2010–2011 m.;
- Tarptautinėje konferencijoje „IMEKO“, Florence, Italy, 2013;
- Tarptautinėje konferencijoje „International Congress on Electrical Metrology“, Buenos Aires, Argentina, 2013;
- Tarptautinėje konferencijoje „XX IMEKO World Congress“, Busan, Republic of Korea, 2012.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas ir trys skyriai. Taip pat yra keturi priedai.

Darbo apimtis yra 124 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 103 numeruotos formulės, 87 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 134 literatūros šaltiniai.

1

Kampų matavimo būdų ir optinių matavimo sistemų analizė

Skyriuje analizuojami kampų matavimo būdai, optinės matavimo sistemos ir brūkšnio padėties nustatymo metodai. Pateikiami kampo etalonų tikslumo rodikliai, kurie palyginti su kitais kampo etalonų tikslumo parametrais. Apžvelgtos moderniausios kampinių matų kalibravimo priemonės, pateikti kitų tyrimų, susijusių su šios disertacijos tematika, rezultatai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir darbo tikslai.

Kalibravimas, tai yra matavimo neapibrėžties nustatymas, plačiausiai taikomas pramoninėje metrologijoje ir siauresniu mastu teisinėje metrologijoje – naudojamų etalonų siečiai užtikrinti (Harris 2014).

Padidėjus matavimų tikslumams daugelyje matavimo sričių, atsirado papildomi labai dideli reikalavimai kampų matams-etalonams, taip pat susiformavo naujas požiūris į matavimo etalonus. Tarptautinių ir nacionalinių matavimo etalonų kūrimas ir palaikymas yra savita matavimų mokslo sritis, kuriai būdinga siekti kuo didesnio matavimo etalonų tikslumo (kuo labiau sumažinti konkretaus vieneto etalono neapibrėžtį ir t. t.). Žinoma daugiausia dėmesio skiriama pagrindinių SI vienetų etalonams. Šalia pirminio etalono tiek valstybinėse metrologijos institucijose, tiek pramonės įmonėse matavimo priemonėms kalibruoti vartojami įvairūs *atraminiai etalonai,* kurie yra ne tokie sudėtingi, tikslūs ir ne tokie brangūs kaip pirminiai etalonai. Tiksliausi šalyje

turimi etalonai vadinami *valstybiniais.* Jie nebūtinai turi būti pirminiai. Nacionalinių matavimo etalonų lygį lemia šalies poreikiai, metrologinės galimybės bei turimi resursai. Tačiau labai svarbu užtikrinti, kad matavimai, atlikti bet kur šalyje kasdien naudojamomis laboratorinėmis ar darbinėmis matavimo priemonėmis, derintųsi tarpusavyje, t. y. tą pačią matuojamojo dydžio vertę atitiktų tas pats matavimo rezultatas (matavimo neapibrėžties ribose). Šią dydžio vertę ir atkuria tarptautinis ar nacionalinis etalonas. Dydžio vieneto vertės perdavimas etalonų sieties grandine (nuo aukščiausio lygio etalono iki pat darbinės matavimo priemonės) vadinama *susiejimu.* Etalonų *sietis* (atsekamumas) pasiekiama, kai kiekviena kalibravimo pakopa yra susijusi su greta esančia per įteisintą sertifikavimo sistemą (Harris 2014). Matavimo etalonai paprastai klasifikuojami:

- nacionalinis etalonas;
- atraminis etalonas;
- darbinis etalonas – įmonės etalonas.

Pirminiai etalonai yra sudėtingi ir brangūs, be to, dažnai jie nepritaikyti praktinėms kalibravimo reikmėms. Šiam tikslui naudojami žemesnių kalibravimo grandinės pakopų etalonai – atraminiai arba darbiniai. Kiekvienos žemesnės pakopos etalonai kalibruojami pagal greta esančio aukštesnio lygio etalonus. Žemesnės tikslumo pakopos etalonų kalibravimo neapibrėžtis yra 3...4 kartus didesnė už gretimos aukštesnės tikslumo pakopos etalonų kalibravimo neapibrėžtį. Šio skyriaus medžiaga buvo paskelbta autoriaus publikacijoje (Sabaitis *et al*. 2011).

1.1. Kampų matavimo sistemų tikslumo parametrų analizė

Šiuolaikinėje technikoje nuolat atsiranda poreikis apskritimą dalinti į kitokių, nesisteminių plokščiojo kampo vienetų padalas (1.1 lentelė), pavyzdžiui, dvejetainėje, dešimtainėje sistemoje ir kt. Be dvejetainių, gonų ir kt. vienetų (1.1 lentelė), šiuolaikinėje technikoje yra naudojami ir kitokie specialūs padalų skaičiai, pvz., $N \times 10^n$, kai N ir n = 1, 2, 3, Tai yra susiję su skaitmeninės technikos naudojimu informacinėse matavimo sistemose bei specialių techninių reikalavimų atitikimu įvairiose matavimo sistemose, pavyzdžiui, navigacijos prietaisuose, kai reikia bet kuriuo matavimo momentu žinoti objekto padėtį skaičiuojant nuo jo pradinės padėties. Tokiais atvejais naudojami ne kaupiantieji, bet kodiniai keitikliai, turintys atskaitymo sistemoje kodines skales (Giniotis 2005).

1.1 lentelė. Kampų matavimo vienetai
Table 1.1. Angle measuring units

Vienetai	Kartotiniai vienetai
Radianai	2π radianų apskritime
Kampų laipsniai	$360° \times 60' \times 60''$; $360° = 21600' = 1296000''$; $1° \approx 0{,}0174533$ rad
Dešimtainiai	10^n padalų apskritime, kai $n = 1, 2, 3,...$
Dvejetainiai	2^n padalų apskritime, kai $n = 1, 2, 3,...$
Gonai (gradai)	400 padalų apskritime; $1^g = 100^c$ (metrinių min.); $1c = 100^{cc}$ (metrinių sek.); $1^g = 0{,}01570796$ rad; $1^g = 0{,}9°$; $1^g = 0{,}01^L$; $1° = 1{,}111^g$
Metriniai laipsniai	1000 *M°* ir dešimtosios jų dalys
Kvadrantai	Ketvirtadalis apskritimo ir jo dešimtosios dalys, *d, md*

Pamatinių etalonų tikslumo parametrai pateikti 1.2 lentelėje, papildomų etalonų charakteristikos ir kampo vertės pateiktos 1.3 lentelėje.

1.2 lentelė. Kai kurių pamatinių etalonų tikslumo parametrai
Table 1.2. Accuracy parameters of some of the fundamental standards

Eil. Nr.	Kampų pamatiniai etalonai	Diskretiš-kumas	Vid. kvad. kalibravimo nuokr.	Sistemingoji mato paklaida
1.	Poligonas – autokolimatorius	10°; 15°; 30°,…	0,15″	0,30″
2.	Moore's 1440 Precision Index	15′	0,04″	± 0,1″
3.	Etaloninė apskritiminė skalė – mikroskopas	3°, 4°,5°	0,2″	~3″
4.	Fotoelektriniai kampo keitikliai	1″; 0,1″	~ 0,3″	~ 1″

1.3 lentelė. Papildomų kampo etalonų tikslumo charakteristikos
Table 1.3. Accuracy characteristics of additional angle standards

Mato tipas	Kampo matai	
	Charakteristika	Vertė
Valstybinis etalonas	Vidutinis kvadratinis matavimo rezultato (S) nuokrypis perduodant mato vienetą, taikant 12 briaunų prizmės 132 susijusius santykinius matavimus, ne didesnis kaip Nepašalinta sistemingoji paklaida, ne didesnė kaip	0,01″ 0,02″
Tarpiniai etalonai, etalonai kopijos	Palyginimo su pirminiu etalonu vidutinis kvadratinis (S_Σ) rezultatų nuokrypis	0,015″ – 0,04″
Darbiniai etalonai	Palyginimo su pirminiu etalonu rezultatų vidutinis kvadratinis nuokrypis	0,03″ – 0,08″
1 klasės pamatinės matavimo priemonės	Absoliučioji paklaida esant 0,99 tikimybei, ne didesnė kaip	0,1″ – 0,4″
2 tikslumo klasės keitikliai	Kampo rodmenų paklaidos didžiausia leidžiamoji reikšmė (Δ_D)*, ne didesnė kaip	2,0″
2 klasės pamatinės matav.priem.	Absoliučioji paklaida esant 0,99 tikimybei, ne didesnė kaip	0,4″ – 2,0″
1 tikslumo klasės keitikliai	Kampo rodmenų paklaidos didžiausia leidžiamoji reikšmė (Δ_D)*, ne didesnė kaip	1″
2 tikslumo klasės keitikliai	Kampo rodmenų paklaidos didžiausia leidžiamoji reikšmė (Δ_D)*, ne didesnė kaip	2,0″
3 tikslumo klasės keitikliai	Kampo rodmenų paklaidos didžiausia leidžiamoji reikšmė (Δ_D)*, ne didesnė kaip	5,0″
0 ir 1 klasės brūkšniniai matai	Apskritiminės skalės (limbo) absoliučioji „diametrų“ ** paklaida. Leistina teodolito limbo krypties***vid. kvadratinio nuokrypio reikšmė	0, 2″ 0, 4″ 0, 6″

Į kai kurių 1-os ir 2-osios klasių keitiklių reikšmę įeina visa sisteminguųjų paklaidų įvairovė, būdinga konkretaus tipo keitikliams, bei jų atsitiktiniai sandai. Pilnoji limbo „diametrų” kampinės padėties paklaida susideda iš sisteminės ir atsitiktinės paklaidų. Limbo „diametras” – menama linija, arčiausiai einanti pro

centrą ir jungianti priešingose centro pusėse esančių apskritiminės skalės brūkšnių porą. Limbo „diametro" paklaida – priešpriešinių brūkšnių linijos padėties matavimo rezultato ir jos tikrosios padėties vertės skirtumas, išreiškiamas kampiniais dydžiais.

1.2. Kampų matavimo įranga ir komparavimo būdai

1.2.1. Poligonas/Autokolimatorius

Papildomieji SI vienetai – tai plokščio ir erdvinio kampo vienetai: radianas ir steradianas. Jų matavimams daugiausia naudojama iš specialių metalo lydinių arba iš kvarcinio stiklo pagamintos daugiakampės prizmės, į kurių briaunų plokštumas yra nukreipiamas autokolimatoriaus spindulys. Atsispindėjusio šviesos spindulio nuokrypa nuo optinės ašies išmatuojama autokolimatoriaus rodmenų bloke.

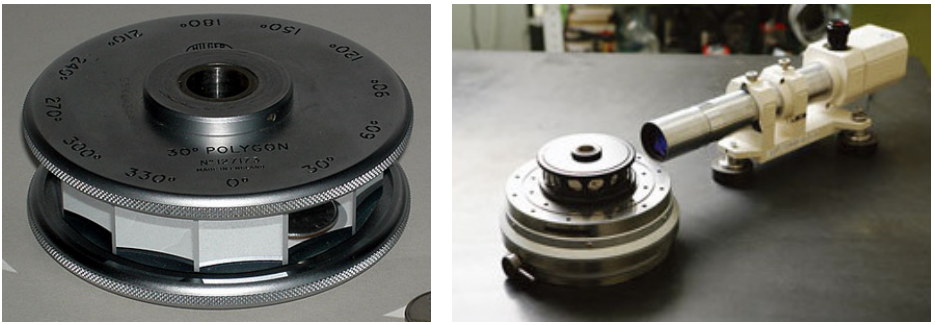
Poligonas/autokolimatorius. Stendo centre bazuojama precizinio tikslumo daugiakampė prizmė-poligonas (1.1 pav.). Precizinio tikslumo daugiakampė prizmė turi veidrodinius paviršius, tarp kurių yra labai tikslus kampas. Dažniausiai daugiakampę prizmę sudaro 12–20 arba 24, 36, o kartais net 72 paviršiai. Daugiakampės prizmės dažniausiai gaminamos iš plieno arba kvarcinio stiklo.

Autokolimatorius – tai prietaisas naudojamas tikslių kampų palyginimui, naudojant veidrodžio atspindį (1.2 pav.). Autokolimatoriaus veikimo principas pagrįstas šviesos šaltinio atspindžiu nuo veidrodinio paviršiaus (Bručas 2010).

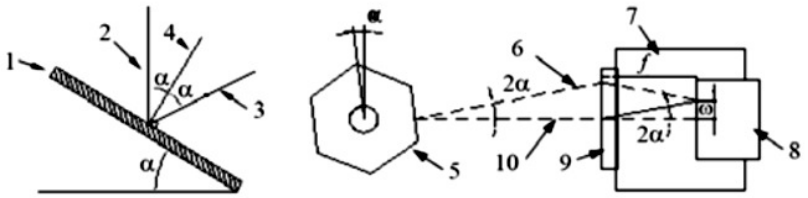
Kampas tarp siunčiamo ir atsispindėjusio šviesos srauto yra lygus 2α. Kampo matavimas tarp siunčiamo ir atsispindėjusio šviesos srauto leidžia nustatyti veidrodinio paviršiaus padėtį. Autokolimatoriaus šviesos srautas (taškas, linija ar kokia kita forma) siunčiamas į daugiakampės prizmės paviršiaus plokštumą 5, tuo pat metu jis grįžta į autokolimatoriaus okuliarą. Jei daugiakampės prizmės veidrodinio paviršiaus statmuo 4 nėra vienoje linijoje su autokolimatoriaus ašimi, t. y. su iš autokolimatoriaus išleidžiamu siunčiamu šviesos srautu 10, tai tada prizmės statmuo su autokolimatoriaus ašimi sudarys kampą α. Atsispindėjęs šviesos srautas 6 su autokolimatoriaus ašimi 10 sudarys kampą 2α. Atsispindėjęs šviesos srautas per objektyvą 9 patenka į okuliarą 8.

$$\varepsilon = f \cdot tg2\alpha\,, \tag{1.1}$$

čia f – fokusavimo ilgis (autokolimatoriaus).



1.1 pav. Poligonas
Fig. 1.1. Polygon



1.2 pav. Poligono/autokolimatoriaus veikimo principas: a) veidrodžio šviesos atspindys; b) autokolimatoriaus veikimo principas
Fig. 1.2. Polygon / Autocollimators principle of operation: a) a mirror reflection of light; b) the principle of operation Autocollimators

Paskaičiavus atstumą ε tarp siunčiamo grįžusio į okuliarą šviesos srauto galima nustatyti daugiakampės prizmės kampinę padėtį.

$$\varepsilon = 2f\alpha\,. \tag{1.2}$$

Turint kampus Q_1, Q_2, … Q_N kiekvieno poligono paviršiaus, pamatuoto nuo 0° kampo paviršiaus, skirtumus tarp gretimų paviršių galima apskaičiuoti:

$$D(N) = Q_N - Q_{N+1} \tag{1.3}$$

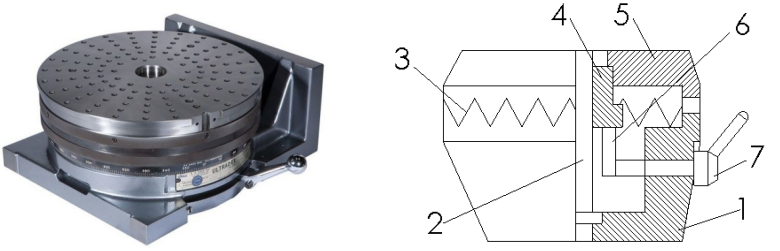
čia N = 1, 2,…12 ir dvylikos paviršių poligono $q13 = q1$. Tada kampinę paklaidą galima būtų išreikšti:

$$E(N) = D(N) - \frac{1}{n}\sum_{N=1}^{n} D(N) \tag{1.4}$$

n = 12 šio matavimo atveju.

1.2.2. Moore's 1440 Precision Index staliukas

Kaip plokščiojo kampo etalonas yra naudojamas kampų matavimo prietaisas, turintis galinių dantukų žiedinius susikabinančius diskus (1.3 pav. Moore's 1440 Precision Index). Moore's Precision Index prietaisu yra pasiekiamas labai didelis pozicionavimo tikslumas t. y. paklaida neviršija 0,2″ (Sanjid 2012). Jo pagrindinę dalį sudaro dviejų disko pavidalo detalių sukabinimas dantukais, esančiais galiniuose šių diskų paviršiuose.



1.3 pav. Kampų dalijimo ir matavimo prietaisas *Precision Index*: 1 – pagrindas, 2 – kreipiamoji, 3 – sukabinamų dantukų žiedas, 4 – įvorė, 5 – viršutinis diskas, 6 – kumštelis, 7 – rankenėlė su velenu

Fig. 1.3. Splitting angles and measuring device *Precision Index*: 1 – body, 2 – deflective unit, 3 – ring of the coupling tooth, 4 – bushing, 5 – upper disk, 6 – cam, 7 – handle shaft

Prietaisą sudaro pagrindas 1, kurio viršutiniame žiede yra įpjauti trikampio profilio dantukai 3, o jų apačioje grioveliai, kad dantukai turėtų užtikrintą sukabinimą. Pasukant rankenėlę 7, kumštelis 6, per įvorę 4, pakelia viršutinį diską 5. Taip dantukai pasikelia ir pasisuka, keisdami kampo padėti. Tokie staliukai paprastai turi apie 1440 dantukų, kurie yra įpjauti kas 15 kampo minučių. Dantukų paviršiai yra pritrinami, naudojant specialią technologiją. Bet kurioje apskritimo dalyje kampinė padėtis yra nustatoma susikabinant visiems dantukams vadinamuoju integraliniu principu. Taip pat yra gaminami diferencialiniai matavimo staliukai su dviem susikabinančių žiedų poromis, pavyzdžiui, turinčiomis apskritime 1440 ir 1080 dantukų, t. y. kas 15′ ir 20′. Tokiu įtaisu galima apskritimą padalyti kampais kas 5′, sudarančiais abiejų dantukų porų žingsnių skirtumą. Šio prietaiso principinis išradimas buvo patentuotas firmoje *Moore* (JAV), o jo pagrindu buvo sukurti kampų matavimo prietaisai ir Lietuvoje (Lazėnas 1982).

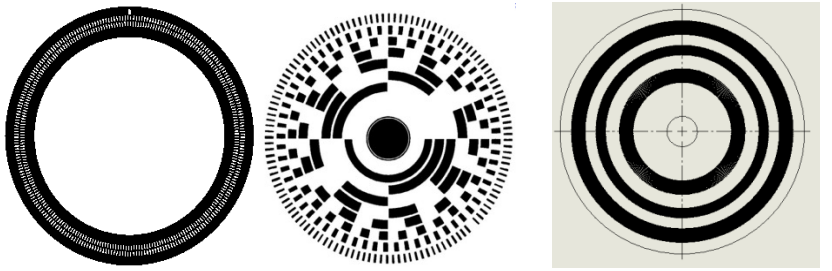
1.2.3. Apskritiminės skalės-limbai

Apskritiminės rastrinės skalės dar kitaip vadinamos limbais yra tam tikro skersmens diskai, kurie kartu su kampo keitikliu matuoja kampo (posūkio) dydžius. Šios skalės yra gaminamos skirtingų tipų pradedant jų dydžiais, skirtingomis medžiagomis, rastrų padengimų technologija bei jų medžiagų įvairove, pagal techninių parametrų charakteristikas, rastrinių takelių išdėstymu su skirtingų konfigūracijų brūkšniais, rastrų struktūrą ir t. t. Pagrindinės naudojamos apskritiminės skalės yra:

- periodinės skalės su kodinėm žymėm;
- periodinės skalės su periodiškai išdėstytais kodais;
- periodinės skalės su kintančiu atstumu tarp kodų;
- periodinės skalės su kodiniais takeliais;
- absoliučiosios skalės;
- kombinuoti limbai su Grėjaus kodu bei periodiniais takeliais;
- periodinės struktūros limbas su kodiniais takeliais;
- daugiabitiniai Grėjaus kodo limbai.

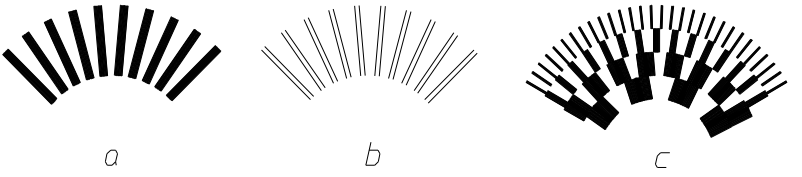
Inkrementinio keitiklio skalė, kodinė skalė-limbas, 3-jų takelių apskritiminė skalė pateikti 1.4 paveiksle.

Matavimų technikoje naudojamų apskritiminių skalių brūkšniai būna su bifiliariniais (dvigubais) brūkšniais, necentriniais, stačiakampiais ir t. t. (1.5 pav.).



1.4 pav. Inkrementinio keitiklio skalė, kodinė skalė-limbas, 3-jų takelių apskritiminė skalė

Fig. 1.4. Scale of incremental encoder, code scale-limb, 3 tracks circular scale



1.5 pav. Skalių brūkšnių pavyzdžiai: a – stačiakampiai brūkšniai, b – dvigubi brūkšniai, c – kodinės skalės padalos
Fig. 1.5. Scale lines examples: a – rectangular lines, b – double lines, c – coded scale lines

Ankstesnių apskritiminių skalių gamybos technologijoje brūkšniai paprastai yra įpjaunami peiliuku. Šiuo metu naudojami ir kiti padalų žymėjimo būdai, tarp jų – bekontakčiai, tokie kaip magnetinės žymės, lazeris arba monochromatinis šviesos šaltinio spindulys. Pastarieji būdai labai tinka žymint padalas ruošinio stabilaus sukimo metu, taip yra pasiekiamas didelis gamybos našumas. Svarbus elementas, nuo kurio labai priklauso dalijamos apskritiminės skalės tikslumas, yra įpjaunamos skalės pasukimo ašis. Skalių gamybos įrenginiuose yra naudojami ir aerostatiniai sukliai (špindeliai), kurių bazinės detalės turi rutulinius, kūginius, cilindrinius ir plokščius paviršius. Lietuvoje sukurtų (ADM) kampinio pozicionavimo paklaida neviršija vienos kampo sekundės, o ruošinio sukimo ašies trajektorijos paklaida apie 0,1 μm. Panaši ir peiliuko judesio tiesialinijiškumo vertė. Šiomis mašinomis gaminami 0,5“ tikslumo limbai, o laikantis techninėje norminėje dokumentacijoje nurodytų sąlygų, galima pasiekti ir apie 0,3 kampo sekundės tikslumą (Giniotis 2005).

Šiuolaikinės techninės priemonės leidžia sukurti labai didelio skaičiaus diskretinių verčių etalonines matavimo priemones, pvz., limbą, turintį 162 000 brūkšnių (diskretiškumas – 8″). Limbas, pagamintas ant 400 mm diametro stiklo ruošinio, turi sekundės padalos vertę, labai artimą vieno mikrometro linijinei vertei (šiuo atveju 1″~ 1μm). 8" diskretinę vertę interpoliuojant į 800 dalių, gaunama 0,01″ padalos vertė. Įrenginys privalo būti laikomas specialioje patalpoje, maksimaliai mažinant aplinkos poveikius (vibracijas, temperatūros, drėgmės ir slėgio pokyčius). Taip pat dideli reikalavimai yra keliami ir didelio tikslumo skalių matavimo įrenginių pavaroms. Kai kuriais atvejais tam naudojama didelio diapazono reguliuojama skalės sukimo pavara ir sukimosi judesio stabilizavimo priemonės. Itin dideli reikalavimai keliami limbų centravimo ir niveliavimo bei linijinių skalių justavimo įrenginiams, kurie privalo perduoti mikrometro dalių poslinkius ir, juos atlikus, patikimai fiksuoti matuojamąjį objektą (Giniotis 2005).

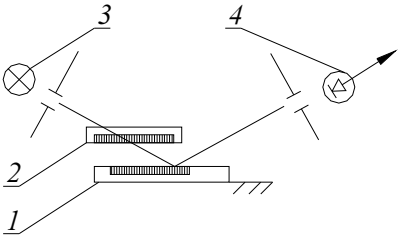
1.2.4. Fotoelektriniai kampų matavimo keitikliai

Matavimo kampų keitikliu vadinama matavimo priemonė, kuri determinuotu dėsniu keičia matuojamąjį dydį kitu tos pačios ar kitos rūšies fizikiniu dydžiu ir turi normuotas metrologines charakteristikas. Keičiamasis fizikinis dydis x yra nukreipiamas į matavimo keitiklio įėjimą ir yra vadinamas keitiklio įėjimo dydžiu. Keitiklio išėjime gaunamas pakeistasis fizikinis dydis y vadinamas keitiklio išėjimo dydžiu. Šiuos dydžius siejanti determinuota funkcija y=f(x) yra vadinama keitiklio matavimo lygtimi arba matavimo keitiklio keitimo charakteristika (keitimo funkcija). Tai svarbiausia matavimo keitiklio metrologinė charakteristika.

Absoliutiniai kampo keitikliai – rodo tikrąją judančios detalės padėtį nepriklausomai nuo judesio pradžios, pabaigos, reversavimo, įjungimo ar išjungimo. Tik įjungus jis rodo nulį – jis nerodo tikrosios staklių padėties.

Kaupiantieji – poslinkį matuoja nuo tos vietos, kur pradėjo veikti – iš bet kurio eigos taško. Pradėjęs veikti, keitiklis savo informaciją susieja su pradžios tašku.

Kampinių fotoelektrinių rastrinių keitiklių pagrindinė rastrinė liniuotė yra apskrita, vadinama limbu. Šis keitiklyje tvirtinamas prie guoliuose sukamo veleno ir matuojant sukamas nejudamų indikatorinės liniuotės ir šviestuvo bei šviesai jautrių elementų atžvilgiu. Elektriniai signalai apdorojami analogiškai kaip ir linijiniuose keitikliuose. Kampinių matavimo sistemų mažiausia paklaidos vertė siekia iki 1″ skyra 0,1″ Tiksliausi matavimo keitikliai gaminami su stiklinėmis liniuotėmis, kurių ilgėjimo koeficientas artimas plieno ilgėjimo koeficientui. Yra gaminami keitikliai, kurių rastrinės liniuotės daromos iš specialaus stiklo, kurio ilgėjimo koeficientas artimas nuliui. Standartinių stiklinių liniuočių didžiausias ilgis 3 – 4 m. Jei reikalinga ilgesnė matavimo eiga, matavimo liniuotės suduriamos. Tačiau dūrimas susijęs su techniniais sunkumais, nes liniuotės turi būti nustatomos taip, kad atstumas tarp gretimų suduriamų liniuočių brūkšnių būtų tiksliai lygus kartotiniam žingsnių skaičiui. Atstumo paklaida negali būti didesnė už ±2,5 % žingsnio dydžio. Todėl dažniausiai suduriamos ne daugiau kaip dvi liniuotės. Ten, kur dėl vietos stokos nepatogu naudoti fotoelektrinius keitiklius, dirbančius peršviečiant liniuotes, naudojami atspindžio keitikliai. Fotoelektrinių kampų matavimo keitiklių veikimo schema pateikta 1.6 paveiksle.



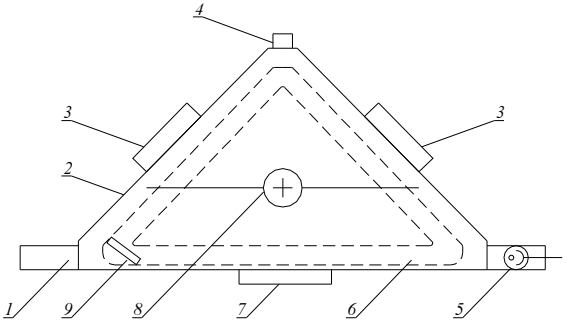
1.6 pav. Fotoelektrinių kampų matavimo keitiklių veikimo schema: 1 – matuojamoji liniuotė; 2 – keitiklio galvutė; 3 – šviesos šaltinis; 4 – fotoelementas
Fig. 1.6. Photoelectric angle measuring encoder operation scheme: 1 – measuring ruler; 2 – head of the encoder; 3 – light source; 4 – photoelectric cell

Juose signalai formuojami šviesai atsispindėjus nuo pagrindinės liniuotės. Jie taip pat naudojami dideliems, iki kelių dešimčių metrų, poslinkiams matuoti (Shimomura et al. 2009). Šiuo atveju rastrinė liniuotė gaminama iš reikiamo ilgio metalinės juostos. Jos paviršius, ant kurio formuojamas rastras, padengiamas specialia danga.

1.3. Lazerinis girometras

1963 m. pasirodė pirmasis giroskopas, pavadintas žiediniu lazeriniu giroskopu, dar vadinamu RLG (angl. – *Ring Laser Gyro*). Šis giroskopas nustebino pasaulį savo išskirtine konstrukcija – neturėjo jokių judančių dalių. Dėl šios priežasties padidėjo giroskopo tikslumas, sumažėjo matmenys, taip pat išnyko mechaninė trintis. Kai RLG yra sukamas, atsiranda skirtumas tarp lazerio šviesos spindulių, kurie keliauja į priešingas kryptis, bet yra sugeneruojami vienu metu. Keliaujant optinei bangai tarp šių priešpriešinių bangų atsiranda dažnių skirtumas. Išmatavus šiuos skirtumus galima apskaičiuoti ir sukimosi nuokrypas. (1.6 pav.) pavaizduotas žiedinis lazerinis interferometras matuojantis pasisukimo kampą apie ašį, statmeną prietaiso plokštumai. Tai inercinės navigacijos prietaisas, naudojamas aviacijoje, raketinėje bei kosminėje technikoje.

Yra modifikacijos su elektronų srautu ar šviesa. Šviesa skaidoma į du srautus, kurie juda vienas prieš kitą. Stiklo bloko viduje esantis kanalas užpildytas helio ar neono dujomis. Jonizuojamos dujos išspinduliuoja šviesą, kuri juda dviem srautais priešingomis kryptimis. Apėję aplink giroskopo korpusą srautai interferuoja. Interferencinių juostų slinkimą registruoja fotoelementas.



1.6 pav. Lazerinio girometro veikimo schema: 1 – lazeris, 2 – kvarcinio stiklo blokas, 3 – anodai,; 4 – atspindintis veidrodėlis, 5 – fotoelementas, 6 – kanalas stiklo bloko viduje, 7 – katodas, 8 – vibropjezopavara, 9 – šviesos srautą skaidanti plokštė

Fig. 1.6. Laser giroscop operation scheme: 1 – laser, 2 – quartz glass block, 3 – anodes, 4 – reflecting mirror, 5 – photoelectric cell, 6 – cavity inside the glass block, 7 – cathode, 8 – vibro-piezodrive, 9 – the breaking plate of light flow

Lazerinis girometras yra pranašesnis už paprastus besisukančius giroskopus (Ciminell *et al*. 2011). Jis neturi besisukančių dalių, pakabos sistemų, guolių. Girometrai yra patikimi, jų didelis dinaminis matavimo diapazonas. Lazeriniai girometrai naudojami kaip pavyzdinė matavimo priemonė stambių lėktuvų navigacijos sistemoje.

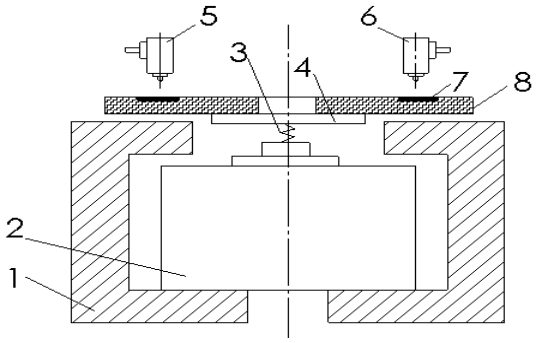
1.4. Kampų tikrinimo komparatorius

Norint išlaikyti tikslius įvairiausių mechanizmų, mašinų, staklių, jų elementų padėtį, poslinkį ar kampo reikšmę, visada ir dažniausiai tie elementai yra kalibruojami specialiais matavimo įrenginiais komparatoriais. Komparatorius-prietaisas atliekantis tikslius matavimus, palygindamas matuojamąjį objektą su etaloniniu tos rūšies matu. Šis prietaisas (1.7 pav.) yra skirtas matuoti nedidelio ilgio brūkšninius ar galinius ilgio matus.

Šis komparatorius susideda iš korpuso 1, etaloninio kampo keitiklio 2, movos 3, pasukamojo stalo 4, fotoelektrinių mikroskopų 5–6, matuojamos apskritiminės skalės 8, o 7 – apskritiminės skalės brukšnys. Korpuse 1 yra sumontuotas kampo keitiklis 2, mova 3 yra sujungta su pasukamu staliuku 4 būtent vienoje ašyje. Ant staliuko 4, uždedama koncentriškai apskritiminė skalė 8. Taip pat yra pastatomi 2 fotoelektriniai mikroskopai, tam kad būtų išvengta paklaidų dėl skalės pastatymo ekscentriciteto. Ši skalės paklaida pašalinama pagal šią išraišką:

$$0{,}5\ (M_1 + M_2)\ , \qquad (1.5)$$

čia M_1 ir M_2 – fotoelektrinių mikroskopų rodmenys.



1.7 pav. Kampų tikrinimo komparatoriaus schema: 1 – korpusas, 2 – kampo keitiklis, 3 – mova, 4 – sukamasis staliukas, 5–6 – fotoelektriniai mikroskopai, 7 – apskritiminės skalės žymė, 8 – apskritiminė skalė

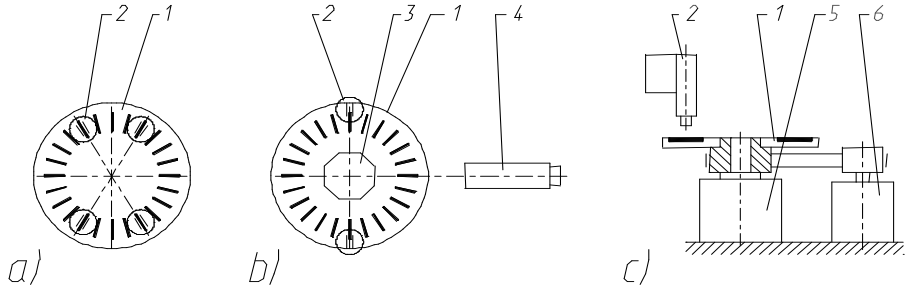
Fig. 1.7. Measurement angle scheme of comparator: 1 – housing, 2 – angle encoder, 3 –sleeve, 4 – rotary table, 5–6 – photo-microscopes, 7 – mark of circular scale, 8 – circular scale

1.5. Klasikiniai kampų matavimo būdai

Plokščiojo kampo matavimai yra skirstomi į keletą pagrindinių matavimo grupių (Giniotis 2005):

- erdvinio kampo metodas – poligonas (daugiakampė prizmė) arba kampo matai naudojami tikslumui palyginti;
- trigonometrinis metodas;
- apskritiminės skalės metodas – tai plokščiojo kampo palyginimas su etalonine skale, arba naudojant matavimus pilname apskritime su dviem, trimis arba keturiais mikroskopais.

Limbų ir apskritiminių rastrinių skalių matavimuose iki šiol naudojama klasikinių limbų matavimo būdai. (1.8 pav., a) pavaizduota kalibravimas pastoviu kampu pilname apskritime. Rastrinės skalės matavimai atliekami naudojant keturis mikroskopus. Šis matavimo būdas turi trūkumų matuojant mažo diametro apskritimines skales, kadangi sutalpinti visus keturis mikroskopus, jei jie neviršija 150 mm skersmens yra pakankamai sudėtinga.



1.8 pav. Apskritiminių skalių matavimo būdai: a – kalibravimas pastoviu kampu pilname apskritime, b – skalės kalibravimas poligonu – autokolimatoriumi, c – stabilus sukimas ir signalų iš skalės žymių lyginimas laike

Fig. 1.8. Measuring methods of circular scale: a – the calibration of constant angle in full circle, b – scale calibration with polygon – Autocollimators; c – stable and rotation signals from the comparison of the scale marks time

Kalibravimo pastoviu kampu matavimo būdą tobulino ir išplėtojo daugelis mokslininkų: H. Brunso (Bruns), matematiko G. Šraiberio (Schreiber), prancūzų fiziko ir metrologo A.Peraro (Perard), šveicarų mokslininko H. Vildo (Wild), Heivelinko (Heiwelynk), S. Jelisejevo ir kt.

Vildo taikant metodą, skalės apskritime nuosekliai yra kartojamas kampas (pagal šį būdą vadinamas kontroliniu), kurio tikroji reikšmė, lyginant su limbo padalomis, įvertinama apskaičiuojant vidutinį aritmetinį vidurkį ir iš jo atimant atskiras kampų reikšmes. Tokiu būdu yra gaunamos taip vadinamos „pataisų“ reikšmės. Jas suradus, yra apskaičiuojamos redukuotos limbo „diametrų“ reikšmės, nustatant jų nuokrypį nuo vienos ašies. Tą patį kampą atidedant nuo kitų limbo padalų (pavyzdžiui, 10°, 20°, 30° ir t. t.), gali būti apskaičiuojamos paklaidos kas 10°, atitinkamai pavaizduojant jas grafiškai. Būdo trūkumas yra tas, kad diametrų paklaidų dydžiai įvairiose limbo vietose yra nustatomi nevienodu tikslumu, taip pat netiksliai yra nustatoma grafiko ašies padėtis (T. J. M. Kennie, G. Petrui 2010).

Vildo (Wild) matavimo būdas. Diametrų paklaidų suradimo principas pagal Vildo metodą yra tas, jog pirmiausia paklaidų reikšmės yra nustatomos naudojant kampus β, jie dar vadinami kontroliniais. Reikšmes apskaičiuojame pagal formules:

Taikant (kontrolinį) kampą β = 60°:

$$x_{\varphi}^{I} = -\overline{x}_{m},\ x_{\varphi+60^{\circ}}^{I} = \overline{x}_{\varphi+60^{\circ}} - \overline{x}_{m},\ x_{\varphi+120^{\circ}}^{I} = \overline{x}_{\varphi+120^{\circ}} - \overline{x}_{m}, \qquad (1.6)$$

čia: $\bar{x}_m = \dfrac{\bar{x}_{\varphi+60^\circ} + \bar{x}_{\varphi+120^\circ}}{3}$,

$$\bar{x}_{\varphi+60^\circ} = l_\varphi,\ \bar{x}_{\varphi+120^\circ} = \bar{x}_{\varphi+60^\circ} + l_{\varphi+60^\circ}, \tag{1.7}$$

l_φ ir $l_{\varphi+60^\circ}$ – kampų nuokrypis A_φ, išmatuotas esant kampams φ ir $\varphi + 60^\circ$ vidutinės vertės atžvilgiu C_j ($j = \varphi = 0^\circ$; 3°; 6°; … 57°) kiekvienoje atskiroje serijoje.

Tokiu pat principu yra atliekami kiti matavimai ir skaičiavimai esant (kontroliniams) kampams $\beta_2 = 45^\circ$ ir $\beta_1 = 36^\circ$, o kiekvieno (kontrolinio) kampo diametrų paklaidos yra x_φ^{II} ir x_φ^{III}.

Pilnosios “diametrų” paklaidos yra:

$$x_\varphi = \frac{1}{3}\sum\left(x_\varphi^I + x_\varphi^{II} + x_\varphi^{III}\right). \tag{1.8}$$

Apskritiminės skalės “diametrų” pilnosios paklaidos vidutinis kvadratinis nuokrypis:

$$m_{x\varphi} = \sqrt{\frac{\sum \Delta x^2}{6n}}, \tag{1.9}$$

čia: $\Delta x_\varphi^I = x_\varphi - x_\varphi^I$, $\Delta x_\varphi^{II} = x_\varphi - x_\varphi^{II}$, $\Delta x_\varphi^{III} = x_\varphi - x_\varphi^{III}$.

Sistemingąsias ir atsitiktines paklaidas, bei neapibrėžtį surandame taikant Furjė eilutes:

$$\begin{aligned} x_\sigma = {} & a_2 \sin 2\varphi + a_4 \sin 4\varphi + a_6 \sin 6\varphi + a_8 \sin 8\varphi + ... + a_j \sin j\varphi + \\ & + b_2 \cos 2\varphi + b_4 \cos 4\varphi + b_6 \cos 6\varphi + b_8 \cos 8\varphi + ... + b_j \cos j\varphi \end{aligned}, \tag{1.10}$$

Koeficientai a_j ir b_j:

$$a_j = \frac{2}{n}\left[x_{\varphi i} \sin 2j\varphi\right]_{\varphi=0}^{n},\ b_j = \frac{2}{n}\left[x_{\varphi i} \cos 2j\varphi\right]_{\varphi=0}^{n},$$

čia x_φ – pilna „diametrų“ paklaida, i – „diametrų“ numeris ($i = 1;\ 2;\ 3$); j – Furjė koeficientai ($j = 2;\ 4;\ 6;\ 8\ \ldots\ k$); n – bendras „diametrų“ pilnųjų paklaidų numeris. Atsitiktinės paklaidos skaičiuojamos $x_\eta = x_\varphi - x_\sigma$, ir t. t.

Č. Vitoženco būdas buvo kur kas geresnis, nes matuojant tarp pirmos serijos krypties yra įterpiami kitos krypties matavimai, sudarantys kartotinę pirmos serijos kampo dalį (pvz., 36° kampe yra įterpiami matavimai 9° kampu). Limbo padalų tikslesniam matavimui yra skirtas Heivelinko būdas, tačiau matavimai pagal jį trunka labai ilgai, ilgai trunka ir rezultatų apdorojimas. Aišku, ta trukmė nurodoma tam atvejui, kai nebuvo naudojamasi beveik jokiomis matavimų ir skaičiavimų automatizavimo priemonėmis. Taikant pastarąjį būdą, yra nustatomos atsitiktinės ir sisteminės limbo padalų kampo paklaidos, o pastarosios išreiškiamos Furjė eilutėmis. Be to, yra nustatomas santykis tarp vidutinės kvadratinės padalų paklaidos ir bendros vidutinės kvadratinės padalų paklaidos viena pasirinkta matavimo kryptimi. Iš jos nuosekliai pagal Furjė eilutės narių skaičių yra eliminuojamos periodinės paklaidų sudėtinės dalys ir pereinama prie atsitiktinių, charakterizuojančių padalų tikslumą. S. Jelisejevo metodas yra skirtas matavimų tikslumo didinimui. Norint išmatuoti limbą kas 3°, yra matuojama 36°, 45° ir 60° kampai ties limbo kampų padėtimis 0°, 3°, 6°, ..., 177°. Apskaičiuojamos išmatuotos paklaidų vidutinės reikšmės ir gaunamos vidutinės pataisų reikšmės. Atliekamų savitarpio matavimų skaičiavimų dėka betarpiškai yra nustatomos limbo "diametrų" paklaidos. Teigiama, kad naudojant šį metodą, matavimų trukmė yra pusantro karto didesnė, negu matuojant Heivelinko būdu (V. Giniotis 2005).

Jelisejevo ir Heivelinko matavimo būdai. Šiuose matavimo būduose paklaidų reikšmės surandamos t. y. apskaičiuojamos lygčių sistemoje, įstatant matavimo eigoje gautus rezultatus:

$$\omega_\varphi^6 = \frac{-2l_\varphi^6 - l_{\varphi+60^\circ}^6}{3},\ \omega_\varphi^8 = \frac{-2l_\varphi^8 - l_{\varphi+45^\circ}^8 + l_{\varphi+135^\circ}^8}{4},$$

$$\omega_\varphi^{10} = \frac{-2l_\varphi^{10} - l_{\varphi+36^\circ}^{10} + l_{\varphi+108^\circ}^{10} + 2l_{\varphi+114^\circ}}{5},$$

$$\omega_\varphi^{6,10} = \frac{\omega_\varphi^6 + \omega_{\varphi+36^\circ}^6 + \omega_{\varphi+72^\circ}^6 + \omega_{\varphi+108^\circ}^6 + \omega_{\varphi+144^\circ}^6}{5},\ \omega_\varphi^{10,6} = \frac{\omega_\varphi^{10} + \omega_{\varphi+60^\circ}^{10} + \omega_{\varphi+120^\circ}^{10}}{3},$$

$$\omega_\varphi^{30} = 0{,}4\omega_\varphi^{10} + 0{,}4\omega_\varphi^{6,10} + 0{,}6\omega_\varphi^6 + 0{,}6\omega_\varphi^{10,6},$$

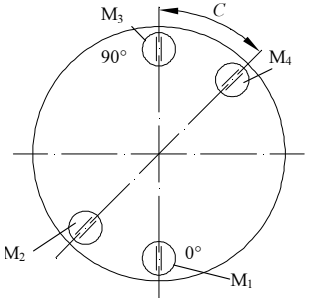
$$\omega_\varphi^{8,10} = \frac{\omega_\varphi^8 + \omega_{\varphi+12^\circ}^8 + \omega_{\varphi+24^\circ}^8 + \omega_{\varphi+24^\circ}^8 + \ldots + \omega_{\varphi+156^\circ}^8 + \omega_{\varphi+168^\circ}^8}{15},$$

$$\omega_\varphi^{30,8} = \frac{\omega_\varphi^{30} + \omega_{\varphi+45^\circ}^{30} + \omega_{\varphi+90^\circ}^{30} + \omega_{\varphi+135^\circ}^{30}}{4},$$

vadinasi „pilnosios diametrų“ paklaidos:

$$x_\varphi = \frac{1}{3}\omega_\varphi^8 + \frac{1}{3}\omega_\varphi^{30,8} + \frac{2}{3}\omega_\varphi^8 + \frac{2}{3}\omega_\varphi^{30,8}, \qquad (1.11)$$

čia: l_φ – matuojamų kampų verčių nuokrypiai A_φ nuo vidutinių verčių C_j kiekvienoje serijoje; ω_φ^6, ω_φ^6, ω_φ^6 – “diametrų” paklaidų tarpinės nustatytos ties kontroliniais kampais 60°, 45°, 36°; $\omega_\varphi^{6,10}$; $\omega_\varphi^{10,6}$, ω_φ^{30}, $\omega_\varphi^{8,30}$, $\omega_\varphi^{30,8}$ – vertės, nustatytos iš verčių ω_φ^6, ω_φ^6, ω_φ^6 derinių.



1.9. pav. Jelisejevo arba Heivelinko matavimo būdas: M_1, M_2, M_3, M_4, – mikroskopai, C – kampas tarp mikroskopų (60°, 45°, 36°)
Fig. 1.9. Microscopes position at Yeliseyev (Heuvelink) scale calibration: M1, M2, M3, M4, – microscopes, C – angle between microscopes (60°, 45°, 36°)

Rastrinėje skalėje būna nuo kelių šimtų iki kelių dešimčių tūkstančių brūkšnelių. Kadangi kampų etalonai, arba matavimo prietaisais sudaromi kampai gali būti tik tam tikro riboto dydžio, aiškėja, kad matuojant sulyginimo būdu, bus išmatuotas tik nedidelis skaičius rastro brūkšnelių. Aukščiau minėtuose matavimų būdo aprašymuose yra akcentuojamos ilgų periodų sisteminės paklaidos ir smulkaus periodo paklaidos. Prie smulkaus periodo paklaidų priskiriamos paklaidos, esančios 1°...3° kampo ribose. Geodeziniuose matavimuose nurodomi didelio dažnio (turinčių minučių eilės periodą) limbo paklaidų matavimų būdai, kurių susiejimas su išmatuotomis didelio periodo paklaidomis lieka probleminis. Tai priklauso nuo naudojamų skirtingų matavimo būdų, o taip pat ir skirtingų matavimo priemonių ir pradinio limbo pastatymo. Rastrinių skalių matavimo srityje didelio dažnio paklaidų matavimas ir šiuolaikinėmis matavimo priemonėmis ir būdais nėra išspręstas. Matavimo procesą vertinant pagal informacinės entropijos principą (kiek matavimas

sumažina informacijos apie objektą neapibrėžtumą), tampa akivaizdu, kad sulyginimo metodą taikant, yra gaunama mažas informacijos kiekis apie rastrinio limbo tikslumą. Dėl tų ir kitų specifinių limbų panaudojimo priežasčių nuolat buvo kuriami ir tobulinami limbų matavimo būdai, pagrįsti limbų tarpusavio lyginimu ir lyginimu su pavyzdiniu matu. Norint išvengti limbo pastatymo ekscentriciteto paklaidos, matavimo metu daugiausiai yra taikomas dvipusis limbo brūkšnių matavimas, tokiu būdu nustatant taip vadinamų limbo „diametrų“ paklaidas. Gauti matavimų rezultatai po to apskaičiuojami, panaudojant matematinės statistikos elementus ir pilno apskritimo, prasidedančio ir besibaigiančio ties tuo pačiu brūkšniu, savybę. Matuojant šiais būdais limbą, turintį 1080 brūkšnių, visas procesas trunka 180, 360 arba 540 val., siekiant ±0",3; ±0",15 ir ±0",1 matavimo tikslumo ir rezultatus apdorojant rankiniu būdu.

Kai kurie iš metodų remiasi prielaida, kad diametrų X_φ, tolygiai išsidėsčiusių apskritime, pilnų paklaidų suma yra lygi nuliui, t. y.:

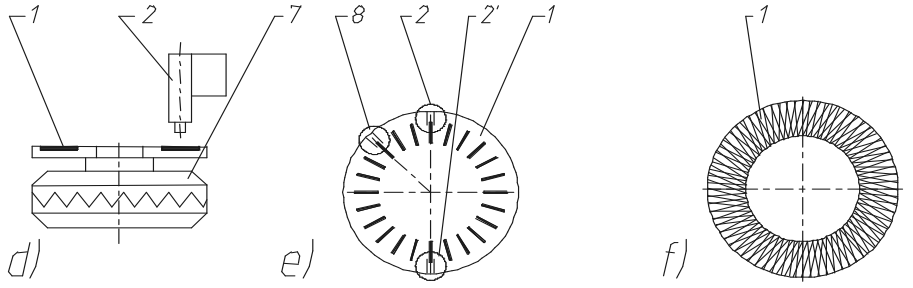
$$\sum_{0}^{180^\circ-\Delta\varphi} X_\varphi = 0, \quad \text{kur} \quad \varphi = 0,\ 2\varphi,...,\ 180^\circ - \Delta\varphi. \tag{1.12}$$

Pradinio (nulinio) diametro paklaida, vertinant bendru požiūriu, nėra lygi nuliui. Tas teiginys tinka tik kampų tarp brūkšnių ir diametrų bei jų paklaidų sumai pilname apskritime, t. y.:

$$\sum_{0}^{2\pi} (X_\varphi + \delta\varphi_i) = 0. \tag{1.13}$$

1.10 pav., b pavaizduotas skalės matavimas panaudojant daugiakampę prizmę ir autokolimatorių. Šio matavimo pagrindiniai trūkumai yra tikslus limbo centravimas-gulsčiavimas, pakankamai nepatogus yra prizmės justavimo procesas, o prizmė užstoja didelę matuojamosios skalės dalį. (1.10 pav., c) naudojama didelio tikslumo kampo keitiklis, tačiau ieškoma būdų sumažinti stabilizavimo problemą. Apskritiminė skalė rastrų signalai formuojami, kai jie praslenka pro mikroskopo optinę ašį. Tarpai tarp šių signalų yra užpildomi aukšto dažnio impulsais. Šiame matavime neišvengiame ir mažųjų skalių sukimo netolygumo atsitiktinių paklaidų, kurios yra sunkiai eliminuojamos.

1.10 pav., d pavaizduotas kalibravimas lyginant skalės brūkšnius su precizinio Moore Indexing table etalonu. Pats matavimo būdas lyg ir sumažina daugelį anksčiau minėtų trūkumų, bet yra sunkiai automatizuojamas, taip pat dėl viršutinės platformos staliuko judėjimo, galimi skalės centravimo-gulsčiavimo pažeidimai. (1.10 e, f) tai puses apskritimo, padalų simetrijos ir muarinės sąveikos būdu atliekami matavimai. Šie būdai turi privalumų matuojant mažo diametro skales (V. Giniotis 2005).



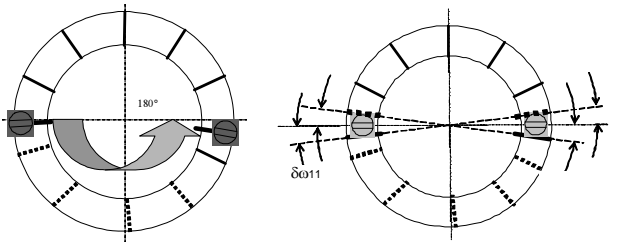
1.10 pav. Apskritiminių skalių matavimo būdai: d – kalibravimas lyginant skalės žymes su precizinio Moore Indexing table etalonu, e – trijų mikroskopų metodas, f – muarinio vaizdo metodas, 1 – matuojamoji skalė, 2 ir 8 – skalės padalų atskaitymo prietaisas (mikroskopas ar kt.), 3 – poligonas, 4 – autokolimatorius, 5 – sukimo ašis, 6 – pavara, 7 – Moore Index staliukas

Fig. 1.10. Circular scale measuring methods: d – the calibration of the scale marks compared with Moore Precision Indexing table standard, e – three-microscope method, f – tabby visual method, 1 – a measuring scale, 2 and 8 – deduction of divisions device (microscope, etc.), 3 – ground, 4 – autocollimator, 5 – rotary axis, 6 – drive, 7 – Moore Index table

Pusės apskritimo matavimo būdas. Pusės apskritimo matavimo metodas yra pagrįstas tuo, kad naudojant pakankamai ne daug priemonių pvz. (aerostatines ašis, apskritiminę skalę bei fotoelektrinius mikroskopus) galima atlikti 180° kampo matavimus, darant ne didesnę, kaip 0,1" paklaidą (Bručas 2008). 180° etaloninio kampo nustatymas pateiktas 1.11. paveiksle.

Apskritiminėje skalėje pasirenkami tame pačiame skalės skersmenyje, tik priešingose apskritimo centro pusėse du brūkšniai "0" (nulinis) ir "n"-tasis. Antrą kartą pasukus skalę matome, jeigu "0" (nulinis) ir "n"-tasis brūkšniai sutampa su mikroskopais 1 ir 2, žinome jog tarp mikroskopo optinių ašių yra tikslus 180° kampas. Tada pastatome žingsniu φ_t 3-čiajį mikroskopą, kuris sureguliuojamas taip, jog optinėje ašyje būtų šį žingsnį nurodantis brūkšnys, kurio paklaida yra Δ. Brūkšnio $(2n\text{-}1)$ kampo padėties paklaidai $\delta\varphi_{2n-1}$.

Tam tikru kampu pasukant skalę, išmatuojamos po pirmu mikroskopu brūkšnių padėties reikšmės a_i ir po antruoju – b_i. Iš gautų reikšmių galima apskaičiuoti skalės brūkšnių kampo paklaidas $\delta\varphi_i$, rastro „diametrų“ ir kampo tarp „diametrų“ paklaidas. 3-iojo mikroskopo optinė ašis sulyginama su brūkšnio padėtimi, pakeitus skalės kryptį kampu φ_t.



1.11. pav. 180° etaloninio kampo nustatymas: a – skalės pasukimai 180° po dviem mikroskopais

Fig. 1.11. 180°standard angle finding: a – the scale turning 180° under two microscopes

Sudaromos lygtys pagal skalės pasukimo žingsnį:

$$\begin{cases} a_1 = \delta\varphi_1 + \Delta, \\ b_{n+1} = \delta\varphi_{n+1} + \Delta. \end{cases}, \quad \begin{cases} a_2 = \delta\varphi_2 - a_1 + 2\Delta, \\ b_{n+2} = \delta\varphi_{n+2} - a_1 + 2\Delta. \end{cases} \tag{1.14}$$

Galutinė limbo brūkšnių paklaidų išraiška yra:

$$\delta\varphi_i = a_i + a_{i-1} + ... + a_1 - i\Delta\,,\ \delta\varphi_{n+i} = b_{n+i} + a_{i-1} + ... + a_1 - i\Delta\,. \tag{1.15}$$

Matavimus atlikus iki pusės apskritimo t.y. tol, kol "n" brūkšnys sutampa su pirmuoju mikroskopu, taip surandame nežinomojo Δ reikšmę, kuri reikalinga sprendžiant (1.8) lygtis

Tada:

$$a_n = \delta\varphi_n - \delta\varphi_{n-1} + \Delta, \tag{1.16}$$

iš čia:

$$\delta\varphi_n = a_n + a_{n-1} + ... + a_1 - n\Delta.$$

Įstatę paklaidos reikšmę, rasime:

$$\Delta = \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} a_i - b_n); \tag{1.17}$$

Pusės apskritimo metodu surastos reikšmės užrašytos po lygybės ženklu; i = 0, 1, 2,..., 2n. Paklaidų skaičius yra 2n, o rastras "0" ir "2n" yra tas pats.

Skalės rastrų kampinė paklaida randama:

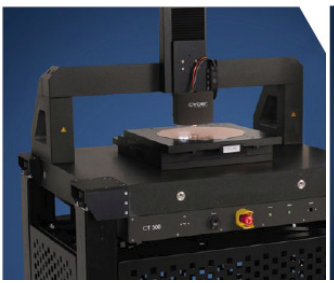
$$\delta\varphi_i = \sum_{i=1}^{n} a_i - \frac{i}{n}(\sum_{i=1}^{n} a_i - b_n); \tag{1.18}$$

ir

$$\delta\varphi_{n+i} = b_{n+i} + \sum_{i=1}^{2n-1} a_i - \frac{i}{n}(\sum_{i=1}^{n} a_i - b_n)\,. \tag{1.19}$$

1.6. Optinės skalių matavimo sistemos

CyberTECHNOLOGIES yra viena iš pirmaujančių kompanijų, pasižyminčių kaip aukštos skiriamosios gebos, bekontaktės 3D matavimų sistemų lyderė visame pasaulyje. Šios pažangios sistemos yra plačiai panaudotos pramoninėje bei mokslinėje veikloje. Didelės skiriamosios gebos optiniai, lazeriniai davikliai su baltais arba infraraudonaisiais šviesos šaltiniais kartu su specialiai suprojektuota labai tikslia 2-jų koordinačių skenavimo platforma bei pažangios programinės įrangos branduoliu leidžia pasiekti itin patikimų rezultatų. Šiuo metu bekontaktė 3D matavimo sistema plačiausiai naudojama mikroelektronikoje ir kitose tiksliose pramonės šakose, kur reikalingi banguotumo, šiurkštumo matavimai, žingsnio nustatymas, saulės elementų ir begalės kitų komponentų patikra ir kokybė.



1.12 pav. CT 300
Fig. 1.12. CT 300



1.13 pav. CT 600S
Fig. 1.13. CT 600S



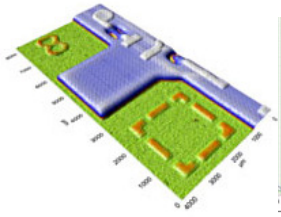
1.14 pav. CT R200
Fig. 1.14. CT R200

Pagrindinis komponentas šios matavimo sistemos yra lazeris arba baltos šviesos sensorius. Šie įrenginiai pasižymi itin aukštu tikslumu prie didelių matavimo greičių. Dauguma paviršių gali būti nuskenuota su 4 kHz dažniu. Naudojant 1 µm skiriamąja gebą, skenavimo greitis yra 4 mm/s, naudojant 20 µm, skenavimo greitis pasiekia iki 80 mm/s. Pasirenkant sensorių su 14 kHz dažniu, galima pasiekti iki 400 mm/s greitį. Chromatinio sensoriaus galva fiksuoja z ašimi nuo 3 nm iki 0,8 µm matavimo ribose nuo 300 µm iki 25 mm.

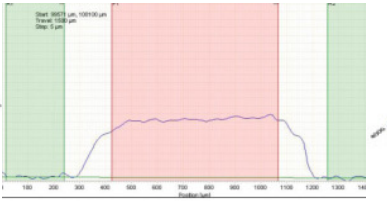
Matomas lazerio spindulys lengvai gali atlikti 2D profiliavimą ar 3D rastrų skenavimą sudėtinguose paviršiuose. Visi elektroniniai komponentai yra integruoti į granito masės korpusą (1.12–1.14 pav.).

CyberScan CT 600S (1.14 pav.) yra bekontaktis profilometras su 600 mm (x, y) eiga. Judanti dalis sumontuota ant granito platformos. Sistema naudoja magnetinį linijinį variklį. Chromatinis baltos šviesos sensorius sumontuotas z-ašimi su skiriamąja geba nuo 3nm iki 25 mm matavimo ribose. Horizontali pastūma turi 0,02 µm tikslumą. CT 600S yra idealiai tinkamas matuoti plokštumą ant didelių gabaritų detalių, taip pat žingsnio aukštį, šiurkštumą, gali nustatyti kitus rodiklius: 2D-profiliavimas, 3D topografinių žemėlapių matavimas. (1.16 pav.) pavaizduotas CT R200 3-jų ašių skenavimo sistema apvalioms detalėms. Matavimo greitis siekia iki 14 kHz, o sukimosi pavara išvysto 0,0001°tikslumą. Detalei sukantis, sensorius matuoja 10 nm tikslumu, o 100 mm skersmens detalę 5 µm tikslumu gali išmatuoti per 7 s. Visos šios matavimo sistemos taip pat gali nustatyti kitus parametrus, kaip skirtingus sluoksnio storius, plokštumas, paviršiaus šiurkštumus, atlikti komplanarumo matavimus, gali užfiksuoti min. ar max. aukštį, apskaičiuoti vidurkį, bei surasti defektus matuojamųjų objektų paviršiuose.

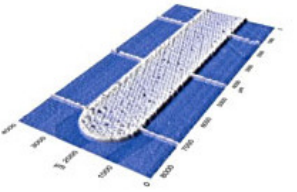
Storio matavimas. Visada yra svarbu ypatingai elektronikoje kontroliuoti sluoksnio storį ant mikroschemos ar kitų elementų pagrindo, nes elektriniai parametrai yra tiesiogiai susieti su storiu. (1.16 pav.) pavaizduota viena iš elektroninių komponentų dalių, kurioje atliktas vieno segmento matavimas. (1.15 pav.) vaizdas pateiktas grafiškai, kuriame galime surasti (µm tikslumu) šio segmento aukštį, plotį, storį ar kitą reikalingą parametrą. Programa automatiškai gali apskaičiuoti matavimų vidurkį. Bekontaktė 3D matavimų sistema yra idealiausias įrankis būtent sluoksnių matavimams. Galimi įvairūs matavimai ant skirtingų sluoksnių, kaip rezistoriai, taip pat ant aukso, sidabro ar stiklo žymių. Tikslūs 3D matavimai leidžia nustatyti bei optimizuoti paviršiaus padengimą skirtinguose procesuose. Lengvai aptinka pakitimus keliaujant nuo vieno elemento prie kito. (1.17 pav.) pavaizduotas saulės elemento metalizuoto sluoksnio paviršius.



1.15 pav. Mišri schema
Fig. 1.15. A hybrid scheme



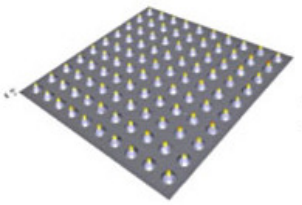
1.16 pav. Segmento matavimai
Fig. 1.16. Segment picture



1.17 pav. Saulės elementas
Fig. 1.17. Solar cell

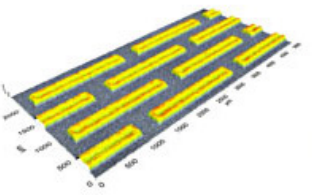
Klijų, dervos, epoksido skenavimas. 3D skenavimas yra greitas ir tikslus būdas perkelti objekto duomenis į kompiuterį ir sukurti realaus objekto 3D vaizdą. Objekto matmenis galima sulyginti su modeliu kompiuteryje.

Nuskenuotų produktų failai yra suderinami su daugeliu CAD/CAM programine įranga, kas leidžia nuskenuoti failus ir naudoti naujų produktų kūrimui arba turimų korekcijai. Matavimai galimi ant skaidrių ir pusiau skaidrių medžiagų tokių kaip lydmetalio, epoksidų, fliuso ir t. t. (1.18–1.20 pav.). Galimas aukščio, kampo ar ilgio rezultatų suradimas taip pat tūrio bei ploto paskaičiavimai. Pranešimai apie aukščiausių taškų kiekviename masyvo sluoksnyje (1.21–1.23 pav.).



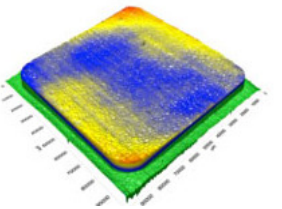
1.18 pav. Klijų padengimas

Fig. 1.18. The adhesive coating



1.19 pav. Epoksidinė derva

Fig. 1.19. Epoxy resin



1.20 pav. Klijų padengimo koncentracija

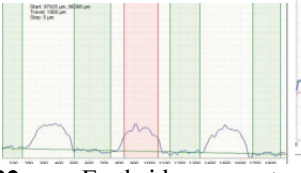
Fig. 1.20. The adhesive coating concentration

Paviršiaus nelygumo matavimai. Didelis privalumas yra tai, kad cyberTECHNOLOGIES sistemos paviršiaus matavimas yra bekontaktis. Matuojant detalių šiurkštumą, ši sistema gali surasti kitus pažeidimus, defektus (1.24 pav.). Pažeidimui esant lazerio spindulys nuskenuoja ir išmatuoja įvairiausių įbrėžimų dydžius, jų būvimo vietą. Pateikiama šiukštumo analizė, paviršiaus charakteristikos pagal ISO standartus. Lengvai išmatuoja lazerio įbrėžimo gylį, plotį, pateikia vidurkį, maksimalų bei minimalų gylius.



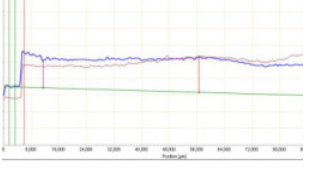
1.21 pav. Klijų segmento matavimas

Fig. 1.21. The adhesive segment measurement



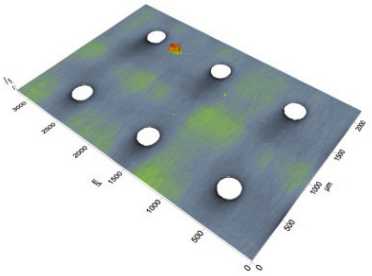
1.22 pav. Epoksido segmentų matavimas

Fig. 1.22. Epoxy segment measurement

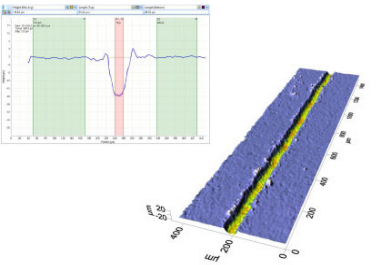


1.23 pav. Klijų sluoksnio analizė

Fig. 1.23. Eavluation of adhesive layer

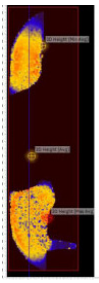


1.24 pav. Pažeidimo defektavimas
Fig. 1.24. Lesion of defects

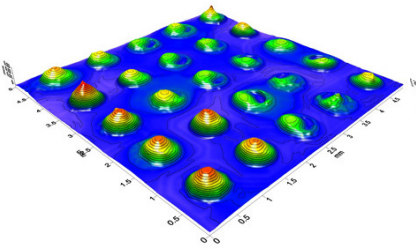


1.25 pav. Lazerio pjūvio analizė
Fig. 1.25. Laser-cut analysis

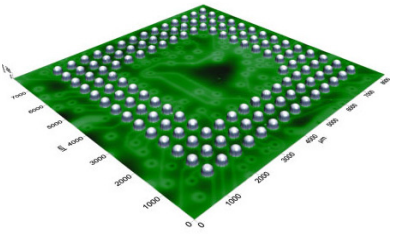
Permatomų ir kitų medžiagų matavimai, komplanarumo matavimai. Permatomoms medžiagoms, ar tokioms kaip fliusas (1.26–1.28 pav.), epoksidas ir kt. yra sunku apibrėžti bei nustatyti medžiagos kiekį, išmatuoti ar įvertinti ją skaičiais. Nes tam tikros medžiagos yra nematomos per mikroskopą ar AOI sistemas.



1.26 pav. Medžiagos defektavimas
Fig. 1.26. Defects of materials



1.27 pav. Fliuso perteklius
Fig. 1.27. Overstock flux



1.28 pav. Kokybės kontrolė
Fig. 1.28. Quality control

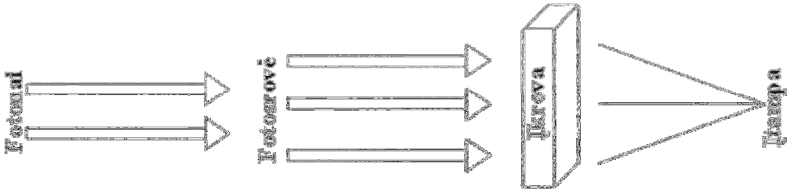
Su mėlynos šviesos lazeriu cyberTECHNOLOGIES sistema gali matuoti ant tekstūros ar laku padengto paviršiaus. Nustato sluoksnio storį, aukštį, gali apskaičiuoti aukščių vidurkius. Matavimus atlieka taip pat ir ant metalizuoto paviršiaus, gali optimizuoti padengimo procesą.

1.7. Brūkšnio padėties įvertinimo procesas

Fotonai (šviesos kvantai) – tai neutralios, rimties masės neturinčios dalelės, sklindančios vakuume šviesos greičiu . Jie išspinduliuojamas elektronams

peršokant iš tolimesnės į artimesnę elektronų orbitą. Fotonui patekus į jutiklio ląstelę, jo perduota energija „išmeta“ elektronus iš artimos orbitos, ir esant uždarai elektrinei grandinei, joje ima tekėti srovė.

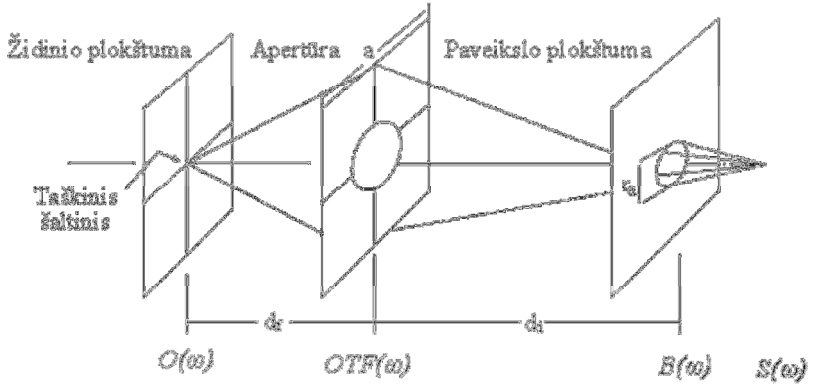
Vaizdo elemento šviesos signalo kelias pavaizduotas 1.29 paveiksle. Yra trys fizikinių virsmų fazės, kol fotonas tampa įtampa.



1.29 pav. Šviesos signalo fizikinių virsmų fazes
Fig. 1.29. The physical phase transitions of light signal

Šviesos signalo fizikiniams virsmams galioja šios taisyklės: fotonų srauto virsmas į fotosrovę yra tiesinis – paremtas kvantiniu efektu; fotosrovė yra paverčiama į krūvį per tam tikrą laiko intervalą; daugelyje vaizdo jutiklių krūvio keitimas į įtampą vykdomas naudojant tiesinius stiprintuvus.

Vaizdo registravimui naudojamos skaitmeninės vaizdo kameros. Skaitmeninėse kamerose vaizdai yra sukuriami fokusuojant šviesą į plokščią matricą, sudarytą iš šimtų tūkstančių šviesai jautrių elementų. Į tokį surištojo krūvio prietaisą CCD (*Charge Coupled Device*) patenkantys fotonai sukuria šviesos intensyvumui kiekviename taške proporcingą elektros krūvio kiekį. Šviesos srauto intensyvumas patekęs į jutiklio ląstelę keičiamas išmatuojamu įtampos dydžiu (1.29 pav.). CCD ir CMOS technologijos vaizdo jutiklių architektūra ir darbo principai aprašomi (Acton 2005, Bovik 2005).



1.30 pav. Optinės sistemos sudarytos iš vieno lęšio modelis
Fig. 1.30. Optical system consisting of a single lens model

Optinės sistemos baigtiniai matmenys vadinami apertūra. 1.30 paveiksle parodytas taškinis šviesos šaltinis $O(\omega)$, cilindrinis lęšis su apertūra a ir vaizdo jutiklis, esantis vaizdo susidarymo, toliau vadinsime paveikslo plokštumoje. Jutiklio dažninė perdavimo funkcija žymima $B(\omega)$. Šioje plokštumoje susidarantis vaizdas $I(\omega)$ aprašomas formule:

$$I(\omega)=\frac{1}{2\pi}\{O(\omega)\cdot OTF(\omega)\cdot B(\omega)\}\otimes S(\omega). \tag{1.20}$$

Norint gauti kokybiškus vaizdus, šviesa pradžioje yra praleidžiama per sudėtingą lęšių rinkinį, leidžiantį ištaisyti erdvinius ir spalvinius pirmojo lęšio - objektyvo, sukeliamus iškraipymus. Lęšis pakeičia bangų sklidimo kryptis taip, kad jos konverguoja į tašką paveikslo plokštumoje. Taškinio šaltinio praeinančio pro optinę sistemą ir konverguojančio į paveikslo plokštumą transformaciją aprašoma vaizdo taško išplitimo funkcija (VTIF). Objekto taškinis šaltinis, esantis židinio plokštumoje, atspindi šviesą sferinėmis bangomis, kurias apriboja lęšio apertūra. Vaizdas perduodamas mažiausiai iškreiptas, kai VTIF matmuo yra mažiausias, taip yra, jei d_f ir d_i (VTIF ir OPF funkcijų parametrai) tenkina lygties sąlygas:

$$\frac{1}{d_f}+\frac{1}{d_i}=\frac{1}{f}. \tag{1.21}$$

Lęšiu, kurio apskritiminė apertūra yra a diametro, sklindant nekoherentinei šviesai su centriniu dažniu λ, VTIF yra simetriška ir aprašoma formule:

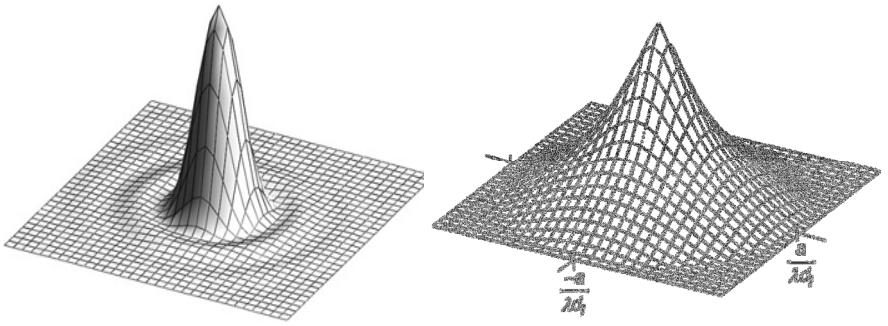
$$\mathrm{VTIF}=\left[2\frac{\mathrm{J}_1\left(\pi\left[\frac{r}{r_o}\right]\right)}{\pi\left[\frac{r}{r_o}\right]}\right]^2, \tag{1.22}$$

čia J_1 yra pirmos eilės Beselio funkcija, r_o konstanta ir spindulio atstumas r tarp taškinio šaltinio ir paveikslo plokštumos. Jie skaičiuojami iš formulių:

$$r_o=\frac{\lambda d_i}{a},\quad r=\sqrt{x_i^{\,2}+j_i^{\,2}}. \tag{1.23}$$

Kadangi dažniausiai optinė sistema yra simetrinė tiesinė sistema, jai apibūdinti naudojama vienetinio impulso charakteristika, tai yra, VTIF Furjė transformacija, kuri vadinama optine perdavimo funkcija (OPF).

Vieno lęšio optinės sistemos VTIF, dar kitaip vadinamas Airy žiedų arba „Sombrero“ funkcija, trimatė diagrama ir jos atitikmuo dažninėje skalėje parodytos 1.31 paveiksle (Bovik 2005).



a) b)

1.31 pav. Cilindrinio lęšio trimatis vaizdas: a – cilindrinio lęšio formuojamų Airy žiedų intensyvumo trimatis vaizdas, b – cilindrinio lęšio optinės perdavimo funkcijos trimatis vaizdas

Fig. 1.31. Three-dimensional of cylindrical lens: a – three-dimensional intensity image of Airy ring of cylindrical lens, b – three-dimensional image of the optical transfer function of cylindrical lens

1.32 paveiksle funkcija artėja į nulį ties ribiniu dažniu f_c, kuris lygus

$$f_c = \frac{a}{\lambda d_i}. \tag{1.24}$$

Dažnis f_c parodo kokio mažiausio dydžio objektus sistema dar gali skirti. Kuo didesnė lęšio apertūra ir kuo trumpesnis apšviečiančios šviesos bangos ilgis, tuo mažesnių dydžių elementus galime matyti pro lęšį. Kuo mažesnis objektas, tuo labiau jo vaizdas paveikslo plokštumoje išliejamas.

Tegul $C(x, y, t, \lambda)$ yra paveikslo atvaizdo energijos pasiskirstymas erdvėje su koordinatėmis (x, y), laiku t ir bangos ilgiui λ. Kadangi šviesos intensyvumas yra teigiamas dydis, proporcingas elektrinio lauko šaknies moduliui, tai paveikslo šviesos funkcija įgyja reikšmes tik realių ir teigiamų reikšmių aibėje. Tai pat reali fizinė sistema turi didžiausio paveikslo intensyvumo ribojimą:

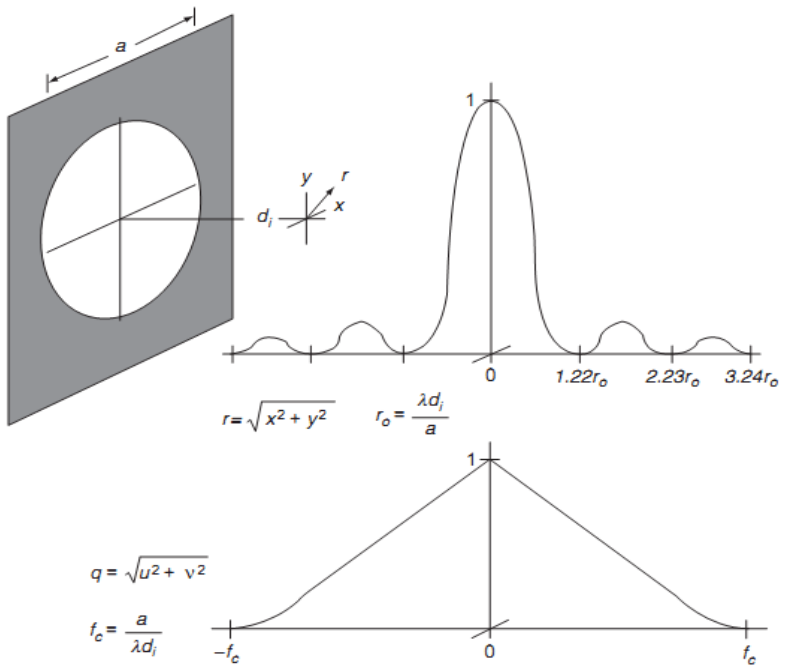
$$0 < C(x, y, t, \lambda) \le A, \tag{1.25}$$

čia A yra didžiausias paveikslo intensyvumas.

Paveikslo dydį riboja baigtinis kameros jutiklio pikselių skaičius. Matematiškai jutiklio pikselių išdėstymas atitinka stačiakampį, kurio plotis ir ilgis matuojant nuo centro išreiškiami formulėmis:

$$-L_x \le x \le L_x, \tag{1.26}$$

$$-L_y \le y \le L_y. \tag{1.27}$$



1.32 pav. Paveikslo plokštumoje formuojamas taškinio šaltinio vaizdo normuotas intensyvumas

Fig. 1.32. Normalised image intensity formed by a point source in the image plane

Paveikslo registravimo laiko intervalas *t*:

$$-T \le t \le T \,. \tag{1.28}$$

Paveikslo šviesos srauto funkcija $C(x, y, t, \lambda)$ priklauso nuo keturių nepriklausomų kintamųjų. Intensyvumo atsakas šviesos srauto funkcijai jutiklyje dažnai aprašomas kaip momentinė paveikslo šviesos srauto lauko intensyvumo vertė:

$$V(x,y,t) = \int_0^\infty C(x,y,t,\lambda) V(\lambda) d\lambda \,, \tag{1.29}$$

čia $V(\lambda)$ yra atstojamoji šviesos srauto, arba jutiklio jautrumo funkcija.

Jutiklio jautros spektrą priimta skaidyti į trijų spalvų atskirus spektrus, dažniausiai RGB trispalvę, todėl galime išreikšti:

$$R(x,y,t) = \int_0^\infty C(x,y,t,\lambda) R_s(\lambda) d\lambda \,,$$

$$G(x,y,t)=\int_0^{\infty} C(x,y,t,\lambda)G_s(\lambda)d\lambda\,, \tag{1.30}$$

$$B(x,y,t)=\int_0^{\infty} C(x,y,t,\lambda)B_s(\lambda)d\lambda\,,$$

čia $R_s(\lambda)$, $G_s(\lambda)$, $B_s(\lambda)$ yra spektro reikšmės, atitinkančios siaurus dažninius spektrus ties raudonos, žalios bei mėlynos spalvos bangos ilgiais.

Naudojant monochromatines kameras, tai yra, kurių jutiklio pikseliai nėra padengti spalviniais filtrais ir priima vienodai gaunamą šviesos kiekį, paveikslo šviesos srauto intensyvumo funkcija $F(x, y, t)$ lygi:

$$F(x,y,t)=\int_0^{\infty} C(x,y,t,\lambda)S(\lambda)d\lambda\,, \tag{1.31}$$

čia $S(\lambda)$ yra jutiklio dažninė funkcija.

Monochromatinėse sistemose paveikslo funkcija $F(x, y, t)$ reiškia paveikslo intensyvumą.

Jei fiksuotume vaizdą tam tikrą apibrėžtą laiko intervalą T, tai vaizdas taške (x, y) aprašomas (Kaiser and Schneide 2006):

$$\langle F(x,y,t)\rangle_T = \lim_{T\to\infty}\left[\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} F(x,y,t)L(t)dt\right], \tag{1.32}$$

čia $L(t)$ laiko svorio funkcija. Panašiai ir vidutinis paveikslo taško intensyvumas per laiko intervalą yra išreiškiamas formule:

$$\langle F(x,y,t)\rangle_S = \lim_{\substack{L_x\to\infty\\ L_y\to\infty}}\left[\frac{1}{4L_xL_y}\int_{-L_x}^{L_x}\int_{-L_y}^{L_y} F(x,y,t)dxdy\right]. \tag{1.33}$$

Dvimatės sistemos nepertraukiamas vaizdas sudarytas iš dvimačių įėjimo funkcijų rinkinio $F_1(x, y)$, $F_2(x, y)$, ... , $F_M(x, y)$ išreiškiamas išėjimo dvimačių funkcijų aibe $G_1(x, y)$, $G_2(x, y)$, ... , $G_M(x, y)$, kur taškų koordinatės yra nepriklausomos ir kinta intervale $-\infty< x, y <\infty$.

$$\begin{bmatrix} G_1(x,y)=O_1\{F_1(x,y),F_2(x,y),\ldots,F_N(x,y)\}\\ \vdots\\ G_m(x,y)=O_m\{F_1(x,y),F_2(x,y),\ldots,F_N(x,y)\}\\ \vdots\\ G_M(x,y)=O_M\{F_1(x,y),F_2(x,y),\ldots,F_N(x,y)\} \end{bmatrix}. \tag{1.34}$$

Tokį reikšmes galima grupuoti operatoriais $O_m\{\ \}$, kai m = 1,2, … , M. Vaizdą galime išreikšti 2.15 formule (Acton *et al.* 2005).

Kai pirminio vaizdo įėjimo funkciją atitinka viena išėjimo funkcija:

$$G(x,y) = O\{F(x,y)\}. \tag{1.35}$$

Tolydžių funkcijų diskretizavimui naudojamas ypatybės operatorius. Šiuo atveju juo yra dvimatė Dirac delta $\delta(x,y)$ funkcija, kuri turi šias savybes:

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\delta(x,y)dxdy = 1, \tag{1.36}$$

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}F(\xi,\eta)\delta(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta = F(x,y), \tag{1.37}$$

čia ε yra teigiamas, į nulį artėjantis dydis. 1.33 formulė yra vadinama Dirac'o funkcijos *sijojimo savybe*.

Dvimatė Dirac'o delta funkcija gali būti išskaidyta į ortogonalių vienmačių Dirac'o delta funkcijų sandaugą.

Dvimatė sistema yra adityvi tiesinė sistema, jeigu jai galioja superpozicijos principas. Todėl galime užrašyti (Goodman 1996):

$$O\{aF_1(x,y)+bF_2(x,y)\} = aO\{F_1(x,y)\}+bO\{F_1(x,y)\}, \tag{1.38}$$

čia a ir b konstantos visoje skaičių aibėje.

Iš aukščiau parašytų formulių galima išvesti:

$$G(x,y) = O\left\{\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}F(\xi,\eta)\delta(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta\right\}. \tag{1.39}$$

Jei operatorius $O\{\ \}$ yra tiesinis ir priklauso tik nuo erdvinių kintamųjų (x, y)

$$G(x,y) = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}F(\xi,\eta)O\{\delta(x-\xi,y-\eta)\}d\xi d\eta\,. \tag{1.40}$$

Tada antrasis integralo narys gali būti išreikštas:

$$H(x,y,\xi,\eta) \equiv O\{\delta(x-\xi,y-\eta)\}. \tag{1.41}$$

H vadinamas dvimatės sistemos impulsiniu atsaku. Optinėse sistemose sistemos impulsinis atsakas yra vadinamas sistemos taško išplitimo funkcija. Jai galioja adityvus superpozicijos integralas:

$$G(x,y) = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}F(\xi,\eta)H(x,y,\xi,\eta)d\xi d\eta\,. \tag{1.42}$$

Simetriškumo savybę galime užrašyti taip:

$$H(x,y,\xi,\eta)=H(x-\xi,y-\eta). \tag{1.43}$$

Tada superpozicijos integralas supaprastinamas

$$G(x,y)=\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}F(\xi,\eta)H(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta\,. \tag{1.44}$$

Panaudojus sąsūkos operacija gaunama išraiška

$$G(x,y)=H(x,y)\otimes F(x,y). \tag{1.45}$$

Kadangi sąsūkos integralas yra simetriškas, tai galioja

$$G(x,y)=\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}F(x-\xi,y-\eta)H(\xi,\eta)d\xi d\eta\,. \tag{1.46}$$

Naudojant vaizdo fiksavimą kadrais kas tam tikrą laiko intervalą yra priimtina kaip tolydžios vaizdo funkcijos diskretizavimas laiko ašyje naudojant Dirac delta funkciją δ(x, y). Tolydžios funkcijos $F(x, y)$ sandaugos su centruota fiksuotame taške (x_o, y_o) delta funkcija integravimas leidžia išrinkti jos reikšme tame taške, jei $F(x, y)$ yra tolydi taške (x_o, y_o)

$$F(x_o,y_o)=\iint F(x,y)\delta(x-x_o,y-y_o)dxdy\,. \tag{1.47}$$

Iš to galime daryti išvadą, kad:

$$F(x,y)\delta(x-x_o,y-y_o)\equiv F(x_o,y_o)\delta(x-x_o,y-y_o). \tag{1.48}$$

Fiksuotame taške *(x_o, y_o)* delta funkcijos sandauga yra ekvivalenti delta funkcijos sandaugai *$F(x_o, y_o)$*, todėl gauname

$$F(x,y)\otimes\delta(x-x_o,y-y_o)=F(x-x_o,y-y_o). \tag{1.49}$$

Tolydžios funkcijos sąsūka su delta funkcija taške *(x_o, y_o)* perstumia šios funkcijos centrą į tašką *(x_o, y_o)*.

Žinant nagrinėjamos sistemos VTIF pagal aukščiau aprašytą metodą galima rekonstruoti gautą atvaizdą į pirminį vaizdą, kurio informacija yra neiškreipta optinės sistemos perdavimo funkcijos.

1.8. Brūkšnio detektavimo algoritmo analizė

Svarbus mikroskopo parametras yra jo skiriamoji geba, kurią lemia šviesos difrakcija ir priklauso nuo objektyvo skaitinės apertūros ir šviesos bangos ilgio. Kai VTIF persikloja daugiau nei leidžia optinio jutiklio skyra, tai stebimi

objektai tampa neatskiriami. Skyra charakterizuojama dažniausiai dviem parametrais: Abbe ir Reilėjaus atstumais

$$r_{Abbe} \approx 0{,}5\left(\frac{\lambda}{NA}\right),\ r_{Airy} = 1{,}22 r_o = 0{,}61\left(\frac{\lambda}{NA}\right). \tag{1.46}$$

Abbe atstumas r_{Abbe}, tai VTIF centrinės viršūnės pusės amplitudės diametras. Reilėjaus suformuluotas skyros kriterijus skelbia, kad dviejų taškinių šaltinių signalus, esančių židinio plokštumoje, VTIF galima atskirti, jei tarp jų viršūnių yra atstumas didesnis nei r_{Airy}.

Vaizdo fotografavimo sistemai naudojami specialūs Nikon matavimams skirti objektyvai su 20 ir 50 kartų didinimu, kurių skaitinės apertūros NA atitinkamai 0,42 ir 0,75 (Nikon 2008). Trumpiausias bangos ilgis apšvietimo sistemoje yra 0,38 μm ir paskaičiavus (2.32) gaunami r_{Abbe} = 0,45 μm ir r_{Airy}.= 0,55 μm 20 kartų padidinimui ir r_{Abbe} = 0,25 μm ir r_{Airy}.= 0,31 μm 50 kartų padidinimui. Tai reiškia, kad žiūrint per mikroskopą su 20x padidinimu į rastrinį piešinį apšviestą 0,38 μm bangos ilgio šviesa, kai rastro struktūros dažnis būtų 2,2 brūkšnio periodo į 1 μm, tai dar įmanoma brūkšnius atskirti.

Objektyvas yra sudėtinga optinė sistema, kurios VTIF nėra žinomas. Be to VTIF yra sunkiai pamatuojamas dydis. Kaip buvo anksčiau minėta, OPF yra VTIF Furjė transformacija, todėl VTIF radimui naudojama OPF atvirkštinė VTIF Furjė transformacija. Objektyvų gamintojai dažnai pateikia tik moduliacijos perdavimo funkciją (MPF), kuri yra OPF amplitudinė funkcija. Mikroskopijoje dažniausiai nėra nagrinėjama kaip keičiasi pro optinę sistemą praėjusių bangų fazė. Todėl analizuojama OPF tik amplitudinė funkcija, kitaip vadinama MPF. Jos radimui buvo panaudota kito autoriaus programa (Tuan 2006).

Brūkšnio krašto matavimo neapibrėžties radimas yra sudėtingesnis uždavinys nei paties krašto matavimas. Daroma prielaida, kad brūkšnio krašto matavimo atsitiktinės paklaidos yra pasiskirsčiusios pagal normalųjį dėsnį. Tada n brūkšnio krašto matavimų, kai šiurkštumas išreiškiamas kaip vidutinis kvadratinis nuokrypis brūkšnio krašto pozicijos, šiurkštumo matavimo neapibrėžties santykinė paklaida gali būti apskaičiuota iš formulės

$$\frac{\Delta\sigma_{LER}}{\sigma_{LER}} \approx \frac{1}{\sqrt[2]{2n}}. \tag{1.47}$$

Brūkšnio kontūro šiurkštumas yra vienas iš parametrų apibūdinantis skalės brūkšnį. Šiurkštumas apibūdinamas kaip brūkšnio kontūro reikšmių deviacija atžvilgiu brūkšnio krašto.

Kadangi brūkšnio kontūro matavimas yra atliekamas su skaitmenine kamera fiksuojant vaizdą per labai trumpą laiką (iki 20 μs) ir naudojant stiprų

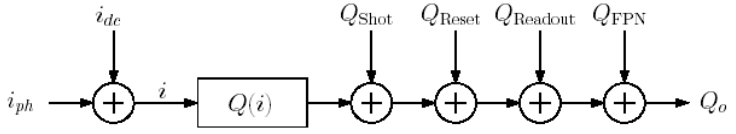
apšvietimą, tai brūkšnio krašto matavimo tikslumas yra brūkšnio kontūro pozicijų ir kameros jutiklio triukšmo vidutinio kvadratinio nuokrypių suma.

Todėl matuojamas krašto šiurkštumo nuokrypis yra skaičiuojamas:

$$\sigma^2_{matuojamas} = \sigma^2_{LER} + \sigma^2_{Kameros_triuksmas}\ . \tag{1.48}$$

Matuojant brūkšnio plotį, pagal matavimo algoritmą kameros jutiklio triukšmas apdorojant yra vidurkinamas. Jo reikšmės yra tik teigiamos. Teigiama, kad suvidurkinto triukšmas įtaka vieno ir kito brūkšnio kraštų skaičiavimuose vienoda, todėl jis nereikšmingas.

Kameros triukšmas priklauso CCD ar CMOS elemento veikimo sąlygų. Dažniausiai yra analizuojami 1.33 paveiksle pateikti triukšmo šaltiniai. Vaizdo elemente atsitiktinai atsiranda laisvų elektronų ir pradeda tekėti vadinama „tamsos“ srovė i_{dc}. Tai vyraujantis jutiklio triukšmas. Be šio, dar yra laikinasis, užfiksuoto pavyzdžio ir nuskaitymo grandinės triukšmai.



1.33 pav. Fotosrovės i_{ph} pavertimo į išėjimo įkrovą Q_o modelis
Fig. 1.33. Transfer model of photocurrent i_{ph} to charge Q_o

Q_i – jutiklio srovės transformavimo funkcija, Q_{shot} – šratinio triukšmo įkrova, kuri priklauso nuo integravimo laiko ir turi vidutinę galią $i(i_{ph} + i_{dc})t_{int}/q$, Q_{Reset} – užfiksuoto pavyzdžio ištrynimo triukšmas, $Q_{Readout}$ – nuskaitymo grandinės triukšmas, Q_{FPN} – adityvus fiksuoto pavyzdžio triukšmas, lygus:

$$Q(i) = \begin{cases} \dfrac{1}{q}(it_{int}), & 0 < i < \dfrac{qQ_{sat}}{t_{int}} \\ Q_{sat} & i \geq \dfrac{qQ_{sat}}{t_{int}} \end{cases}, \tag{1.49}$$

čia Q_{sat} – jutiklio prisotinimo triukšmas.

Kuo ilgesnis vaizdo ekspozicijos laikas t_{int}, tuo tolygiau pasiskirsto triukšmas CCD matricoje. Turint ilgos ekspozicijos laikus, galima sudaryti CCD jutiklio triukšmo žemėlapį, nes jis įgauna sistematinės paklaidos pobūdį, ir dalinai jį kompensuoti. Tačiau tiriamoje kameroje, esant keliolikos mikrosekundžių vaizdo ekspozicijos laikui, šis triukšmas turi būti laikomas kaip atsitiktinė paklaida. Todėl šio kompensavimo metodo taikyti negalima eliminuojant triukšmo įtaką brūkšnio krašto šiurkštumui.

Kitas svarbus veiksnys brūkšnio krašto matavimo tikslumui susijęs ne su amplitudiniais brūkšnio krašto parametrais, o su dažniniais. Kraštas yra diskretizuojamas pikselio dydžio padalinto iš mikroskopo objektyvo didinimo intervalais. Šiame intervale brūkšnio krašto reikšmės yra optiškai vidurkinamos. Tai pagerina brūkšnio krašto šiurkštumo rodiklį.

Artimiausiai susijusių su disertacija tyrimų apžvalga. Ilgio kalibravimo problemos plačiai tyrinėjamos mūsų šalies universitetų (VGTU ir KTU) ir mokslininkų: V. Giniotis, A. Kasparaitis, S. Kaušinis, A. Šukys, S. V. Augutis ir R. Žilinskas. Ilgio matų kalibravimo tyrimais yra apgintos kelios disertacijos Lietuvoje: A. Jakšto, A. Kilikevičiaus, A. Chaziachmetovo ir L. Gaidamovičiūtės. Tačiau kalbant apie kampo kalibravimą galime išskirti vos kelis.

D. Bručo (vadovas prof. habil. dr. V. Giniotis) disertacijoje pasiūlytas naujas apskritiminių skalių kalibravimo metodas, leidžiantis suprastinti matavimo procesą. Darbo metu buvo sukurtas unikalus geodezinių kampus matuojančių prietaisų horizontaliojo kampo kalibravimo įrenginys. Automatizuotas komparatoriaus stendas gali kalibruoti skales trimis skirtingais kampų matavimo būdais, naudojant skirtingas kalibravimo priemones.

Darbe išsamiai pateikta komparatoriaus stendo sandara, techniniai duomenys, ištirtos stendo tikslumo charakteristikos. Sukurtas naujas apskritiminės skalės kalibravimo metodas.

Kuriant komparavimo stendą yra naudoti optiniai mikroskopai su skaitmeninėmis vaizdo kameromis. Tai yra panašios konstrukcijos mikroskopai kaip ir tiriamo ilgio komparatoriaus sistemos, tačiau yra ir skirtumų, tai kitoks apšvietimo šaltinis, objektyvų didinimas, brūkšnio pozicijos nustatymo algoritmas.

A. Kilikevičiaus disertacijoje (vadovas prof. habil. dr. V. Vekteris) ištirta virpesių atsiradimo priežastys, kurios įtakoja duomenų gavimo tikslumą, naudojant komparatorių. Darbe yra sukurti dinaminiai ir matematiniai modeliai, kurie patikrinti remiantis eksperimentais. Eksperimentų metu buvo tiriama virpesių įtaka kalibravimo rezultatui, keičiant kalibravimo greitį, suteikiant sistemai išorinį žadinimą. Disertacijoje ne tik sukurta dinaminių paklaidų tyrimo metodika, bet ir praktiškai nustatyti paklaidų, atsirandančių dėl virpesių dėsningumai. Eksperimentuose buvo naudojama moderni įranga, kuri leido surinkti duomenys automatiškai. Tyrimo eigoje buvo atlikta labai daug eksperimentų ir surinktas didelis kiekis duomenų. Sukurta dinaminių paklaidų ir virpesių kalibravimo rezultatų neapibrėžties metodika.

Sukurti dinaminiai modeliai ir atliktas modeliavimas naudojant Simulink programinėje įrangoje. Dinaminiam modeliavimui koeficientai gauti iš eksperimentinių duomenų. Modeliavimas leido patobulinti komparatoriaus

konstrukciją. Disertacijoje ištirti įvairių komparatoriaus mazgų ir elementų sukelti virpesiai, rasti ir įvertinti virpesių šaltiniai, nustatyti slopinimo parametrai. Darbas leido kiekybiškai įvertinti virpesių šaltinius, atlikti tikslingus komparatoriaus mazgų patobulinimus.

R. Lazdino disertacijoje (vadovas prof. habil. dr. A. Kasparaitis) pateikta ilgio matų, kalibravimo metodų ir priemonių apžvalga, kalibravimo sistemos matavimo paklaidų ir neapibrėžties sandų analizė. Tai pat nustatyti reikalavimai dinaminiam kalibravimui įterptinės metrologijos sąlygomis. Darbe aprašomas skalių brūkšnių padėties nustatymo proceso modeliavimas ir pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai. Taip pat analitiškai ir eksperimentiškai ištirta išorinių ir vidinių temperatūrinių trikdžių bei geometrinių judesio paklaidų įtaka kalibravimo tikslumui, pasiūlyta pastarųjų kompensavimo metodika. Ketvirtajame skyriuje pateikti kompleksiniai pavyzdinių matų kalibravimo sistemos tikslumo tyrimo rezultatai. Sukurtas ilgio matų kalibravimo kompleksas užtikrina sietį su pirminiu ilgio vieneto etalonu.

A. Chaziachmetovo (vadovas prof. dr. V. Dailidėnas) disertacijoje atliktas tarplaboratorinių lyginimų rezultatų neapibrėžties įverčių sklaidos tyrimas parodė, kad trumpiems matams yra pasiekiamas neapibrėžties įvertis 2–30 nm intervale. Išskiriant neapibrėžties sandus, daugumoje komparatorių pirmas pagal vertės dydį yra oro lūžio koeficiento neapibrėžties įvertis.Tai pat nustatyta, kad valstybiniam etalonui tinkamų platininių termometrų kalibravimo lentelėse esančios verčių neredukuotosios sistematinės paklaidos galima neįvertinti, nes ji yra nykstamai mažo dydžio, lyginant su sumine kalibravimo neapibrėžtimi.

D. Saulevičiaus darbe analizuojami kontūrų nustatymo būdai, kurie dažnai būna pagrindinė daugelio vaizdų analizės operacijų užduotis. Šiame darbe tai pat apžvelgti metodai, nagrinėjantys šablonų struktūras, aprašomos specifinės vaizdų apdorojimo ir atpažinimo technikos, kurios nagrinėja vientisų objektų arba defektų identifikaciją dvimačiuose paveiksluose ir/arba šablono atitikimą etaloniniam šablonui.

H. Scharr disertacijoje tiriama skaitmeninio vaizdo filtravimo problema. Filtravimas naudojamas sumažinti triukšmo įtakai, tačiau tuo pat metu yra prarandama dalis paveiksle slypinčios informacijos. Autorius sprendžia optimalaus filtro radimo problemą. Įdomi yra trečioji disertacijos dalis, kurioje filtravimui yra taikomas Laplaso operatorius, kurio pagalba gali būti ieškomas brūkšnio kraštas, ir Furjė transformacija, kurios pagalba galima vertinti defokusavimo parametrus.

1.9. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad kampo kalibravimo problematika aktuali ir yra mažai atlikta tyrimų brūkšninių kampo matų kalibravimo sistemos paklaidoms įvertinti. Literatūroje taip pat pažymima, kad kiekvienos kalibravimo sistemos struktūra, konstrukcija ir matematinis programinis aprūpinimas individuliai įtakoja sistemos tikslumą, todėl kitų tyrimų rezultatai gali nepasitvirtinti tiriamoje sistemoje. Norint ištirti kampo kalibravimo paklaidas, reikia:

1. Sudaryti brūkšninių matų skalių judančio vaizdo, kuris yra stebimas per mikroskopą, modelį ir jį ištirti.
2. Sudaryti precizinių kampo matų kalibravimo metodiką, analitiškai ir eksperimentiškai ištirti kalibravimo tikslumą įtakojančių faktorių poveikį ir optimizuoti jų reikšmes.
3. Analitiškai ir eksperimentiškai ištirti išorinių ir vidinių trikdžių įtaką kalibravimo tikslumui, sukurti priemones jų poveikio kalibravimo paklaidoms sumažinti.

2

Optinių ir geodezinių prietaisų justavimo įrenginio analitiniai ir eksperimentiniai tyrimai

Skyriuje pateikiami naujo justavimo įrenginio (centravimo – gulsčiavimo staliuko) analitiniai ir eksperimentiniai tyrimai. Gauti nauji, originalūs duomenys centravimo – gulsčiavimo staliuko stabilumui įvertinti. Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Sabaitis *et al*. 2013).

Sparčiai augant įrengimų ar įrangos bei atskirų jos dalių ir komponentų gamybos technologijai, ženkliai pagerėjo jų techninės charakteristikos, sumažėjo investavimo kaštai, ar kiti svarbūs aspektai. Kampų matavimo sritis tapo ne išimtimi, o joje naudojama sudėtinga rastrinių skalių gamybos technologija leidžia ieškoti naujų bekontakčių rastrų formavimo būdų. Žinome, kad rastrinių skalių gamybos istorija tęsiasi nuo senų laikų pradedant sudėtingomis dalijimo (ADM) mašinomis, baigiant fotolitografiniu būdu, ėsdinimu ir metalo užgarinimu vakuume pagal Diadur, Aurodur, Zerodur ar kitas technologijas. Šios pakankamai tikslios skalės, skirtos optinėms matavimo sistemoms bei kampo keitikliams, yra pagamintos chromo, sidabro, aukso dangose ant stiklo ar kitų metalo lydinių diskų paviršių. Taip pat reikia paminėti, jog didelį postūmį skalių gamyboje davė lazeriniai, optiniai bei elektromagnetiniai skalių padalų žymėjimai. Vienas sudėtingų iššūkių, su kuriais susiduria mokslas ir aukštųjų

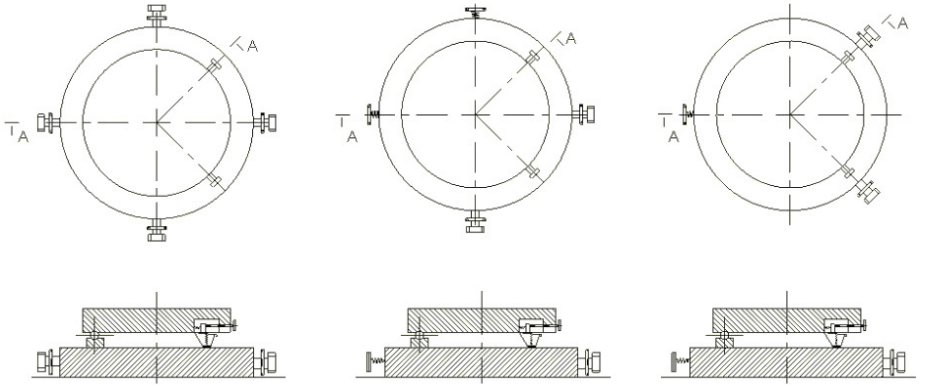
technologijų pramonė, yra vis didėjantis poreikis įterpti susietąją kampo metrologiją tiesiogiai į technologinius procesus, atliekant tikslius dinaminius matavimus žymiai sudėtingesnėje negu kalibravimo laboratorijų aplinkoje (Kaušinis 2007). Aukštųjų technologijų pažanga kelia vis aukštesnius kampo matavimo tikslumo kalibravimo reikalavimus, todėl jų įgyvendinimui reikia naudotis pažangiausiomis idėjomis, ieškoti bei kurti naujas priemones, kuriomis remiantis galima pagrįsti kampo kalibravimo sistemų tobulinimo kryptis ir sudaryti kalibravimo metodologijas.

2.1. Centravimo-gulsčiavimo staliuko teoriniai tyrimai

Apskritiminių skalių matavimai, jų apžvalgos ir analizės rodo, didelį susidomėjimą skalių tikslumo bei matavimų efektyvumo didinimo link. Norint užtikrinti matavimų kokybę neretai susiduriame su papildomais trūkumais matavimo technikoje. Apskritiminių skalių naudojimas atskaitymo sistemose, pasukamųjų optinių stalų matavimo sistemose, mikroskopuose, teodolituose ir kt., turi užtikrinti įrangos ar įrenginio patikimumą. Taip pat dideli reikalavimai yra keliami ir didelio tikslumo skalių matavimo įrenginių pavaroms. Kai kuriais atvejais tam naudojama didelio diapazono reguliuojama skalės sukimo pavara ir sukimosi judesio stabilizavimo priemonės. Itin dideli reikalavimai keliami limbų centravimo ir niveliavimo bei linijinių skalių justavimo įrenginiams, kurie privalo perduoti mikrometro dalių poslinkius ir, juos atlikus, patikimai fiksuoti matuojamąjį objektą (Giniotis 2007).

Standartinės centravimo schemos pateiktos (2.1 pav.), tačiau jos nėra pritaikytos daugeliui matavimų sistemų, taip pat šie staliukai neturi galimybės būti automatizuoti šiuolaikiniuose kampų matavimo įrenginiuose.

Apskritiminės skalės yra matuojamos, nustatant atitinkamai jų brūkšnių padėties paklaidas, paskui jos naudojamos kaip pamatinis etalonas staklėse bei įvairiose technologinėse mašinose bei padėties ir poslinkių matavimo įrenginiuose. Naujų apskritiminių skalių matavimuose, sumažinti skalės pozicionavimo paklaidas sukūrėme naują, centravimo-gulsčiavimo staliuką, skirtą apskritiminių skalių montuojamų matavimo prietaisuose (tacheometruose, staklių pasukamuosiuose staluose ir kt.) brūkšnių kampinės padėties tikslumo matavimams atlikti.



2.1 pav. Centravimo-gulsčiavimo schemos: a – centruojamas keturiais taškais – keturiais varžtais), b – centruojamas keturiais taškais – du varžtai ir dvi spyruoklės, c – centruojamas trimis taškais – du varžtai ir viena spyruoklė

Fig. 2.1. Levelling-centering of the scheme: a – centered with four screws, b – centered with two screws and couple spring, c –centered in three point- two bolts and one spring

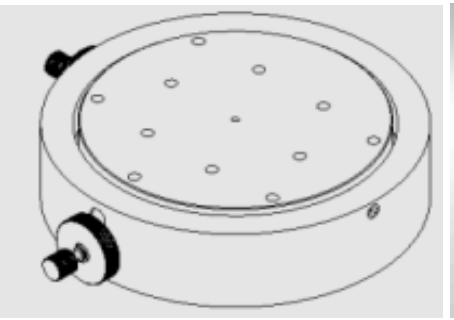
Naujo optinių ir geodezinių prietaisų justavimo įrenginio (centravimo-gulsčiavimo staliuko) konstrukcija:

- korpusas (išorinis žiedas), ant kurio sumontuotos visos kitos įrenginio dalys;
- centruojamas-gulsčiuojamas diskas (vidinis žiedas);
- apatinis žiedas pritaikytas pritvirtinti staliuką prie kitų matavimo sistemų;
- dvi centravimo-gulsčiavimo mikro-pastūmos;
- bei keletas elementų (šarikėliai, spyruoklės, kūgio formos antgaliai ir t. t.) mikro-pastūmai perduoti.

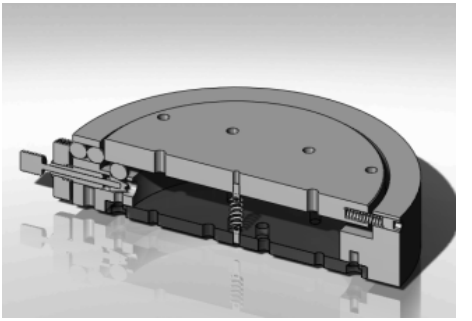
Optinių ir geodezinių prietaisų justavimo staliukas turi dvi poras justavimo mechanizmų. Centravimo ir gulsčiavimo padėtis reguliuojama toje pačioje plokštumoje, dvejose statmenose viena kitos atžvelgiu ašyse. Šis įrenginys (2.2 ir 2.3 pav.) pasižymi tuo, kad lengva supaprastinti ir padidinti jo tikslumą. Centravimo-gulsčiavimo mikromechanizmai sumontuoti koncentriškai dviejose statmenose ašyse, kurių pastūmos perduodamos į dvi disko atramas. Siekiant padidinti poslinkių tikslumą ir mechanizmo skiriamąją gebą, abu koncentriški mechanizmai sumontuoti taip, kad veiktų nepriklausomai vienas nuo kito. *Centravimo* padėtis reguliuojama dviem žiedeliais 5, kurių paviršiai turi 0,2 mm nuolydį, taip veikdami lyg koncentrikai per šratus stumdo vidinį žiedą 2

reikiama padėtimi. Centravimas atliekamas mikroskopu, kol disko padėtis atitinka sukimosi padėties centro atžvelgiu.

Gulsčiavimo padėtis reguliuojama dviems sraigtiniai kumšteliais 4, kurių gale yra prisukti kūgio formos šlifuoti antgaliai 6. Sraigtai yra sukami į vieną ar į kitą pusę, taip slankiodamas kūgio formos antgalis per šratus gulsčiuoja vidinį žiedą 2 reikiama padėtimi. Spyruoklės palaiko įvaržą ir laiko diską suglaustą su justavimo mechanizmu. Gulsčiavimas taip pat atliekamas stebint objektą mikroskopu arba į jį atrėmus indikatorių iki tokios padėties kai diskas tikslią padėtį.



2.2 pav. Surinkto staliuko projekcija
Fig. 2.2. Projection of the table



2.3 pav. Staliuko (3D modelio) pjūvis
Fig. 2.3. 3D model section

Teorinis pagrindimas. Sistemos modeliavimas buvo atliekamas naudojantis SolidWorks programiniu paketu. Nagrinėjant staliuko dinaminius parametrus tikslinga naudoti sekančią formulę:

$$[A]\{\ddot{q}(t)\}+[B]\{\dot{q}(t)\}+[C]\{q(t)\}=0\,, \tag{2.1}$$

čia (*A*), (*B*), (*C*) – inercijos, slopinimo ir standumo matricos; $\{q(t)\}$, $\{\dot{q}(t)\}$, $\{\ddot{q}(t)\}$ – poslinkio, greičio ir pagreičio vektoriai.

Šios lygties sprendimas įgauną šią formą:

$$\boldsymbol{q}(t)=\sum_{k=1}^{2n}\boldsymbol{z}_{(k)}e^{\lambda_k t}. \tag{2.2}$$

Taigi sistemos reakcija gali būti žiūrima kaip išplėstinė modaliniu pagrindu [$z_{(1)}$ … $z_{(2n)}$]. Jei 2n laiko momentai yra įvertinami, tai duomenys gali būti renkami matricoje Q:

$$\underbrace{[\boldsymbol{q}(t_1)\ldots\boldsymbol{q}(t_{2n})]}_{\boldsymbol{Q}}=\underbrace{[\boldsymbol{z}_{(1)}\ldots\boldsymbol{z}_{(2n)}]}_{\boldsymbol{Z}}\underbrace{\begin{bmatrix}e^{\lambda_1 t_1} & \cdots & e^{\lambda_1 t_{2n}}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ e^{\lambda_{2n} t_1} & \cdots & e^{\lambda_{2n} t_{2n}}\end{bmatrix}}_{\Lambda}. \tag{2.3}$$

Sekanti sistemos reakcija, kuri yra uždelsta intervalu t negu pateikta lygtyje (2.3), įgauna sekančią išraišką:

$$\begin{aligned}\underbrace{[\boldsymbol{q}(t_1+\Delta t)\ldots\boldsymbol{q}(t_{2n}+\Delta t)]}_{\boldsymbol{Q}_{\Delta t}} &= [\boldsymbol{z}_{(1)}\ldots\boldsymbol{z}_{(2n)}] && \begin{bmatrix} e^{\lambda_1(t_1+\Delta t)} & \cdots & e^{\lambda_1(t_{2n}+\Delta t)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\lambda_{2n}(t_1+\Delta t)} & \cdots & e^{\lambda_{2n}(2n+\Delta t)} \end{bmatrix} \\ &= [\boldsymbol{z}_{(1)}e^{\lambda_1\Delta t}\ldots\boldsymbol{z}_{(2n)}e^{\lambda_{2n}\Delta t}] && \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t_1} & \cdots & e^{\lambda_1 t_{2n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\lambda_{2n}t_1} & \cdots & e^{\lambda_{2n}t_{2n}} \end{bmatrix} \\ &= \underbrace{[\hat{\boldsymbol{z}}_{(1)}\ldots\hat{\boldsymbol{z}}_{(2n)}]}_{\hat{\boldsymbol{Z}}} && \underbrace{\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t_1} & \cdots & e^{\lambda_1 t_{2n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\lambda_{2n}t_1} & \cdots & e^{\lambda_{2n}t_{2n}} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\Lambda}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Remiantis panašiais argumentais trečioji sistemos reakcija, kuri yra uždelsta intervalu 2t įgauna sekančią išraišką:

$$\underbrace{[\boldsymbol{q}(t_1+2\Delta t)\ldots\boldsymbol{q}(t_{2n}+2\Delta t)]}_{\boldsymbol{Q}_{2\Delta t}} = \underbrace{[\hat{\hat{\boldsymbol{z}}}_{(1)}\ldots\hat{\hat{\boldsymbol{z}}}_{(2n)}]}_{\hat{\hat{\boldsymbol{Z}}}} \underbrace{\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t_1} & \cdots & e^{\lambda_1 t_{2n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{\lambda_{2n}t_1} & \cdots & e^{\lambda_{2n}t_{2n}} \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{\Lambda}}, \quad (2.5)$$

čia $\hat{\hat{z}}_{(i)} = z_{(i)}e^{2\lambda_i\Delta t}$.

Sugrupavus lygtis (2.3) ir (2.4), gaunamos tokios priklausomybės:

$$\begin{bmatrix} Q \\ Q_{\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \\ \hat{Z} \end{bmatrix}\Lambda \quad \text{ir} \quad \Phi = A\Lambda. \quad (2.6)$$

Panašiai, Sugrupavus lygtis (2.4) ir (2.5), gaunamos tokios priklausomybės:

$$\begin{bmatrix} Q_{\Delta t} \\ Q_{2\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z} \\ \hat{\hat{Z}} \end{bmatrix}\Lambda \quad \text{ir} \quad \hat{\Phi} = \hat{A}\Lambda. \quad (2.7)$$

Panaikinus matricą tarp lygčių (2.6) ir (2.7), gauname:

$$\hat{\Phi}\Phi^{-1}A = \hat{A}, \quad (2.8)$$

jeigu $A = [a_1 \ldots a_n]$ ir $\hat{A} = [\hat{a}_1 \ldots \hat{a}_n]$, sekanti lygtis susieja kiekvieną stulpelį a_i iš A į atitinkamą stulpelį $\hat{a}_i$ iš ^A

$$\hat{\Phi}\Phi^{-1}a_i = \hat{a}_i \quad (2.9)$$

kadangi $\hat{a}_i = e^{\lambda_i\Delta t}a_i$,

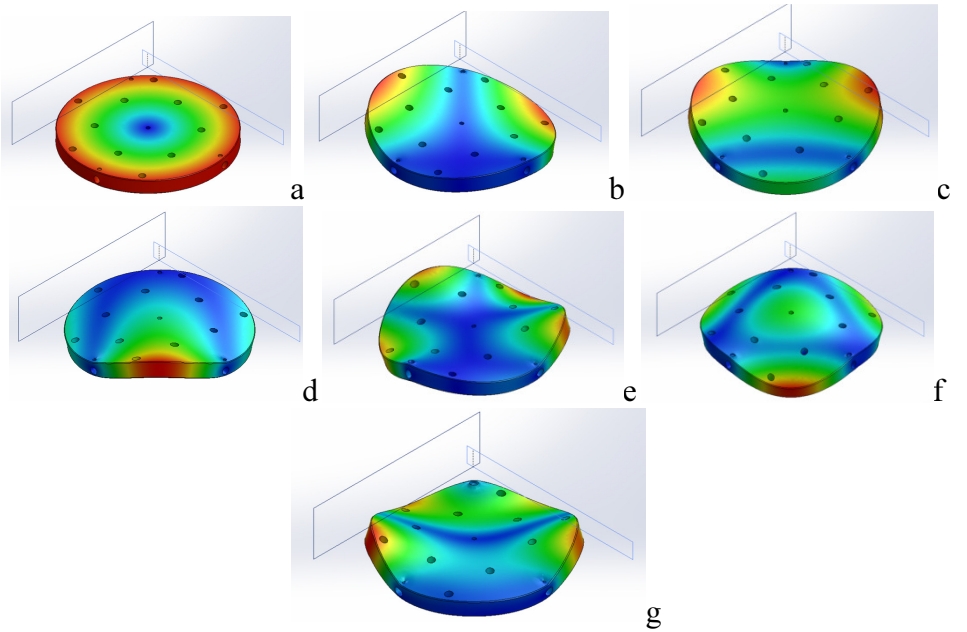
$$\hat{\Phi}\Phi^{-1}a_i = e^{\lambda_i\Delta t}a_i \quad (2.10)$$

Šis ryšys yra tikrinė lygtis. Tikriniai vektoriai a_i turi savo pirmą n koordinatę, kuri lygi konstrukcijos savosioms formoms (žr. lygtį (2.6)). Tikrinės

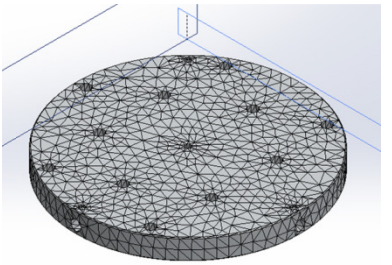
reikšmės yra lygios $e^{\lambda_i \Delta t}$,čia λ_i yra kompleksinė struktūros reikšmė. Lygtis (2.8) parodo, kad matricų tvarka $\widehat{\Phi}\Phi^{-1}$ turėtų būti lygi dvigubam modų, gautų matuojant sužadinant, skaičiui. Siekiant sumažinti šią kliūtį gali būti išnaudojamas mažiausiųjų kvadratų paklaida minimizavimo metodas. Tai leidžia apsvarstyti daugiau duomenų sužadinant didesnį modų skaičių. Φ ir $\widehat{\Phi}$ yra stačiakampės matricos ir tada lygtis (2.10) yra transformuojama į

$$\left[\widehat{\Phi}\Phi^T\right]\left[\Phi\Phi^T\right]^{-1} a_i = e^{\lambda_i \Delta t} a_i \qquad (2.11)$$

Žemiau pateikti modeliavimo rezultatai. 2.5 paveiksle pateiktas staliuko viršutinės dalies vaizdas, kuris yra padalintas į baigtinius elementus. Staliuko viršutinės dalies pirmosios 7 modos pavaizduotos 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Staliuko viršutinės dalies pirmosios 7 modos: a) sužadinta 298 Hz dažniu; b) sužadinta 431 Hz dažniu; c) sužadinta 593 Hz dažniu; d) sužadinta 1121 Hz dažniu; e) sužadinta 2312 Hz dažniu; f) sužadinta 2510 Hz dažniu; g) sužadinta 2623 Hz dažniu
Fig. 2.4. 7 modes of the upper part of the table: a) the result after 298 Hz of frequency; b) the result after 431 Hz of frequency; c) the result after 593 Hz of frequency; d) the result after 1121 Hz of frequency; e) the result after 2312 Hz of frequency; f) the result after 2510 Hz of frequency; g) the result after 2623 Hz of frequency



2.5 pav. Staliuko viršutinės dalies vaizdas padalintas į baigtinius elementus
Fig. 2.5. View of a table of the upper part is divided into finite elements

2.2. Eksperimentiniai staliuko dinaminiai tyrimai

Šių tyrimų tikslas – nustatyti sistemos mechaninį nestabilumą, kuris įtakoja sistemos kokybinius parametrus. Kaip pagrindinis šio tyrimo įvertinimas – atliekama modalinė analizė.

Modalinė analizė tai procesas, kurio metu konstrukcija charakterizuojama tikriniu (rezonanso) dažniu, slopinimu, ir modų formomis, kitaip tariant savo dinaminėmis savybėmis. Kadangi visi kūnai turi masę ir yra plastiški jie gali virpėti. Todėl didžioji dalis inžinerinių konstrukcijų ir mašinų yra veikiamos tam tikros formos svyruojamųjų judesių. Tam kad geriau suprasti bet kokių konstrukcinių virpesių problemas reikalinga nustatyti ir įvertinti rezonansinius dažnius. Vienas iš būdų yra konstrukcijos modalinių parametrų nustatymas. Atliekant modalinė analizę gaunamas konstrukcijos dinamikos matematinis modelis. Matematinis modelis sudarytas iš modų formų, kurių kiekviena turi tikrinį dažnį ir modalinį slopinimą. Modaliniai parametrai suteikia galutinį konstrukcijos dinamikos apibūdinimą.

Eksperimentinė modalinė analizė remiasi modalinių parametrų nustatymu atliekant bandymus skirtingai nuo analitinės modalinės analizės kur modaliniai parametrai gaunami iš baigtinių elementų modelių. Išskiriami du eksperimentinės modalinės analizės tipai: klasikinė modalinė analizė ir modalinė analizė darbo rėžime. Atliekant klasikinę modalinę analizę, dažnio atsako funkcijos (arba impulso atsako funkcijos) apskaičiuojamos iš išmatuotų žadinimo jėgų ir konstrukcijos atsako į žadinimą.

Modalinė analizė darbo rėžime remiasi konstrukcijos išėjimo signalų matavimu, priimant aplinkos triukšmus ir veikiančias jėgas kaip nematuojamą įeinantį signalą. Ji naudojama vietoj klasikinės modalinės analizės siekiant tikslios analizės kai konstrukcija yra realiame darbo rėžime ar situacijose kai sunku arba neįmanoma kontroliuoti dirbtinio konstrukcijos žadinimo.

Konstrukcijos dažnio atsako funkcija yra vienas iš efektyvių būdų gauti sistemos modelį dažnių srityje. Dažnio atsako funkcija tai atsako spektras išreikštas kaip žadinimo spektras su svertiniu sistemos koeficientu:

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega). \tag{2.12}$$

Sistemos svertinis koeficientas H(ω) yra vadinamas dažnio atsako funkcija ir išreiškiamas:

$$H(\omega) \equiv H(\omega) / F(\omega). \tag{2.13}$$

Jis apibūdina kompleksinį santykį tarp atsako ir žadinimo kaip dažnio ω funkcija.

Kompleksinis santykis reiškia, jog funkcija turi daugiklį $|H(\omega)|$ ir fazę $H(\omega) = \varphi(\omega)$.

Fizikine prasme dažnio atsako funkcija parodo, kad sinusinė žadinimo jėga, kuri veikia dažniu f sukurs sinusinę, tokio paties dažnio atsako jėgą. Atsako jėgos amplitudė bus padidinta dydžiu $|H(\omega)|$, o žadinimo ir atsako jėgų funkcijų fazės skirsis dydžiu $H(\omega)$.

Iš gautos dažnio atsako funkcijos nustatyta staklių griebtuvo virpesių modos, tikriniai dažniai, paklaidos ir kiekvienos modos slopinimo koeficientas *c.*

Atliekant eksperimentinę modalinę analizę žadinimo atsako metodu pasireiškia dviejų rūšių paklaidos. Pirmoji rūšis tai yra atsitiktinės paklaidos. Jos pasireiškia kaip atsitiktinė duomenų sklaida, kurią sukelia įvairūs triukšmai matavimų metu. Statistiniai įverčiai užteršti atsitiktinėmis paklaidomis gali būti pataisyti skaičiuojant vidurkius. Antroji paklaidų rūšis yra poslinkio paklaidos. Tai yra sisteminė paklaida, kuri pasireiškia ta pačia amplitude ir faze kiekvieno matavimo metu. Poslinkio paklaidos gali būti sumažintos tik pasirinkus kitokį įvertį. Toliau tekste pateikta tipinių paklaidų šaltinių (2.1 lentelė) klasifikacija su įvarčiais kiekvienai jų sumažinti ir ar koherencijos funkcija gali (+) ar negali (–) parodyti tam tikrą paklaidos buvimą.

Dėl Furjė eilutės transformacijos savybių, sisteminė paklaida gali pasireikšti kai atsakas turi labai tankius rezonansus palyginus su tiriamu dažnių diapazonu. Tankūs rezonansai truks ilgą laiko tarpą kas šiuo atveju reiškia, kad tankių dažnių reiškinys bus ilgą laiko tarpą. Kadangi mes duomenis renkame trumpą laiko tarpą yra tikimybė jog atsako signalas bus sutrumpintas.



2.6 pav. Virpesių parametrų matavimo ir analizės priemonės: stendo bendras vaizdas (c); *Lion precizion* poslinkio jutikliai U20B ir U3B (d) su stiprintuvais ir maitinimo šaltiniu (a); pjezokeraminis žadinimo šaltinis (d) su valdymo bloku (b)
Fig. 2.6. Vibrations measurement and analysis tools: General view of the stand (c); "Lion precizion" displacement sensors U20B U3B and (d) with power and the power supply (a); the piezoelectric excitation source (d) with control block (b)

Tyrimo priemonių ir metodų aprašymas. Virpesių parametrų matavimui buvo panaudotos *Brüel & Kjær* virpesių matavimo priemonės. Virpesių matavimo priemonės: 1. Kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo, kaupimo ir valdymo įranga 3660-D (2.7 pav.); 2. Kompiuterių DEEL (2.7 pav.); 3. *Lion precizion* poslinkio jutikliai U20B ir U3B (2.6 pav. d) su stiprintuvais ir

maitinimo šaltiniu (2.6 pav., a); 4. Pjezokeraminis žadinimo šaltinis (2.6 pav., d) su valdymo bloku (2.6 pav. b).

2.1 lentelė. Tipiniai paklaidų šaltiniai
Table 2.1. Typical sources of errors

Paklaida	Įvertis		
	H_1	H_2	γ^2
Triukšmas žadinime	Sisteminė	Atsitiktinė	+
Atsitiktinė žadinimo	Sisteminė/atsitiktinė	Sisteminė/atsitiktinė	+
Smūgio taško arba krypties sklaida	Atsitiktinė	Atsitiktinė	+
Deterministinė (smūgio)	Sisteminė	Sisteminė	-
Išėjimo signalo triukšmas (atsakas į nematuojamas žadinimo jėgas)	Atsitiktinė	Sisteminė	+

Dinaminių mechaninės sistemos charakteristikų nustatymui tyrimo stendo blokinė schema pateikta 2.8 paveiksle.



2.7 pav. Virpesių parametrų naudojamos priemonės: kilnojama matavimo rezultatų apdorojimo, kaupimo ir valdymo įranga „3660-D“ ir kompiuteriu DEEL
Fig. 2.7. Vibrations means used: portable measurement results processing, storage and management equipment, 3660-D and computer DEEL

Gauti matavimo signalai kompiuteriu buvo apdorojami, panaudojant programinius paketus Origin 6 ir Pulse. Buvo apskaičiuoti signalų spektrai, skirstiniai ir statistiniai parametrai:

Aritmetinis vidurkis:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \ . \tag{2.14}$$

Standartinis nuokrypis:

$$S_X = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \ . \tag{2.15}$$

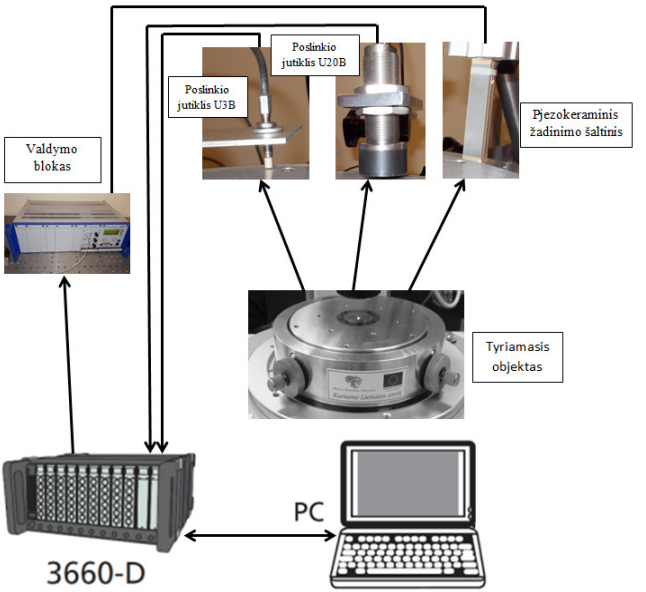
Standartinis vidurkio nuokrypis (aritmetinio vidurkio vidutinė kvadratinė paklaida):

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_X}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \ . \tag{2.16}$$

Sklaida:

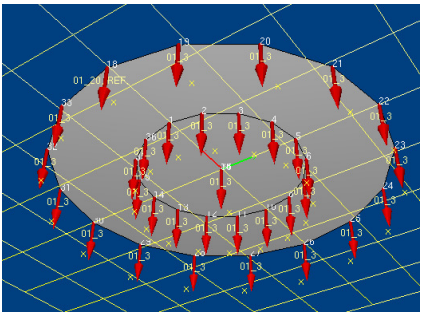
$$x_{sklaida} = x_{\max} - x_{\min}\,, \tag{2.17}$$

čia n – matavimo rezultatų skaičius, x_i – i-asis matavimo rezultatas.

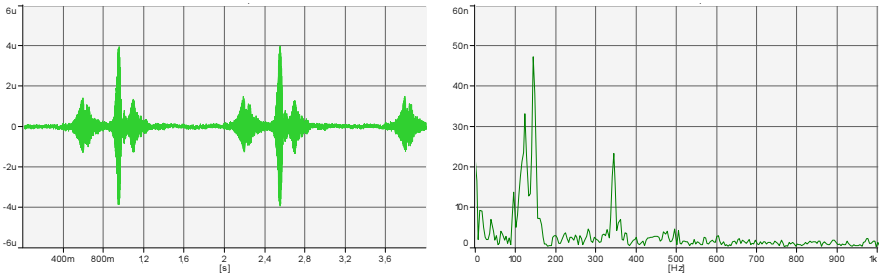


2.8 pav. Virpesių tyrimo stendo blokinė schema
Fig. 2.8. Block diagram of stand of vibration

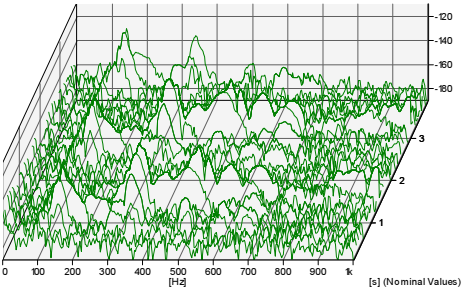
Tyrimo rezultatai panaudoti staliuko konstrukcijai tobulinti. Gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti 2.9–2.18 paveiksluose. 2.2 lentelėje pateiktas teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas.



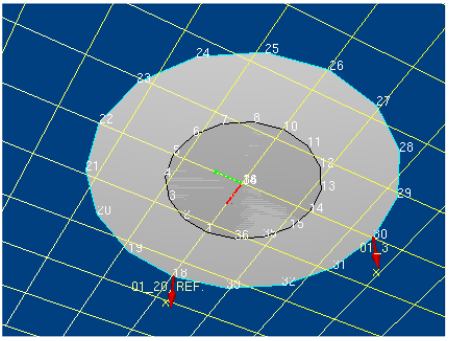
2.9 pav. Staliuko matavimo taškai atliekant modalinę analizę
Fig. 2.9. Modal analysis of the measurement points in the table



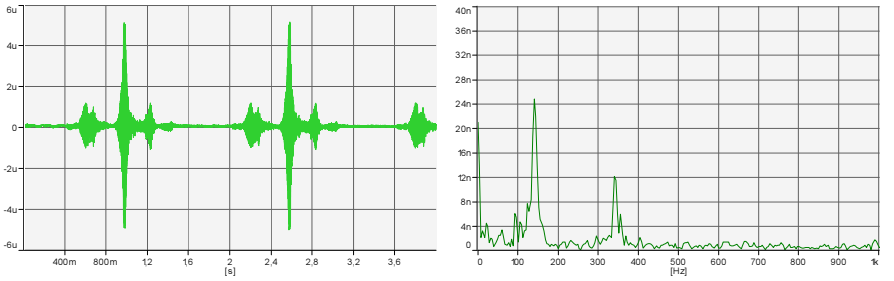
2.10 pav. Staliuko vidurio taško (atliekant modalinę analizę) poslinkio amplitudė, kuri parodo atsaką į išorinį žadinimą
Fig. 2.10. Amplitude of a table in the middle of a point (for modal analysis), which shows the response of the external excitation



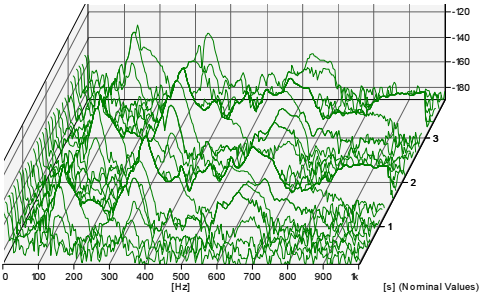
2.11 pav. Erdvinis grafikas parodantis staliuko vidurio taško (atliekant modalinę analizę) dažninę priklausomybę nuo laiko ir poslinkio amplitudės
Fig. 2.11. A three-dimensional graph showing the table mid-point (for modal analysis), frequency domain and the time dependence of the displacement amplitude



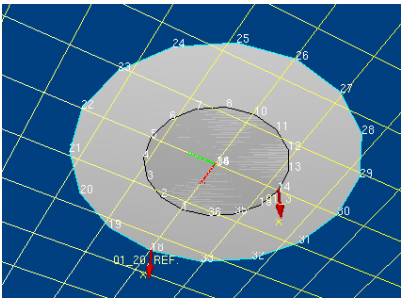
2.12 pav. Staliuko matavimo taškai atliekant modalinę analizę
Fig. 2.12. The measurement points in the table (modal analysis)



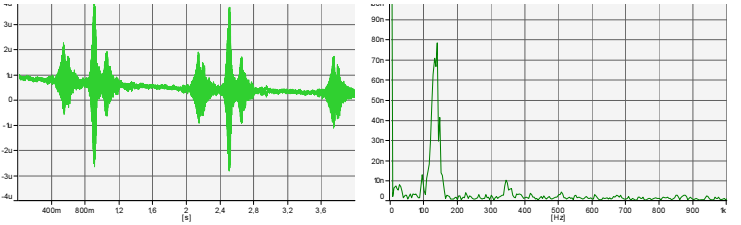
2.13 pav. Staliuko taško (2.12 pav.) poslinkio amplitudė, kuri parodo atsaką į išorinį žadinimą
Fig. 2.13. Amplitude of point table (Fig. 2.12) which shows the response of the external excitation



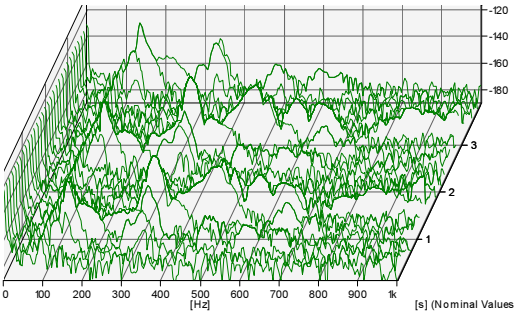
2.14 pav. Erdvinis grafikas parodantis staliuko taško (2.12 pav.) dažninę priklausomybę nuo laiko ir poslinkio amplitudės
Fig. 2.14. A three-dimensional graph showing the points table (Fig. 2.12) frequency domain and the time dependence of the displacement amplitude



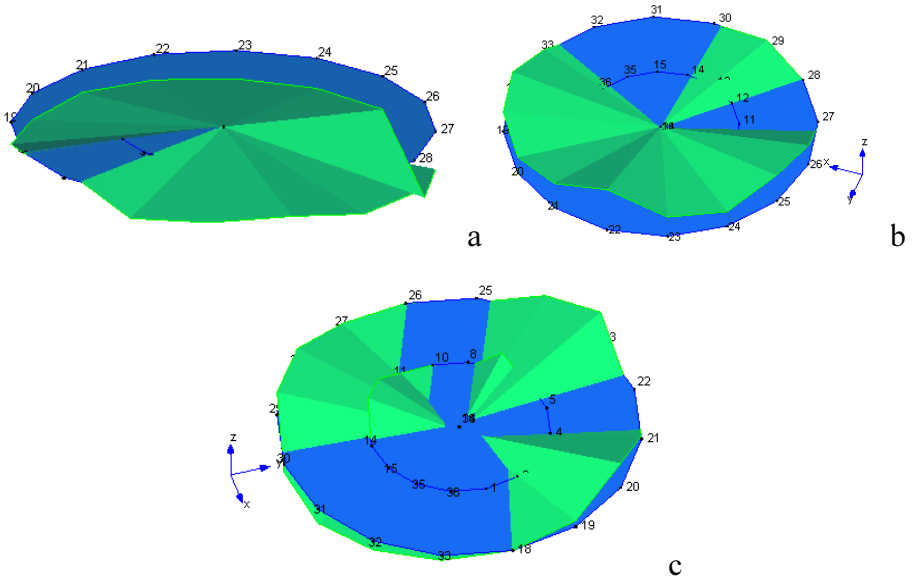
2.15 pav. Staliuko matavimo taškai atliekant modalinę analizę
Fig. 2.15. The measurement points in the table modal analysis



2.16 pav. Staliuko taško (2.15 pav.) poslinkio amplitudė, kuri parodo atsaką į išorinį žadinimą
Fig. 2.16. Amplitude of the point of the table (Fig. 2.15), which shows the response of the external excitation

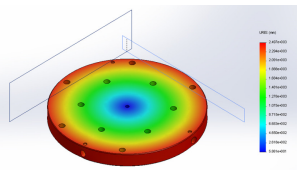
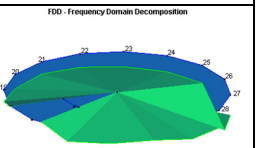
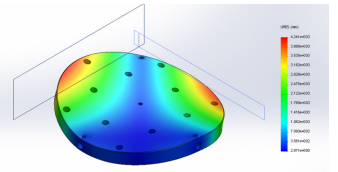
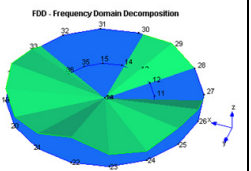


2.17 pav. Erdvinis grafikas parodantis staliuko taško (2.15 pav.) dažninę priklausomybę nuo laiko ir poslinkio amplitudės
Fig. 2.17. A three-dimensional graph showing (Fig. 2.15) frequency domain and the time dependence of the displacement amplitude of the point of the table

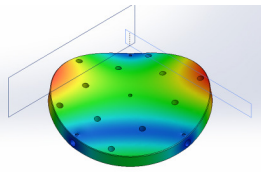
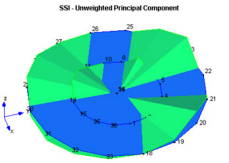
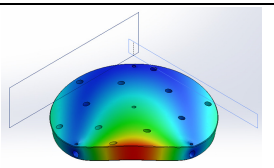
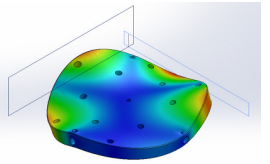
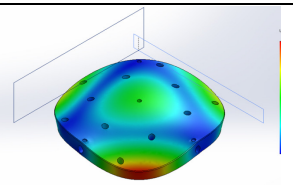
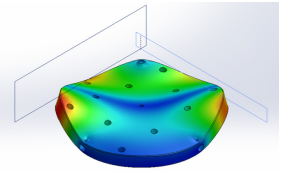


2.18 pav. Eksperimentinės modalinės analizės rezultatai: a) sužadinta 312 Hz dažniu; b) sužadinta 423 Hz dažniu; c) sužadinta 570 Hz dažniu
Fig. 2.18. Results of experimental modal analysis: a) after 312 Hz of frequency; b) after 423 of frequency; c) after 570 Hz of frequency

2.2 lentelė. Modalinės analizės teorinių ir eksperimentinių rezultatų palyginimas
Table 2.2. Comparison of results of theoretical and experimental of modal analysis

Modos	Teorinis		Eksperimentinis	
	Dažnis	Forma	Dažnis	Forma
	Hz		Hz	
1	298		312	
2	431		423	

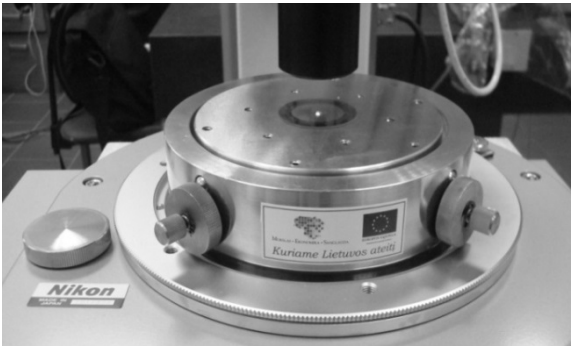
2.2 lentelės pabaiga

3	593		570	
4	1121			
5	2312			
6	2510			
7	2623			

Matavimo rezultatai 2.9–2.18 paveiksluose rodo, kad tyrimo metu nustatyti dažniai: 312 Hz, 423 Hz, 570 Hz (1, 2 ir 3 modų), kurių amplitudės yra didžiausios, tiesiogiai įtakotų (sumažintų) matavimo tikslumą.

2.3. Centravimo-gulsčiavimo staliuko eigos matavimai

Centravimo eigos matavimai (skiriamoji geba). Matavimai buvo atliekami naudojant dešimtųjų mikrono tikslumo mikroskopą *NIKON MM-400* Ant šio mikroskopo, judamo stalo buvo uždėtas centravimo-gulsčiavimo staliukas su rastrine skale (made by litographic) matavimams atlikti (2.19 pav.).

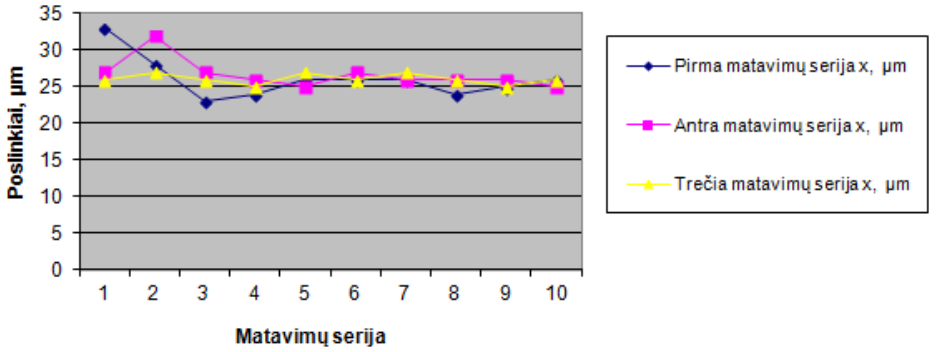


2.19 pav. Centravimo tikrinimas naudojant apskritiminę skalę
Fig. 2.19. Centering measurement using a circular scale

Matuodami staliuko maksimalią eigą, mikroskopo okuliaro siūlų sankirtos tašką sutapatinome su apskritiminės skalės centro tašku ir mikroskopo x, y rodmenis pakeitėme į nulinę poziciją. Sukdami viena, o paskui kitą sraigtus, didžiausias staliuko eigas (rodmenis) pateikiame 2.3 lentelėje. Apskritimines skales ir kitus matavimo objektus galima būtų centruoti ~ 30 µm ribose. Matavimo neapibrėžtis: (x) pastūma – 1,9 µm, (y) pastūma – 6,9 µm.

2.3 lentelė. Staliuko eigos rezultatai (x,y) koordinatėmis
Table 2.3. Result of max displacement of the table

Nr.	x, µm	y, µm	Nr.	x, µm	y, µm	Nr.	x, µm	y, µm	$\overline{x}$, µm	$\overline{y}$, µm
1.	33	648	11.	27	642	21.	26	647	26,3	648
2.	28	656	12.	32	651	22.	27	642		
3.	23	658	13.	27	649	23.	26	657		
4.	24	653	14.	26	655	24.	25	647		
5.	26	653	15.	25	650	25.	27	643		
6.	26	653	16.	27	653	26.	26	651	S=1,9	S=6,9
7.	26	654	17.	26	637	27.	27	652		
8.	24	649	18.	26	645	28.	26	640		
9.	25	628	19.	26	651	29.	25	639		
10.	26	640	20.	25	655	30.	26	647		

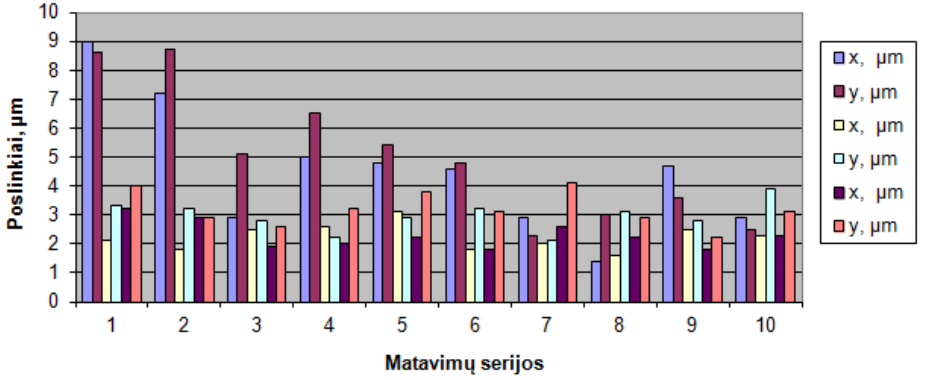


2.20 pav. Centravimo eigos matavimo rezultatai
Fig. 2.20. Results of measurement of centering

Skalės centravimo (skiriamosios gebos) matavimas atliekamas sukant du centravimo sraigtus, kurie yra koncentriški niveliavimo sraigtams ir yra suprojektuoti dvejose ašyse 90° kampu. Sukant kairįjį centravimo žiedą duomenys pateikti 2.4 lentelėje. Skiriamoji geba pasiskirsto nuo 2 iki 5 µm, atlaisvinus spyruoklės įtempimus, rodikliai pagerėjo iki dešimtųjų mikrometro dalių. Standartinis nuokrypis: (x) pastūma – 0,5 µm, (y) pastūma – 0,6 µm. Sukant dešinį sraigtą matavimo rezultatai rodo, jog staliuką galima centruoti 1–2 µm tikslumu (2.5 lentelė). Standartinis nuokrypis: (x) pastūma – 0,4 µm, (y) pastūma – 0,3 µm

2.4 lentelė. Staliuko skiriamoji geba sukant kairįjį sraigtą (x, y) ašimis
Table 2.4. Resolution of centering (turning the left sleeve-nut (x, y axes) of the table)

Nr.	x, µm	y, µm	Nr.	x, µm	y, µm	Nr.	x, µm	y, µm	$\bar{x}$, µm	$\bar{y}$, µm
1.	9,0	8,6	11.	2,1	3,3	21.	3,2	4,0	2,3	3,1
2.	7,2	8,7	12.	1,8	3,2	22.	2,9	2,9		
3.	2,9	5,1	13.	2,5	2,8	23.	1,9	2,6		
4.	5,0	6,5	14.	2,6	2,2	24.	2,0	3,2		
5.	4,8	5,4	15.	3,1	2,9	25.	2,2	3,8		
6.	4,6	4,8	16.	1,8	3,2	26.	1,8	3,1	S = 0,5	S = 0,6
7.	2,9	2,3	17.	2,0	2,1	27.	2,6	4,1		
8.	1,4	3,0	18.	1,6	3,1	28.	2,2	2,9		
9.	4,7	3,6	19.	2,5	2,8	29.	1,8	2,2		
10.	2,9	2,5	20.	2,3	3,9	30.	2,3	3,1		

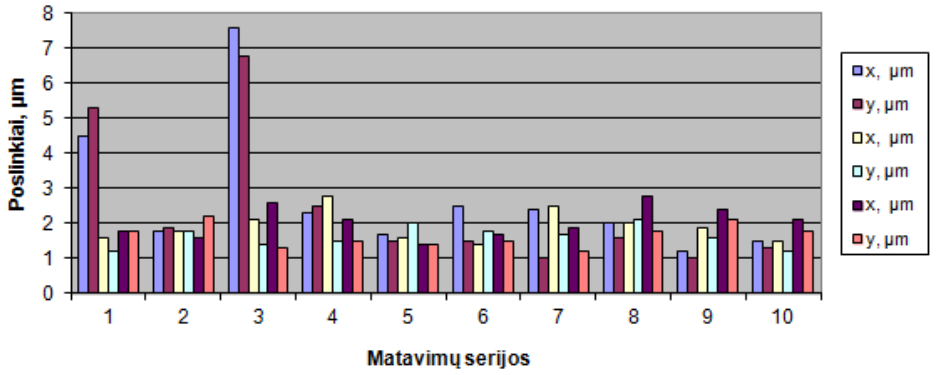


2.21 pav. Centravimo skiriamosios gebos matavimai sukant kairįjį sraigtą
Fig. 2.21. Results of resolution in the measurement of centering turning left sleeve-nut

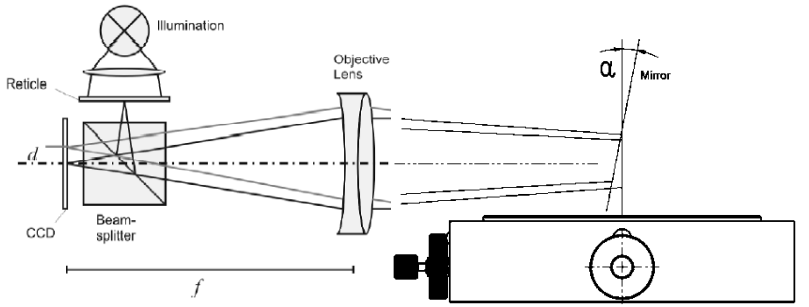
2.5 lentelė. Staliuko skiriamoji geba sukant dešinį sraigtą x, y ašimis
Table 2.5. Resolution of centering (turning the right sleeve-nut (x, y axes) of the table)

Nr.	x, µm	y, µm	Nr.	x, µm	y, µm	Nr.	x, µm	y, µm	$\overline{x}$, µm	$\overline{y}$, µm
1.	4,5	5,3	11.	1,6	1,2	21.	1,8	1,8	2,0	1,6
2.	1,8	1,9	12.	1,8	1,8	22.	1,6	2,2		
3.	7,6	6,8	13.	2,1	1,4	23.	2,6	1,3		
4.	2,3	2,5	14.	2,8	1,5	24.	2,1	1,5		
5.	1,7	1,5	15.	1,6	2,0	25.	1,4	1,4		
6.	2,5	1,5	16.	1,4	1,8	26.	1,7	1,5	S = 0,4	S = 0,3
7.	2,4	1,0	17.	2,5	1,7	27.	1,9	1,2		
8.	2,0	1,6	18.	2,0	2,1	28.	2,8	1,8		
9.	1,2	1,0	19.	1,9	1,6	29.	2,4	2,1		
10.	1,5	1,3	20.	1,5	1,2	30.	2,1	1,8		

Gulsčiavimo eigos matavimai (skiriamoji geba). Staliuko gulsčiavimo matavimai t. y. kampo α reikšmė buvo surasta panaudojant *Taylor Hobson precision* autokolimatorių (2.23 pav.). Ant staliuko judamo žiedo buvo uždėtas veidrodėlis, o į jį nukreiptas autokolimatoriaus šviesos šaltinis. Autokolimatorius tai tarsi sujungia kolimatorių ir žiūroną į vieną prietaisą panaudojant vieną objektyvą. Kampo matavimas tarp siunčiamo ir atsispindėjusio šviesos srauto nusako veidrodinio paviršiaus (veidrodėlio) atspindį.



2.22 pav. Centravimo skiriamosios gebos matavimai sukant dešinį sraigtą
Fig. 2.22. Results of resolution in the measurement of centering turning right sleeve-nut



2.23 pav. Gulsčiavimo matavimo sistemos schema
Fig. 2.23. Levelling measurement system

$$\alpha = \frac{d}{f}$$

$$\alpha = d/(2f) \tag{2.19}$$

$$\alpha = \frac{d}{2f},$$

čia α – kampo dydis; d –poslinkis tarp etalono ir matuojamojo dydžio objekto; f – fokusavimo ilgis (autokolimatoriaus).

Gulsčiavimo matavimai buvo atlikti reguliuojant (mažuosius) sraigtus, kurie yra skirtingose, statmenose ašyse. Sukant sraigtus, kūginis antgalis stumia

staliuko vidinį žiedą vertikalia padėtimi. Kampo α parodymus užfiksavome autokolimatoriumi. Gauti kampo α rodmenys šimtosios sekundės tikslumu sukant kairįjį sraigtą pateikti 2.6 lentelėje ir sukant dešinį sraigtą 2.7 lentelėje. Žinant atstumą (54 mm) iki veidrodėlio, apskaičiavome poslinkius linijiniais matavimo vienetais. Standartinis nuokrypis – 0,45 µm (sukant kairįjį žiedą) ir 0,29 µm (sukant dešinį žiedą), vidurkiai – 1,5 µm ir 1,28 µm.

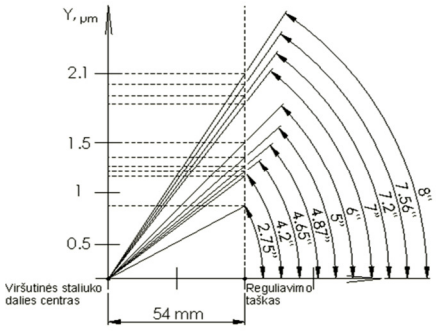
2.6 lentelė. Gulsčiavimo eigos tikrinimas sukant kairįjį žiedą (skiriamoji geba)
Table 2.6. Resolution of levelling (turning the left ring (x, y axes) of the table)

Matavimų kiekis	Objekto posvyrio kampas	a, µm	b, mm	S,	$\overline{x}$,
1.	tan 0,00076	0,7	54	0,45 µm	1,5 µm
2.	tan 0,00117	1,1			
3.	tan 0,00129	1,2			
4.	tan 0,00135	1,3			
5.	tan 0,00138	1,3			
6.	tan 0,00170	1,6			
7.	tan 0,00194	1,8			
8.	tan 0,00210	1,9			
9.	tan 0,00216	2,0			
10.	tan 0,00220	2,1			

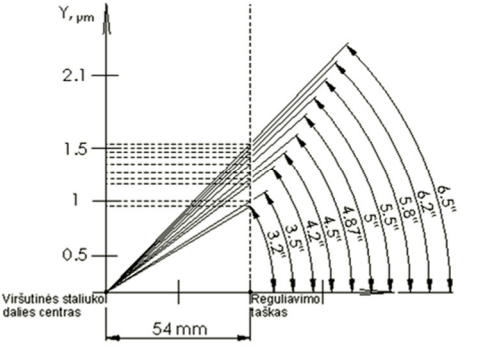
2.7 lentelė. Gulsčiavimo eigos tikrinimas sukant dešinį žiedą (skiriamoji geba)
Table 2.7. Resolution of levelling (turning the right ring (x, y axes) of the table)

Matavimų kiekis	Objekto posvyrio kampas	a, µm	b, mm	S,	$\overline{x}$,
1.	tan 0,00088	0,8	54	0,29 µm	1,28 µm
2.	tan 0,00097	0,9			
3.	tan 0,00116	1,1			
4.	tan 0,00125	1,2			
5.	tan 0,00135	1,3			
6.	tan 0,00138	1,3			
7.	tan 0,00153	1,4			
8.	tan 0,00161	1,5			
9.	tan 0,00172	1,6			
10.	tan 0,00180	1,7			

Dėl kai kurių mazgų modernizavimo ar tam tikrų įtempimų sumažinimų rezultatus galima būtų gerinti. Matavimo rodikliai parodo jog matuojamąjį objektą galima gulsčiuoti – 1 μm tikslumu**.** 2.24 ir 2.25 paveiksluose pateikti grafikai, kuriuose α kampai *SolidWorks* programoje pateikti mastelyje 1:1. Taip gauti kiekvieno matavimo pakėlimo aukščiai – poslinkiai. Šio matavimo teoriniai rezultatai sutampa su eksperimentiniais rezultatais.



2.24 pav. Sukant kairįjį sraigtą-poslinkiai
Fig. 2.24. Turning the left ring-displacement



2.25 pav. Sukant dešinį sraigtą-poslinkiai
Fig. 2.25. Turning the right ring-displacement

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Sudarytas kampo matavimo sistemos modelis leidžiantis analizuoti charakteringus kampo matavimo sistemai virpesius.

2. Tiriant kampo matavimo sistemos centravimo-gulsčiavimo staliuko virpesius nustatyta, kad dažniai 312 Hz, 423 Hz ir 570 Hz (1, 2 ir 3 modų) tiesiogiai įtakotų (sumažintų matavimo tikslumą) matavimo rezultatus.

3. Suprojektuotas bei pagamintas centravimo-gulsčiavimo staliukas, skirtas CD skalėms pozicionuoti naujai sukurtoje optinėje matavimo sistemoje. Centravimo-gulsčiavimo staliuko atlikta matavimų analizė mikroskopu *NIKON MM-400* ir autokolimatoriumi: centravimo skiriamoji geba neviršija 3 μm, gulsčiavimas pasižymi 1 μm tikslumu. Staliukas įregistruotas Lietuvos patentų biure.

3

Naujo optinio padalų žymėjimo brūkšnio padėties įvertinimo proceso tyrimas

Skyriuje pateikiamas vaizdo gavimo matematinis modelis. Įvertinami vaizdo gavimo sistemos fiziniai, dėl judesio ir kiti paklaidų šaltiniai. Gauti nauji, originalūs duomenys brūkšnio padėties paklaidos įvertinimo dinaminiu kalibravimu. Skyriaus tematika paskelbtas vienas straipsnis (Sabaitis *et al*. 2013).

Jau apie dešimtmetį linijinės ir apskritiminės skalės gaminamos kieto kūno lazeriais. Nanosekundiniai ar pikosekundiniai nedidelės ir vidutinės galios lazeriai geba absorbuoti ploną chromo dangos plėvelę ir tokiu būdu skalėje sukurti rastrinį ar kodinį brūkšnių piešinį (Brikas *et al.* 2007). Tokiam piešinio formavimui reikia ne tik sudėtingų programuojamų elektronikos įrenginių, bet ir optinių elementų sistemos. Optinė sistema leidžia vienu metu formuoti kelias skalės linijas iš karto, todėl visame skalės takelio ilgyje neatsiranda fazinis poslinkis tarp suformuotų brūkšnių linijų.

Naujų apskritiminių skalių gamybai buvo pasirinkta CO_2 *LA-7050* ir *Nd:YAG 50DP* skirtingų tipai lazeriai (3.1 lentelė). Jie yra pritaikyti įvairiomis medžiagoms graviruoti. Šie lazeriai yra skirtingi savo charakteristikomis. Lazerio Nd: YAG aktyvioji terpė yra skaidrus kristalas, kurį auginant įterpiama

lazerio šviesą stiprinančių aktyviųjų atomų. Pastarieji sąveikauja su kristalo atomais, todėl atsiranda galimybė generuoti bei stiprinti bangos ilgio šviesą. CO_2 molekulių lazeryje šviesą stiprinančioji terpė yra dujos. Nuo aktyviosios terpės priklauso lazerio spinduliavimo galia ir kartu spinduliuotės srautas (Trelles *et al*. 2011). Dujiniai lazeriai taip pat pasižymi didelio tūrio aktyviąja terpe, kuri sąlyginai nebrangi, o jos pažeisti beveik neįmanoma.

3.1 lentelė. Lazerių techninės charakteristikos
Table 3.1. The technical characteristics of lasers

Lazeris	CO_2 LA-7050	Nd:YAG 50DP
Maksimalus galingumas	60 W (reguliuojamas nuo 0 iki 60 W)	50 W
Maksimalus graviravimo greitis	1000 mm/s	7000 mm/s
Lazerio bangos ilgis	1064nm	106.4nm
Pakartojimo tikslumas	0,1 mm	0,02 mm
Minimalus linijos storis	0,05 mm	0,015 mm
Padėties nustatymo tikslumas	0,025 mm	0,0025 mm
Įrangos gabaritai i X p X a (mm)	950×800×1050 mm	1240×530×1370
Naudojami formatai:	PLT, BMP, DWG, AI, CDR, DXF, DST	PLT, BMP, DWG, AI, CDR, DXF, DST

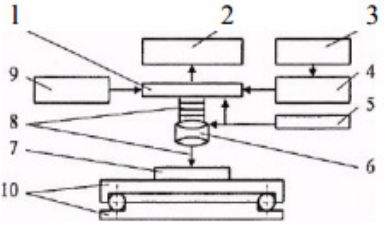
3.1. CD disko skalių (padalų) žymėjimas naudojant CO_2 LA-7050 ir Nd:YAG 50DP tipų lazerius

Naujam lazeriniam įrašymui arba žymėjimui ant CD disko pagrindo pateikiami dviejų tipų lazeriai:

- CO_2:LA60-7050 – dujinis lazeris;
- Nd:YAG 50DP – kieto kūno lazeris.

Dujinis lazeris (CO_2) – lazeris, kurio aktyvioji terpė, kurioje vyksta šviesos generavimas, yra tam tikros dujos. Dujų molekulės sužadinamos, t. y. perkeliamos į aukštesnės energijos būseną, elektros srovės pagalba. Technologinio dujų lazerio veikimo principas pagrįstas atomų inversija elektros srovei tekant dujomis. Tolydinės veikos technologiniuose lazeriuose aktyvioji dujų terpė sužadinama stacionaria aukštosios įtampos iškrova. Impulsinės veikos dujų lazeriuose naudojama impulsinė aukštosios įtampos iškrova. Lazerinio

veikimo principas parodytas (3.1 pav.). Technologiniame dujų lazeryje vamzdžių sistemoje l dujos išretinamos vakuuminiu siurbliu 9. Vakuumo vamzdžių sistema prisipildo dujų mišiniu, kuris susidaro darbinėms dujoms iš dujų mišinio rezervuaro 3 patekus į dujų tiekimo bloką 4. Maitinimo blokas 2 dujų mišinio pripildytuose vamzdžiuose sudaro aukštosios įtampos iškrovą, kuri dujose sukelia atomų inversiją. Susidaranti fotonų griūtis sužadina naujus fotonus kiekviename vamzdyje. Sustiprintas išspinduliuotas elektromagnetinis srautas vamzdžių sistemoje patenka į optinę fokusavimo sistemą 6 ir yra nukreipiamas į apdorojamą detalę 7. Kadangi vykstant elektros iškrovai dujose vamzdžiai įkaista, jie ir optinės fokusavimo sistemos yra aušinami cirkuliuojančiu skysčiu 5, pvz., vandeniu.



3.1 pav. CO_2 dujų technologinio lazerio struktūrinė schema: l – vamzdžių sistema; 2 – maitinimo šaltinis; 3 – dujų mišinio rezervuaras; 4 – dujų mišinio tiekimo sistema; 5 – aušinimo sistema; 6 – optinė fokusavimo sistema; 7 – apdirbamoji detalė; 8 – spindulių srautas; 9 – vakuuminis siurblys; 10 – technologinis stalas

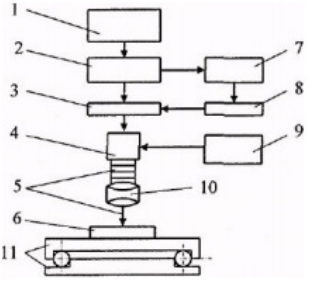
Fig. 3.1. CO_2 laser: 1 – pipe system; 2 – power supply; 3 – gas mixture reservoir; 4 – gas mixture supply system; 5 – cooling system; 6 – optical focusing system; 7 – manufacturing part; 8 – beam flux; 9 – vacuum pump; 10 – technological table

Didžiausią spindulių srauto galią galima pasiekti lazeriuose, kur dujų aktyvaus darbinio mišinio. CO_2-He-N_2 srautas prateka dideliu greičiu (50-200 m/s) specialioje elektros iškrovos kameroje. Joje statmenai dujų tekėjimo krypčiai leidžiama aukštosios įtampos elektros srovė. Įvykus išlydžiui susidaro intensyvus elektromagnetinis srautas, kuris, sustiprintas optinio rezonatoriaus, patenka į optinę fokusavimo sistemą. Impulsinių CO_2 dujų technologinių lazerių išspinduliuojamo impulso energija siekia 10-1000 J, impulso trukmė gali būti nuo 100 nanosekundžių iki vienos mikrosekundės.

Kietojo kūno lazeris (YAG) – lazeris, kurio aktyvioji terpė yra kietasis kūnas. Spinduliuoja nuo 170 nm iki 7,2 μm bangos ilgio šviesą. Puslaidininkiniai lazeriai kartais taip pat priskiriami kietojo kūno lazeriams, tačiau dėl skirtingo užpildos apgrąžos sudarymo mechanizmo (leidžiant elektros srovę, kai tuo tarpu kietojo kūno lazeriuose kaupinimas – optinis) laikomi atskira lazerių rūšimi. Kietojo kūno lazeriuose aktyvią terpę sudaro dielektrinės kristalinės arba amorfinės medžiagos, papildytos pereinamųjų metalų (Ti3+,

Co3+) arba retųjų žemės elementų (lantanoidų Nd3+, Er3+, Ho3+, Yb3+ ar aktinoidų) priemaišiniais jonais, kurių energijos lygmenų sistema panaudojama užpildos apgrąžai gauti. Pvz., rubino lazeryje aktyvioji medžiaga susidaro iš chromo jonų, pasiskirsčiusių aliuminio oksido Al_2O_3 kristale.

Technologiniai kietojo kūno lazeriai. Jų veikimas pagrįstas tuo, kad kaupinimo lempa sužadina aktyviąją terpę. Pvz., stiklo strype esančios sužadintos neodimio priemaišos išspinduliuoja tam tikro intensyvumo elektromagnetinių bangų srautą, o kai jis patenka į optinį generatorių, sudaromas sužadinto spindulių srauto stiprinimo efektas (Yang *et al*. 2011).



3.2 pav. Kietojo kūno lazerio struktūrinė schema: l – maitinimo šaltinis; 2 – kondensatoriai; 3 – impulsinė kaitinimo lempa; 4 – aktyvusis elementas; 5 – spindulių srautas; 6 – apdirbamoji detalė; 7 – įtampos valdymo sistema; 8 – uždegimo sistema; 9 – aušinimo sistema; 10 – optinė fokusavimo sistema; 11 – technologinis stalas

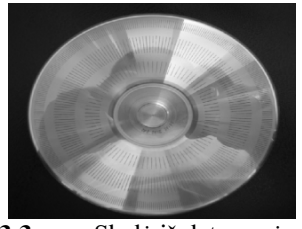
Fig. 3.2. Nd:YAG laser: l – power supply; 2 – capacitors; 3 – impulse incandescent lamp; 4 – the active principle; 5 – beam flux; 6 – manufacturing detail; 7 – voltage control system; 8 – the ignition system; 9 – coolant system; 10 – optical focusing system; 11 – technological table

Technologiniai impulsiniai kietojo kūno lazeriai (3.2 pav.). Šių lazerių aktyviajai terpei sužadinti naudojama impulsinė kaupinimo lempa 3. Ją maitina kondensatoriai 2, kurie įkraunami iš maitinimo bloko 1. Kondensatorių įtampą valdo įtampos valdymo blokas 7, be to, valdantis ir bloką 8 kaupinimo lempai uždegti. Sužadinta aktyvioji terpė 4 (pvz., neodimio strypo stiklas) išspinduliuoja išilgai optinės kristalo ašies fotonų srautą, kuris su optine fokusavimo sistema 10 veikia apdirbamą detalę 6. Kaupinimo lempa ir aktyvioji terpė aušinamos per aušinimo sistemą 9.

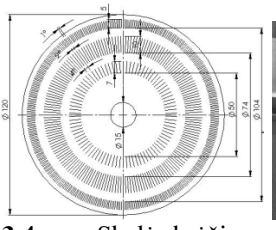
3.2 lentelė. CO_2 ir Nd:YAG lazerių charakteristikos
Table 3.2. Characteristics of different (CO_2 and Nd:YAG) lasers

YAG Lazerio privalumai	Graviruoja metalą
	Greitesnė negu CO_2 lazerinė sistema
YAG Lazerio trūkumai	Nustatymo laikas meno kūriniams (iliustracijoms) gali būti labai ilgas ypač graviruodamas grafiką; Nelabai gerai dirba ant tokių medžiagų (medis, akrilas, ir t. t.); Didelės eksploatacijos išlaidos.
CO_2 Laser privalumai	Dirba gerai su akrilu, medžiu ir daugeliu kitų medžiagų; Gali pažymėti nerūdijantį plieną (su LMM) ir kitų dažytų metalų; Paprasta ir greita suderinti programas atskiroms detalėms.
CO_2 Lazerio trūkumai	Ne toks greitas kaip YAG (bet gali graviruoti iki 120 colių per sekundę); Negraviruoja metalo, bet gali pažymėti kai kuriuos metalus.

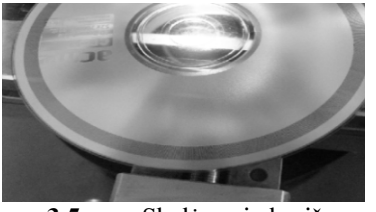
Eksperimentiniam darbui atlikti pagal brėžinį (3.4 pav.), buvo pagamintos skirtingos skalės (3.3 ir 3.5 pav.) skirtingose CD disko įrašo zonos vietose. Skalių brūkšnių padėties matavimai apibūdina skalės brūkšnių vietą ir jos paklaidas visame jos apskritime, todėl gamybos metu yra ypač svarbu sukurti pakankamai geras sąlygas norint eliminuoti atsitiktines ar kiek įmanoma sumažinti sistemingąsias paklaidas.



3.3 pav. Skalė iš data pusės



3.4 pav. Skalės brėžinys



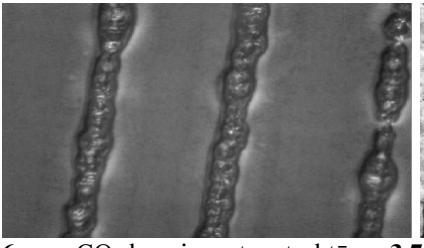
3.5 pav. Skalės vaizdas iš lipduko pusės

Fig. 3.3. Scale from the data side **Fig. 3.4.** Drawing of scale **Fig. 3.5.** Scale from the label side

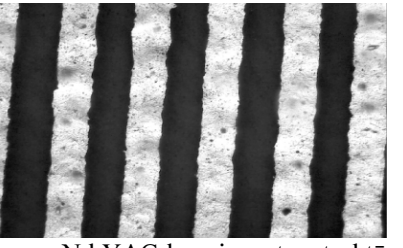
Skalė, takelyje turinti 1440 rastrų (15' kampas tarp jų) apskritime, buvo pagaminta dviejų tipų lazeriais. Fotogrametrijos laboratorijoje, mikroskopu *NIKON MM-400* pamatavome tam tikrus segmentus skirtingose takelio pozicijose. Padalų struktūra, simetriškumas, jų kokybė pavaizduoti (3.6 ir 3.7 pav.). Skalės brūkšniai išpjauti CO_2 lazeriu akivaizdžiai yra netiesūs, nevientisi, neišlaiko simetriškumo formos. (3.7 pav.) gautas rezultatas naudojant kieto kūno YAG lazerį. Šioje skalėje rastrai išlaiko reikalingą stačiakampio formą, vientisumą. Sprendžiant iš šių vaizdų, galima teigti jog kietojo kūno

lazeris yra pranašesnis gaminant rastrus ant CD disko pagrindo, kadangi tankesniam brūkšnių išdėstymui ir mažam brūkšnių pločiui, keliami ypatingi reikalavimai brūkšnių kraštams. Skenuojant precizinę skalę fotoelektrinėmis matavimo galvutėmis, brūkšnių kraštų parametrai tiesiogiai įtakoja matavimo galvutės signalą.

3.8 paveiksle pavaizduota *Precizika Metrology* kompanijos apskritiminė skalė. Gamybos technologija yra tokia, jog rastrai formuojami ploname chromo sluoksnyje, kuris vakuume yra užgarinamas ant stiklinio pagrindo. Toks procesas garantuoja pakankamą rastro atsparumą mechaniniam ir kenksmingų medžiagų poveikiui eksploatuojant gamybinėmis sąlygomis. Skalių suformuotų padalų minimalus žingsnis gali neviršyti 10 μm, o limbų paklaida – 2 kamp.sek.(Ø 200 mm).

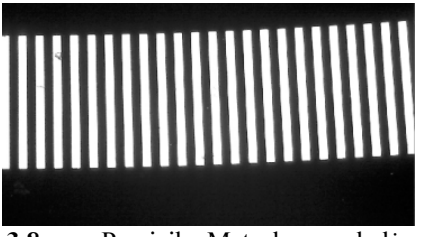


3.6 pav. CO_2 lazerio rastrų struktūra



3.7 pav. Nd:YAG lazerio rastrų struktūra

Fig. 3.6. Raster structure after CO_2 laser **Fig. 3.7.** Raster structure after Nd:YAG laser

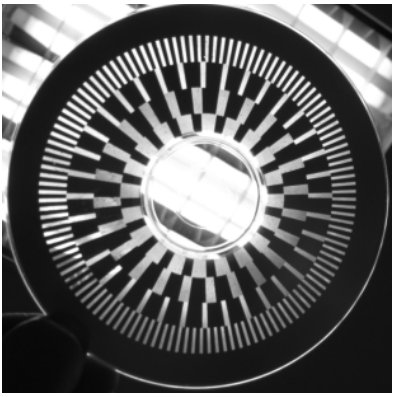


3.8 pav. Precizika Metrology – skalė

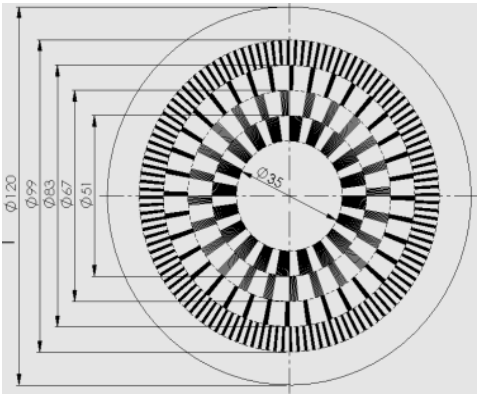
Fig. 3.8. Scale made by Precizika Metrology

Nd:YAG ir CO_2 lazeriai pasižymi skirtingais spindulių bangos ilgiais. YAG lazerio bangos ilgis (1,064 μm) yra dešimt kartų mažesnis už CO_2 (10,64 μm). bangos ilgį. Todėl šis lazeris idealiai tinkamas absorbcijai didžiojoje dalyje metalų, bet ne daugelyje kitų medžiagų (mediena, akriliniai dažai, plastikai, audiniai, ir taip toliau). CO_2 lazerio spindulys gali lengvai būti sugertas daugelio organinių medžiagų tokių kaip mediena, akriliniai dažai, kaučiukas, ir taip toliau. Yra daug skirtumų tarp šių dviejų lazerių: šiluminis efektyvumas, šilumos

perdavimas, minimali ir maksimali atiduodamoji galia, ir taip toliau. Būtent šios savybės ir įtakoja lazerio gebėjimą absorbuoti skirtingas medžiagas.



3.9 pav. Kodinė skalė
Fig. 3.9. Code scale



3.10 pav. Kodinės skalės brėžinys
Fig. 3.10. Drawing of code scale

Rastrinių skalių paklaidos priklauso ne tik nuo nuskaitymo sistemos, bet ir nuo jų gamybos technologijos įnešamų paklaidų. Gamybos technologijai ekonomiškai racionaliausias ir užtikrinantis pakankamą skaičiavimo patikimumą taikomas tikimybinis suminės paklaidos skaičiavimo metodas. Suminė paklaida $\Delta\Sigma$ skaičiuojama pagal formulę

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{j=i}^{k} \Delta_j \xi \pm t \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 \xi_i^2} \ , \tag{3.1}$$

čia Δ_j – j-toji sistemingoji suminės paklaidos komponentė (sandas); j = 1, 2, …, k; ξ_j – j-tosios sistemingosios paklaidos įtakos koeficientas; t – daugiklis, įvertinantis pasikliovimo intervalą; σ_i – i-tosios paklaidos atsitiktinės komponentės vidutinis kvadratinis nuokrypis; ζ_i – i-tosios paklaidos atsitiktinės komponentės įtakos koeficientas (Merino 2007).

Ši metodika yra universali skalių tikslumo analizei ir taikoma įvairių skalių formavimo metodų tikslumui įvertinti.

Brūkšnio detektavimui (briaunos radimui) kampų kalibravimo sistemose naudojamos techninės regos sistemos, kurių pagrindą sudaro preciziniai šviesos mikroskopai. Yra didelė šių mikroskopų įvairovė (tamsaus lauko, konfokaliniai, skenuojantys, stovinčios bangos, fluorescenciniai mikroskopai ir kt.). Matuojamos skalėms brūkšnių padėtims nustatyti panaudojome fotoelektrinį mikroskopą su CCD jutikliais. Naudojamo mikroskopo tipas apsprendžia kokie bus matavimo signalo apdorojimo algoritmas, kalibravimo tikslumas ir sparta. Brūkšnio detektavimo optinės sistemos efektyvumas priklauso nuo: apšvietimo

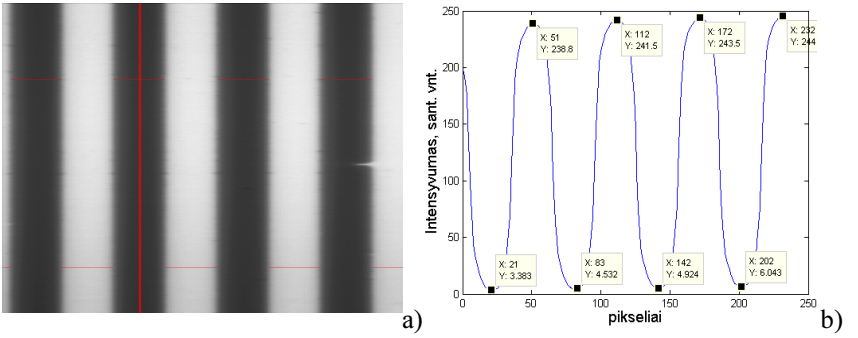
būdo, vaizdo jutiklio, optinės perdavimo funkcijos, vaizdo defokusavimo, vaizdo duomenų apdorojimo algoritmo. Šis mikroskopas leidžia tiksliai nustatyti linijos (briaunos) padėtį, naudojant nesudėtingus matavimo signalų apdorojimo algoritmus. Padidintą linijos vaizdą skenuoja slenkantis ar virpantis plyšys. Matavimo signalui nuskaityti paprastai naudojami fotodaugintuvai. Linijos detektavimo (kartojimosi) paklaida yra 3–60 nm. Ji priklauso nuo naudojamos detektavimo schemos ir mikroskopo konstrukcijos (Flügge and Köning 2002).

3.2. Brūkšnio detektavimo algoritmas

Vaizdo detektavimui iš kameros naudojamos funkcijos, kurios iškviečiamos pagal nustatytą eiliškumą. Vaizdo perkėlimui, programoje priskiriama nuskaityta informacija sukurtam objektui, išsaugomas objektas kaip byla, atlaisvinama tarpinė atmintis, ištrinamas objektas.

Matuojant brūkšnio plotį dažniausiai naudojamas tradicinis algoritmas su signalo „nupjovimu“ pasirinktame lygyje. Prieš kalibravimą sukant kamerą apie optinę ašį, stengiamasi gauti brūkšnio vaizdą, kurio kraštų linijos yra beveik lygiagrečios kameros jutiklio fotoelementų stulpeliui ar eilutei. Gaunamas mažai pasuktas brūkšnio dvimatis vaizdas, kuris tinkamas apdoroti pagal šį algoritmą.

Naudojant algoritmą su ribiniu lygiu reikia iš išsaugoto trimačio paveikslo gauti dvimatę funkciją, kuri apibrėžtų jo suvidurkinto intensyvumo brūkšnio profilį. Jei tiriamas vertikalus brūkšnys, tai sumuojamos išsaugotos matricos reikšmes kiekviename iš stulpelių ir padalinus iš eilučių skaičiaus, gaunama suvidurkinta intensyvumo kreivė, kuri vadinama brūkšnio profiliu. Brūkšnių nuotrauka ir apskaičiuotas profilis parodytas 3.11 paveiksle. Šiam brūkšnio profiliui reikia rasti ribinį lygį.



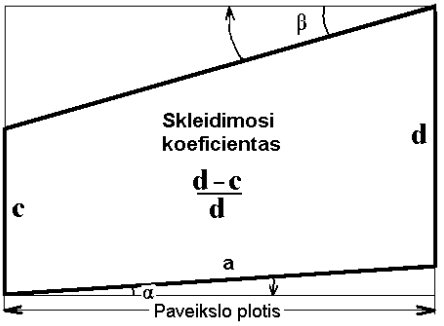
3.11 pav. Apskritiminės skalės fragmento nuotrauka: a) su detektuoto brūkšnio vidurio linija; b) bei brūkšnių profilio kreivė su pūpsnių reikšmėmis

Fig. 3.11 Circular scale image: a) of the detected line middle position; b) and the profile curve with peak values

Ribinis lygis gali būti nustatomas kaip pastovus lygis arba remiantis gauto brūkšnių profilio reikšmių intervalo pločiu. Dažnai nustatant ribinį lygį naudojami mažiausios ir didžiausios reikšmės kriterijai. Esant nelabai tolygiai profilio linijai, naudojami vidutinės mažiausios ir vidutinės didžiausios reikšmių kriterijai. Dažnai profilio linijos viršūnių taškai turi didėjančias arba mažėjančias reikšmes X ašies atžvilgiu, vadinamas pūpsniais. Nagrinėjant rastrines skales dažnai naudojamas ne visas kameros matymo laukas, o tik jo dalis pločio, kurioje telpa keturi-penki brūkšniai, tai yra apie 240–360 pikselių esant 20 μm rastro žingsniui, kaip parodyta 3.11 a paveiksle.

Profilio linijos viršūnių taškų reikšmės turi didėja dėl skalės paviršiaus nestatmenumo mikroskopo optinei ašiai. Todėl randami pūpsnių viršūnių taškų reikšmės ir jos aproksimuojamos tiese. Šie taškai yra parodyti 3.11 b paveiksle, kur X koordinatėje atidėtos nufotografuoto paveikslo koordinatės kameros pikseliais, o Y paveikslo pikselių intensyvumo suvidurkintų stulpelių reikšmės.

Transformuoju profilio kreivę taip, kad išlyginti intensyvumą pagal apatinių pūpsnių aproksimuojančią tiesę a, dauginant iš paskaičiuotos kilimo kampo α ir įvertinant esamos reikšmės dydį skleidimosi koeficientu. Profilio kreivės transformavimo schema pateikta 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Paveikslo intensyvumo profilio transformavimo schema
Fig. 3.12. Transformation scheme of image intensity profile

Iš viršūnes aproksimuojančių tiesių apskaičiuojamas normavimo koeficientas, skleidimosi koeficientas ir gauto vaizdo sandauga, išreiškiama formule:

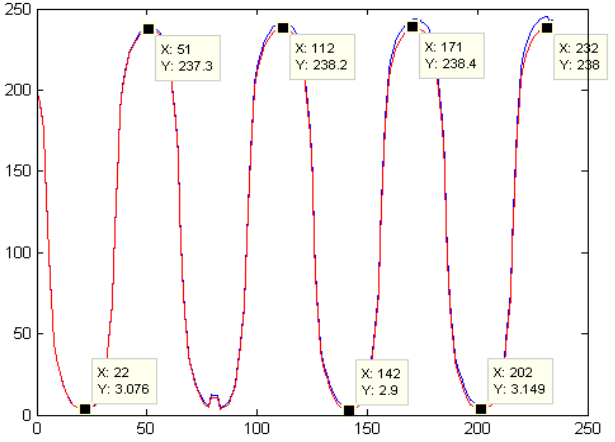
$$A_{p\,\mathrm{Pr}\,oIe}\left(i_{pro}\right)=\mathrm{Pr}\,oIe\left(i_{pro}\right)-bi_{pro}-\frac{\left(d-c\right)}{d}\mathrm{Pr}\,oIe\left(i_{pro}\right)i_{pro}, \qquad (3.1)$$

čia $A_{pProIe}(i_{pro})$ yra išlyginto paveikslo intensyvumo profilio i-toji reikšmė, $ProIe(i_{pro})$ neišlyginto profilio intensyvumo i-toji reikšmė, b – normavimo koeficientas, $(d\text{-}c)/d$ – skleidimosi koeficientas.

Išlyginus 3.12 paveikslo intensyvumo profilio kreivę, gautas 3.13 paveikslas yra paruoštas brūkšnio krašto radimui.

Šiame darbe panaudotas R. Lazdino sukurtas brūkšnio krašto radimo metodas orientuotas pirmiausia į skalės kalibravimo tikslumą ir greitaveiką. Brūkšninių matų matavimuose dažnai naudojama brūkšnių profilio kreivė ir iš jos yra randamas vienas kontūro taškas, kuris yra vidutinė kontūro reikšmė, todėl jai apibūdinti toliau naudosime sąvoką brūkšnio kraštas.

Kalibruojant skales dinaminiu metodu nuotraukų kokybė yra blogesnė nei statiniu metodu. Nuotraukose yra prarandama dalis informacijos, nes objektas nėra židinio plokštumoje, dėl judesio, trumpos ekspozicijos, stipraus apšvietimo ir kitų veiksnių. Brūkšnio kontūro zonoje intensyvumas kinta palaipsniui. Todėl brūkšnių profilio kreivė yra gaunama ne beveik stačiakampė, kaip turi būti idealiu atveju, o beveik sinusinės funkcijos formos. Tą gali sąlygoti, be išvardintų aukščiau priežasčių, brūkšnio krašto defektai, brūkšnio formos nuokrypiai bei brūkšnio pasvirimas (Bručas *et al*. 2010).



3.13 pav. Paveikslo intensyvumo profilis prieš išlyginimą ir po išlyginimo
Fig. 3.13. Image intensity profile before transformation and after

Rastrinių skalių brūkšnių padėtis galime analizuoti kaip periodinės seką. Periodinė stačiakampių impulsų seka matematiškai aprašoma formule:

$$f(x)=\begin{cases}-1, & kai \quad -\pi \le x \le 0\\ 1, & kai \quad 0 \le x \le \pi\end{cases}. \tag{3.2}$$

Matematinėje analizėje dažniau naudojama Furjė eilute paskleista išraiška:

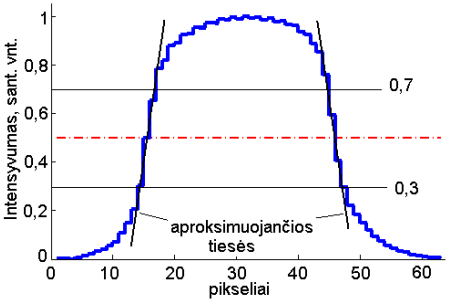
$$x_{square}(t) = \frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{sin\left((2k-1)2\pi ft\right)}{(2-1)}. \qquad (3.3)$$

Tačiau realūs signalai yra beveik sinuso funkcijos formos, todėl galime skleisti Furjė eilute

$$f(x) = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n\, cos(x) + b_n\, sin(nx)\right] = 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{n}sin(nx). \qquad (3.4)$$

Skaičiavimuose apsiribojama keliais pirmaisiais Furjė eilutės nariais. Furjė eilute galima įvertinti iš karto kelių brūkšnių pozicijas iš rastrinės skalės, tai sumažina kalibruojamos skalės reikšmių išsibarstymą, tačiau ir suvidurkina dominančio brūkšnio poziciją kitų brūkšnių atžvilgiu. Todėl tokia analizė labiau tinka tik rastrinėms skalėms, kai yra nagrinėjama rastrinė sąveika.

Išlyginus pagal 3.1 formulę ir sunormavus paveikslo intensyvumo profilio reikšmes gauta varpo formos kreivė. Jos reikšmės kinta nuo nulio iki vieneto. Tada komparavimo linija bus 0,5 santykinio intensyvumo lygyje, kaip parodyta 3.14 paveiksle. Toks algoritmas taikomas daugelyje tirtų komparatorių. Varpo formos kraštai nupjaunami 30–70 % lygyje ir į tą intervalą patenkančios reikšmės aproksimuojamos tiesėmis. Šių tiesių ir susikirtimo su komparavimo linija taškai yra laikomi brūkšnio kraštais (Družovec *et al.* 2009).

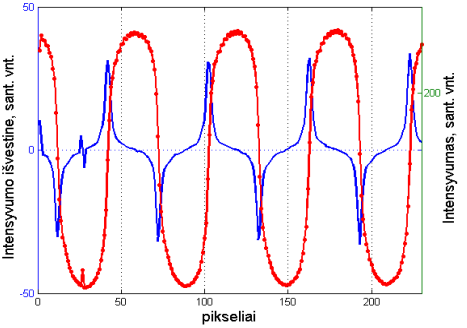


3.14 pav. Brūkšnio profilio reikšmių grafikas ir vidurio komparavimo linija
Fig. 3.14. Graph of line profile values and comparing treshold

Brūkšnio krašto uždavinys yra sprendžiamas keliais etapais. Pirmas etapas, tai „grubus“ brūkšnio krašto radimas iš profilio kreivės. Randamas pikselių stulpelis, po kurio keičiasi profilio kreivės augimo ar mažėjimo greičių kryptis. Tam naudojami kontūrų išskyrimo būdai: gradiento ir antrosios išvestinės.

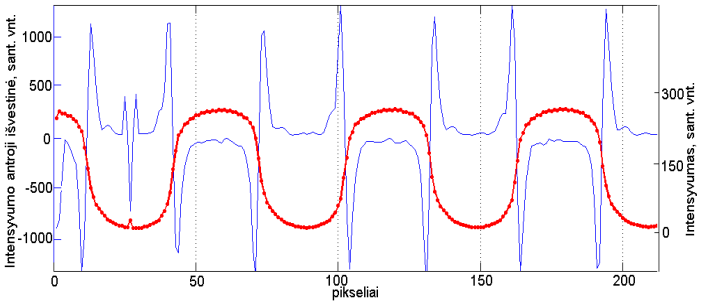
Gradiento būdas remiasi pirmąją profilio funkcijos išvestine (3.15 pav.). Kai brūkšnio vaizdas yra ryškus, tai išvestinės funkcijos viršūnės reikšmė didelė. Kai vaizdas sufokusuotas ir yra mažas signalo triukšmo santykis, tai gradiento

viršūnės išplaukusios ir viršūnėje gali būti keli ekstremumai. Tai sumažina krašto radimo tikslumą.



3.15 pav. Brūkšnio profilio reikšmės ir profilio funkcijos išvestinė
Fig. 3.15. Graph of line profile values and derivate of profile

Antroji išvestinė keičia ženklą tame taške, kur yra didžiausias gradientas. Tačiau jos trūkumas, kad du kartus diferencijuojant, o diferencijavimas jautrus triukšmams, gaunami blogi rezultatai esant dideliam triukšmui. Paveiksle yra netolygumas, profilio linijoje yra ties 30 pikselio eilute. Jis ryškiai yra matomas 3.16 paveiksle antrosios išvestinės linijoje. Jei paveikslas yra triukšmingas, o taip būna su brūkšniniais matais arba kaip matavimui iškerpamas nedidelis paveikslo fragmentas, antroji išvestinė gali pateikti klaidingą rezultatą. Prieš diferencijuojant, galima papildomai filtruoti paveikslą, tačiau tai gali sumažinti tikslumą.



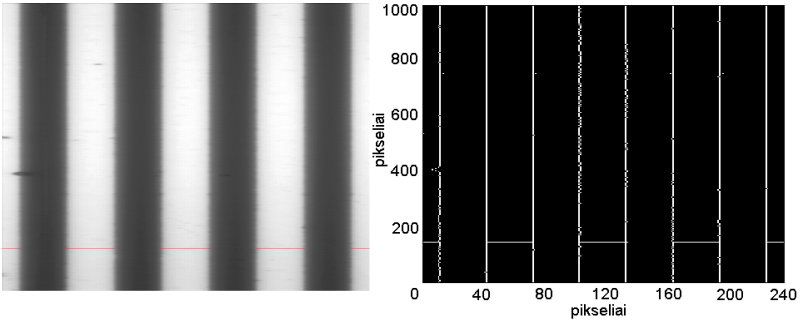
3.16 pav. Brūkšnio profilio reikšmės ir profilio funkcijos antroji išvestinė
Fig. 3.16. Graph of line profile values and second derivate of profile

Tiriamo brūkšnio kontūrų metodo pirmo etapo tikslas yra nustatyti brūkšnio kraštus paveiksle vieno pikselio tikslumu. Kontūrų radimui yra naudojami skaitmeniniai filtrai, paremti gradiento (Canny, Roberts, Prewitt) arba antrosios

išvestinės (Zerocross, LoG, Marr-Hildreth) metodais (Allebach 2000). Šiuos skaitmeninius filtrus įmanoma naudoti tik suglotninus tiriamo vaizdo reikšmes Wiener filtru (Stauton 1998). 3.17 pav., b gaunamas rastro vaizdą apdorojus Wiener ir Canny filtrais.

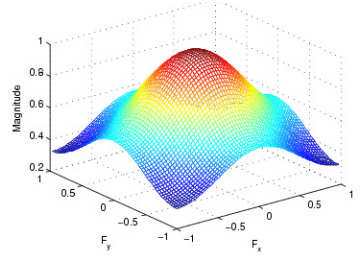
Šie skaitmeniniai filtrai pagrįsti matematine operacija – sąsūka. Sąsūkos branduoliu būna dvimatės Gauso funkcijos fragmentas, diskretizuotas filtro dydžiui (3.18 pav.). Jo reikšmės būna sveikieji skaičiai. Brūkšnio profilio kreivei sąsūką galima taikyti iškarto, tačiau tada bus neįmanoma įvertinti defektų, esančių brūkšnio kontūro zonoje.

Matavimo technikoje, kurioje įrengti mikroskopai su fotojautriais elementais, naudojamas brūkšnio profilio aproksimavimas funkcijomis ir jų krašto reikšmės radimas ribiniame lygyje. Yra įvairių metodų nustatyti ribinį lygį ir pasirinkti tinkamas aproksimavimo funkcijas. Tai priklauso nuo techninio matavimo įtaiso išpildymo, kaip gaunama informacija apie brūkšnį ir panašiai. Kartais aproksimuojama tik dalis brūkšnio profilio šlaito, nustatant atskirus ribinius lygius kiekvienam brūkšnio kraštui (Gonzalez *et al.* 2003).



a) b)

3.17 pav. a) Rastro nuotrauka, b) brūkšnio kontūrai filtruojant Canny filtru
Fig. 3.17. a) Raster image, b) line edges extraction using Canny filtering



1	4	7	4	1
4	16	26	16	4
7	26	41	26	7
4	16	26	16	4
1	4	7	4	1

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -4 & -8 & -9 & -8 & -4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -7 & -15 & -22 & -23 & -22 & -15 & -7 & -2 & 0 \\ -1 & -4 & -15 & -24 & -14 & -1 & -14 & -24 & -15 & -4 & -1 \\ -1 & -8 & -22 & -14 & 52 & 103 & 52 & -14 & -22 & -8 & -1 \\ -2 & -9 & -23 & -1 & 103 & 178 & 103 & -1 & -23 & -9 & -2 \\ -1 & -8 & -22 & -14 & 52 & 103 & 52 & -14 & -22 & -8 & -1 \\ -1 & -4 & -15 & -24 & -14 & -1 & -14 & -24 & -15 & -4 & -1 \\ 0 & -2 & -7 & -15 & -22 & -23 & -22 & -15 & -7 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -4 & -8 & -9 & -8 & -4 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

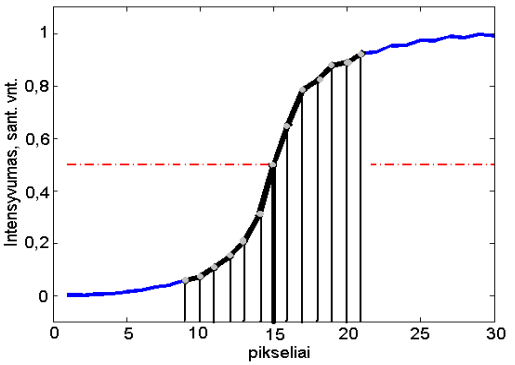
a) b) c)

3.18 pav. a) 3D Gauso funkcija b) 5×5 sąsūkos branduolys c) 11×11 sąsūkos branduolys
Fig. 3.18. a) 3D Gaussian mesh b) 5×5 convoliution kernel c) 11×11 convoliution kernel

3.19 paveiksle pavaizduota brūkšnio krašto profilio kreivė. Nupjaunant kraštus 30–70 % lygyje ir į tą intervalą patenkančias reikšmes aproksimuoja tiesėmis, į skaičiavimus patenka tik 4–5 kreivės taškai. Esant brūkšnio asimetrijai arba defektui, tai sumažina krašto radimo tikslumą.

Darbe naudojamas R. Lazdino sukurtas naujas brūkšnio krašto radimo algoritmas. Po „grubaus“ brūkšnio krašto reikšmės radimo, prieš ir po jos išrenkame dar po šešias profilio kreivės reikšmes ir jas aproksimuojame algebriniu 5 laipsnio polinomu. Toliau ieškome polinomo reikšmės komparavimo lygyje. Šis metodas įvertina tiksliau brūkšnio kraštą, ypač esant brūkšnio asimetrijai arba defektams.

Yra nemažai metodų kaip apskaičiuoti judesio parametrus (greitį ir kryptį), tačiau naudojantis gauta informacija sudėtinga gerai rekonstruoti pirminį vaizdo.Dinaminiame kalibravimo režime skalės nuotraukos fotografuojamos judant kamerai atžvilgiu skalės, todėl susiduriama su vaizdo suliejimo dėl judesio reiškiniu (Cho *et al.* 2010). Taip yra dažniausiai todėl, kad yra per mažai pirminės informacijos kaip vaizdas buvo išsaugotas ir to pasekoje sudarytas vaizdo suliejimo modelis skiriasi nuo realiai buvusių sąlygų fotografuojant. Toks vaizdo suliejimas įtakoja iš paveikslo nustatomo brūkšnio kraštų padėties tikslumą (Ben-Ezra *et al.* 2004).



3.19 pav. Brūkšnio kairiojo krašto profilis ir profilio aproksimavimui naudojamos reikšmės
Fig. 3.19. Line left edge profile and profile values used for approximation

Šiuolaikiniai objektyvai yra sudaryti iš keliolikos įvairių sferinių lęšių, kurie turi savo formos nukrypimus, tai matematiškai aprašyti vaizdo perdavimo iškraipymą per tokią sudėtingą optinę sistemą yra beveik neįmanoma. Todėl dažniausiai objektyvų gamintojai pateikia objektyvo lęšių moduliacijos perdavimo funkciją (MPF). Tai yra objektyvo optinės sistemos perdavimo funkcijos amplitudės perdavimo funkcija, kadangi fazinius pokyčius jutikliai

neužfiksuoja. Bendru atveju vaizdo suliejimą aprašančiose lygtyse naudojama perdavimo funkcijos Furjė transformacija, kitaip vadinama *VTIF* (Moghaddam *et al.* 2007):

$$B = VTIF \otimes I + n, \tag{3.5}$$

čia B – gautas atvaizdas, *VTIF* – vaizdo taško išplitimo funkcija, n – triukšmas.

VTIF galima nagrinėti kaip kelių funkcijų sandauga (Bovik 2005):

$$VTIF = VTIF_{opt} * VTIF_{mot} * VTIF_{det} * VTIF_{el}, \tag{3.6}$$

čia $VTIF_{opt}$ – optinės sistemos *VTIF*, $VTIF_{mot}$ – *VTIF* dėl judesio, $VTIF_{det}$ – detektoriaus *VTIF*, $VTIF_{el}$ – kvantavimo ir filtravimo *VTIF*.

Sudaromas vaizdo formavimo suliejant dėl judesio modelį pagal rekomendacijas literatūroje (Cho *et al* 2010, Levin *et al.* 2008, Moghaddam *et al.* 2007). Pradžioje daroma prielaida, kad judesio greitis v yra realus, teigiamas dydis. Jei kamera nesisuka judėdama, tai gaunama, kad kiekvienas atvaizdo kameroje taškas juda tuo pačiu greičiu. Greitį apskaičiuojamas iš pikselio koordinačių x, y ir laiko t. Jei greitis yra pastovus, jį galima išreikšti dvimačiu judesio vektoriumi $s_{x,y} = [s_x, s_y]$. Optinės sistemos vaizdo išliejimas yra didžiausias, nes jį sudaro daugiausiai komponentės (lęšių aberacijos), iš kurių kintanti ir sunkiausiai randama vaizdo suliejimo komponentė dėl defokusavimo. Vaizdo suliejimas dėl judesio yra suliejimo branduolio ir pirminio paveikslo sąsūka (Favaro and Soatto 2006):

$$B = \phi_{s_{x,y}} \otimes I + n, \tag{3.7}$$

čia I – idealus, kontrastingas paveikslas, $\otimes$ – sasūkos operatorius, $\varphi_{Sx,y}$ – vaizdo taško išplitimo funkcija dėl judesio (kitaip suliejimo branduolys), n – adityvus baltasis Gauso triukšmas.

Šio suliejimo branduolio reikšmės priklauso nuo kameros judesio. Sąsūka matematiškai yra dažninių funkcijų sandauga:

$$\hat{B}(\omega_{x,y}) = \hat{\phi}_{s_{x,y}}(\omega_{x,y})\hat{I}(\omega_{x,y}) + \hat{n}(\omega_{x,y}), \tag{3.8}$$

čia $\omega_{x,y} = [\omega_x \omega_y]$ yra 2D dažninė charakteristika, o ženklas $\otimes$ reiškia Furjė transformaciją. Iš šios formulės matome, kad kai komponentė $\hat{\phi}_{s_{x,y}}(\omega_{x,y})$ yra maža, tai turime blogą signalo triukšmo santykį.

Pagal literatūroje rastas išvadas (Levin *et al.* 2008): bendru atveju vaizdo išliejimo dėl judesio rekonstrukcijos kokybė priklauso nuo išblukinimo branduolio spektro galios $\left\|\hat{\phi}_{s_{x,y}}(\omega_{x,y})\right\|^2$, įvertinant leidžiamą rekonstrukcijos paklaidą arba kitaip tariant rekonstrukcijos kokybė susijusi su suminiu spektru:

$$\left\|\widetilde{\phi}_{s_{x,y}}\left(\omega_{x,y}\right)\right\|^2 = \sum\left\|\hat{\phi}_{s_{x,y}}\left(\omega_{x,y}\right)\right\|^2. \tag{3.9}$$

Rekonstrukcijos uždavinys yra rasti visus judesius, kurie didina galios spektro sumą $\left\|\widetilde{\phi}_{s_{x,y}}\left(\omega_{x,y}\right)\right\|^2$ kiekvienai dažnio dedamajai ($\omega_{x,y}$) ir kiekvienam judesio vektoriui $\|s_{x,y}\|$ mažesniam nei paveikslo dydis.

Vaizdo judesio kameros jutiklyje modeliavimas. Šviesos energijos intensyvumas $L(x, y, t)$ laiku t yra erdvės taške, kurio koordinatės x, y. Įprastos kameros jutiklis integruoja šviesos energijos intensyvumą apibrėžtame laiko intervale T:

$$B(x,y) = \int_{-T/2}^{T/2} L(x,y,t)dt + n. \tag{3.10}$$

Jei kamera juda vaizdo fiksavimo metu tik viena kryptimi, kita kryptimi poslinkis nykstamai mažas, tai

$$B(x,y) = \int_{-T/2}^{T/2} L(x + f(t), y, t)dt + n. \tag{3.11}$$

Integravimo kreivė (linija) tarp pradinio momento paveikslo centro koordinačių (x_o,y_o) ir ekspozicijos pabaigos paveikslo centro koordinačių $(x_o+f_x(t) ,y_o+f_y(t))$. Integravimo kreivę galime išreikšti integravimo branduoliu k:

$$k(x,t) = \delta(x - f_x(t)). \tag{3.12}$$

Kai judesio greitis yra ekspozicijos laiko intervale pastovus, galima supaprastinti formulę, tai yra, gautasis paveikslas būtų pirminio paveikslo ir vaizdo taško išplitimo funkcijos $\phi_{s_{x,y}} \to \phi_{s_x}$ tame intervale sąsūka. Tokiu atveju vaizdo taško išplitimo funkcija ir VTIF ϕ_{s_x} Furjė transformacija $\hat{\phi}_{s_x}$ atitinka integravimo kreivės Furjė transformaciją:

$$\phi_{s_x}(x) = \int_t k(x - s_x t, t)dt, \tag{3.13}$$

$$\hat{\phi}_{s_x}(\omega_x) = k(\omega_x, s_x\omega_x). \tag{3.14}$$

Tiriamos sistemos integravimo kreivės bus kaip pavaizduota 3.20 paveiksle.

Iš aukščiau gautų formulių, akivaizdu, kad greičio s dedamųjų ženklas neįtakoja VTIF Furjė transformacijos rezultato. Kad atlikti Furjė transformaciją, turi galioti šios salygos $s_x\omega_x \le S_{obj}\|\omega_x\|$ ir $\|s_x\| \le S_{obj}$.

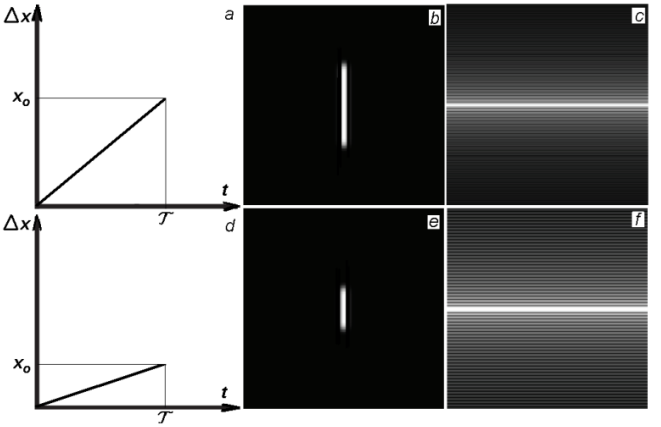
VTIF modeliuojama kaip delta funkcijos postūmis tam tikram laiko intervale

$$\phi_o(x) = \int_t \delta_{f(t)=x} dt \,. \tag{3.14}$$

Kai sistema juda tik viena žinoma kryptimi ir judesio laike greitis s yra pastovus, tai ieškoma vaizdo taško išplitimo funkcija ϕ_s, kuri atstatytų pirminį statinį paveikslą. Tam sukuriamas vaizdo paveikslo atbulinis postūmis, tai yra, nufotografuotas vaizdas pastumiamas priešinga kryptimi

$$f_s(t) = f(t) - st \,. \tag{3.16}$$

Jei kameros ekspozicijos laikas yra ΔT, tai paveikslo taško atvaizdas I gaunamas vidurkinant vaizdo šviesos srautą per laiką ΔT:



3.20 pav. Integravimo kreivė a), d) kai vaizdas tolygiu greičiu juda per laiką τ atstumą x_0 kameros jutiklio atžvilgiu, b), e) projekcijos iš viršaus, kai yra poslinkis, c), f) Furjė transformacijos

Fig. 3.20. Integration line, a), d) for image move at constant speed against camera sensor, b), e) view in image plane, c), f) 2D Fourier transform

$$I(x) = \frac{1}{\Delta T} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} r\left(x + \upsilon(x,t)\right) dt \,. \tag{3.17}$$

Dauguma metodų yra paremti dvimate vaizdo Furjė transformacija. Atvaizdo b formuoja nesulieto paveikslo funkcijos f sąsūka su funkcija h, kuri yra vaizdo *VTIF*. *VTIF* galima išreikšti kaip dviejų stačiakampių langų filtrą:

$$h = u(0) - u(a) = \sum_{k=0}^{a} \delta(k) \,, \tag{3.18}$$

čia *k* yra vaizdo suliejimo parametras, jei linijinis vaizdo suliejimas, tai atitinka vaizdo suliejimo zonos ilgį pikseliais. Tada vaizdą po suliejimo galima aprašyti kaip pirminio vaizdo ir perstumtų delta funkcijų sąsūka:

$$b = h * f = \sum_{k=0}^{a} \delta(k) * f = f(x, y) + \ldots + f(x + a, y) = \sum_{k=0}^{a} f(x + k, y). \qquad (3.19)$$

Skaičiuojant pagal 3.19 formulę, reikia padalinti gautą rezultatą iš koeficiento $c = \frac{1}{a+1}$. Furjė transformacija, pasinaudojant tiesiškumo savybe, bus lygi:

$$F\{b\} = F\left\{\sum_{k=0}^{a} f(x + k, y)\right\} = \sum_{k=0}^{a} F\{f(x + k, y)\} = \sum_{k=0}^{a} e^{-j\frac{2\pi k}{N}} F\{f(x, y)\}. \qquad (3.20)$$

Spektro gaubiamosios ekstremumai bus išdėstyti vienodais intervalais, nes *a* yra natūrinis,

$$L = \frac{2N}{r}, \qquad (3.21)$$

čia *r* atstumas tarp centrinio piko pradžios ir pabaigos, *N* paveikslo dydis.

Todėl, net esant triukšmui, kai kurių ekstremumų išskirti neįmanoma, radus bet kuriuos du gretimus, vis tiek galima apskaičiuoti vaizdo suliejimo dėl judesio poslinkį. Taip galima gauti vaizdo suliejimo dėl judesio poslinkį pikselio diskretiškumu.

Skalės brūkšnio detektavimo tikslumas priklauso nuo apšvietimo būdo, vaizdo jutiklio parametrų, optinės perdavimo funkcijos, vaizdo defokusavimo, duomenų apdorojimo algoritmo. Šių paklaidų dydžiai yra specifiniai ir priklauso nuo konkrečios kampo kalibravimo sistemos konstrukcijos sprendimų.

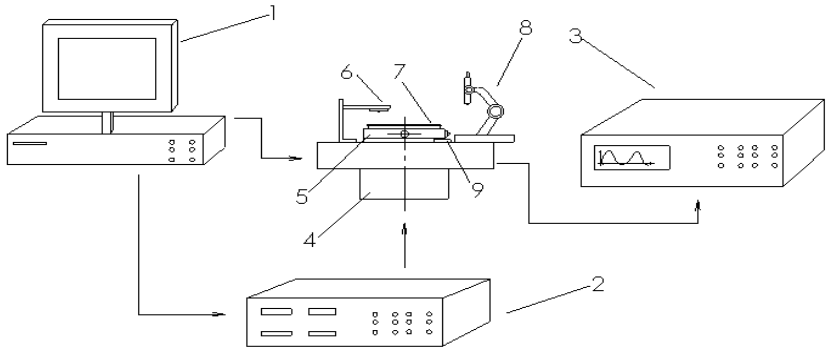
3.3. Optiniai CD skalių rastrų matavimai

Apskritiminių skalių matavimai buvo atlikti Vilniaus Gedimino technikos universitete, Geodezijos instituto laboratorijoje. Tyrimams buvo naudojamas kampų matavimo sistema (3.20 pav.) su tiksliu *Heidenhain* kampo keitikliu (4), kurį suka pjezo pavara (9). *Heidenhein* (RON 905) kampo keitiklis pasižymi dideliu tikslumu, jo skiriamoji geba ±0,4`, o keitiklyje naudojama skalė turi 36 000 žymių skaičių. Stalas taip pat turi valdymo bloką (2), kuris leidžia jį sukti tiek į vieną, tiek į kitą pusę. Ant šio įrenginio korpuso sumontuota CD-ROOM 780 nm bangos ilgio lazerinė galvutė (6). Ji yra reguliuojama X;Y ašimis. Vertikalią pastūmą galima reguliuoti 1 μm tikslumu. Prie matavimo sistemos

prijungtas oscilografas (3) matuojamųjų signalų amplitudėms gauti. Ant sukamos dalies yra sumontuotas centravimo-gulsčiavimo staliukas (5), o ant jo padėtas matavimo objektas t.y. apskritiminė skalė (7).

Eksperimentiniam darbui atlikti centravimo-gulsčiavimo staliuko (5) viršutinis žiedas buvo išgulsčiuotas 1 μm tikslumu pasitelkus mikrometrinę galvutę. Šiuo atveju, nebuvo būtina CD skalę centruoti tiksliai lazerinės galvutės atžvilgiu, kadangi pasirinktos skalės brūkšniai yra 10 mm ilgio, todėl vizualinis išstatymas ir taip leido aptikti signalus pilname matavimo apskritime.

Pirminių šios sistemos tyrimų, kai brūkšnių nuskaitymui nebuvo naudojama CCD kamera, rezultatai pateikti A priede. Gautų matavimo rezultatų analizei atlikti buvo pasirinkta viena iš signalų apdorojimo programų (*OriginPro 8.5.1)*. Daugeliu atvejų priimami ne gryni signalai, o susimaišę su įvairios kilmės triukšmu arba iškraipyti. Tik iš apdoroto signalo galima spręsti apie tiriamosios fizinės sistemos savybes. Nors apdorojant signalus, galima sumažinti triukšmo įtaką ir gauti pageidaujamas charakteristikas: vidurkius, koreliacijos funkcijas, spektrus, tačiau šie rezultatai nenusako matuojamų skalių tikslumo parametrų dydžių, kurie apibrėžtų skalės kampinės paklaidos dydį.



3.20 pav. Bendra kampų matavimo stendo principinė schema: 1 – kompiuteris, 2 – valdymo blokas, 3 – oscilografas, 4 – *Heidenhain* kampo keitiklis (RON 905), 5 – centravimo- gulsčiavimo staliukas, 6 – lazerinė galvutė, 7 – CD-tipo skalė, 8 – mikroskopas su CCD kamera, 9 – pjezo pavara

Fig. 3.20. The angle measurement principal system: 1 – computer, 2 – control unit, 3 – oscilloscope, 4 – *Heidenhain* angle encoder (RON 905), 5 – centering-levelling table, 6 – laser head, 7 – CD type scale, 8 – the microscope with a CCD camera, 9 – piezo driver

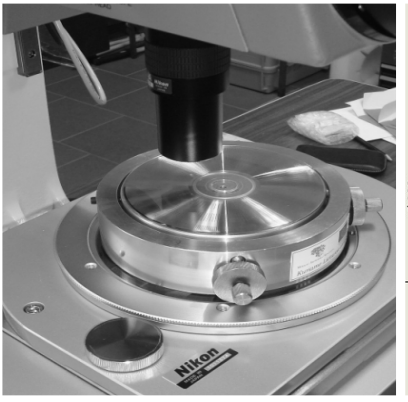
Informacijai gauti apie naujų skalių rastrus buvo pasirinktas optinis mikroskopas *NIKON MM-400* su CCD kamera. Šis mikroskopas pasižymi didele skyra (0.0001 mm ~10 mm). Kaip žinome mikroskopo skyrą lemia spindulių difrakcija optinėje mikroskopo sistemoje. Ji ir apibrėžia galimybę išskirti du

skirtingus rastrus matymo lauke nuo ko priklauso rastro detektavimo bei matavimo kokybė.

$$2{,}5 + L/50\ \mu m, \tag{3.22}$$

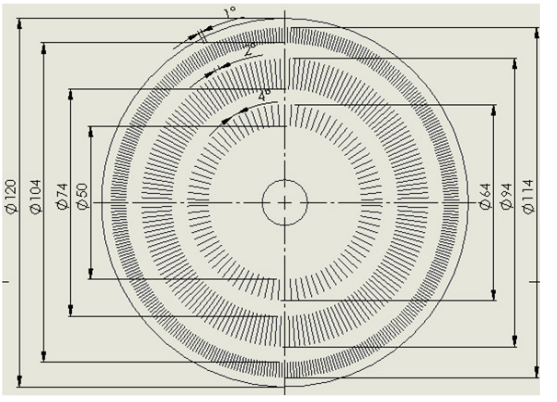
čia L – matavimo ilgis.

Matavimai buvo atlikti skalei, kurios brūkšniai suformuoti su Nd:YAG lazeriu. Skalę sukome pastoviu greičiu ir vaizdą fiksavome kadrais, kas tam tikrą laiko intervalą. Vaizdo fotografavimo sistemai buvo naudojami specialūs Nikon matavimams skirti objektyvai su 20 ir 50 kartų didinimu, kurių skaitinės apertūros NA atitinkamai 0,42 ir 0,75. Turėdami šiuos parametrus parinkome kameros jutiklio pikselio dydį. Reikalingas vaizdo diskretizavimo dažnis, ne mažesnis nei optinė skyra esant vidutiniam bangos ilgiui. Todėl buvo išrinkta skaitmeninė vaizdo kamera, kurios jutiklio pikselio dydis yra 6,4 µm. Esant 20× padidinimui diskretizuojamas objekto vaizdas 0,32 µm intervalais arba 1,5 rastrinės struktūros periodo į µm. Tai tenkina Reilėjaus kriterijų. Kadangi brūkšnio kontūro matavimas yra atliekamas su skaitmenine kamera fiksuojant vaizdą per labai trumpą laiką (iki 20 µs) ir naudojant stiprų apšvietimą, tai brūkšnio krašto matavimo tikslumas yra brūkšnio kontūro pozicijų ir kameros jutiklio triukšmo vidutinio kvadratinio nuokrypių suma.



3.21 pav. CD skalės matavimas NIKON MM-400

Fig. 3.21.CD scale measurement by NIKON MM-400



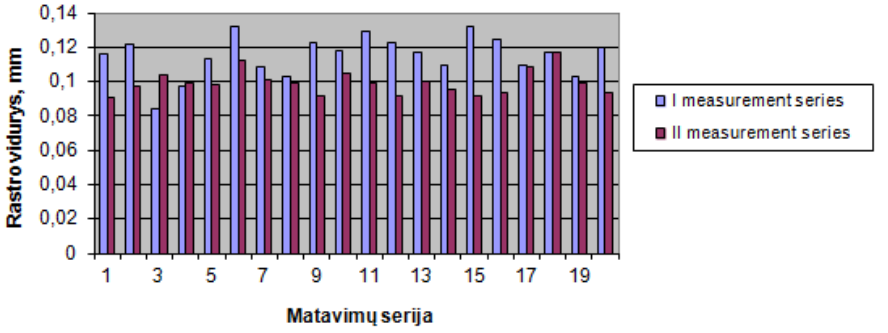
3.22 pav. 3-jų takelių CD skalė

Fig. 3.22. 3 tracks scale

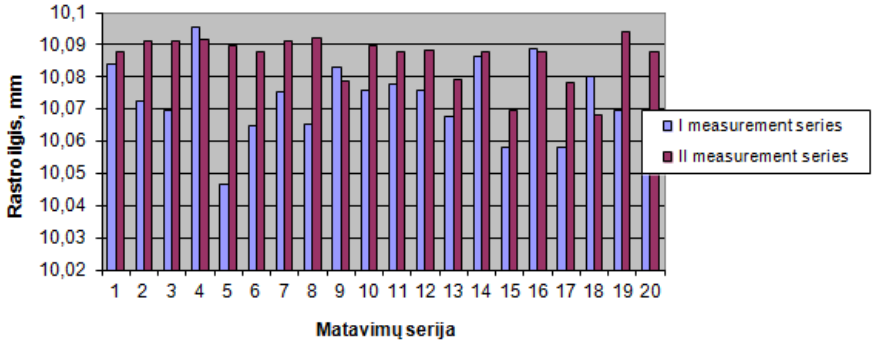
Remiantis brėžiniu (3.22 pav.), pagamintos CD skalės CO_2 lazeriu padalų ilgiai turėjo atitikti 10 mm, o rastrai takelyje suformuoti 2° kampu. Atlikus šios skalės matavimus bei apdorojus duomenis gauti rezultatai rodo, jog padalos plotis svyruoja dešimtąja milimetro dalimi. (3.3 lentelė). Rastrų ilgiai šioje skalėje skiriasi iki 20 µm (3.24 pav.). Šių ilgių standartinis nuokrypis – 12 µm. Rastrų vidurio reikšmių grafikas pateiktas 3.23 paveiksle.

3.3 lentelė. CD skalės rastrų duomenys
Table 3.3. Result of CD raster scale

Nr.	Rastro vidurys, mm	Nr.	Rastro vidurys, mm	$\overline{x}$,	Nr.	Rastro ilgis, mm	Nr.	Rastro ilgis, mm	$\overline{x}$
1.	0,11645	21.	0,09095		1.	10,0838	21.	10,0878	
2.	0,12155	22.	0,09755		2.	10,0726	22.	10,0912	
3.	0,08395	23.	0,10395		3.	10,0695	23.	10,0912	
4.	0,0977	24.	0,09905		4.	10,0954	24.	10,0917	
5.	0,11325	25.	0,09825		5.	10,0465	25.	10,0898	
6.	0,1321	26.	0,1121	0,107	6.	10,0648	26.	10,0877	10,0795
7.	0,10825	27.	0,10075		7.	10,0754	27.	10,0911	
8.	0,1028	28.	0,0993		8.	10,0653	28.	10,0921	
9.	0,12255	29.	0,09205		9.	10,0832	29.	10,0789	
10.	0,11755	30.	0,10505		10.	10,0756	30.	10,0897	
11.	0,12955	31.	0,09905		11.	10,0775	31.	10,0878	
12.	0,12285	32.	0,09185		12.	10,0757	32.	10,0882	
13.	0,11725	33.	0,09975		13.	10,0678	33.	10,0790	
14.	0,10945	34.	0,09495		14.	10,0865	34.	10,0876	
15.	0,1324	35.	0,0919	S = 0,0252	15.	10,0579	35.	10,0698	S = 0,0116
16.	0,12445	36.	0,09395		16.	10,0887	36.	10,0876	
17.	0,10945	37.	0,10895		17.	10,0579	37.	10,0783	
18.	0,1173	38.	0,1168		18.	10,0799	38.	10,0680	
19.	0,10275	39.	0,09925		19.	10,0697	39.	10,0941	
20.	0,12025	40.	0,09325		20.	10,0685	40.	10,0876	



3.23 pav. Rastrų vidurio reikšmės formuojant CO_2 lazeriu
Fig. 3.23. Value of centre of raster using CO_2 laser



3.24 pav. Rastrų ilgio reikšmės formuojant CO_2 lazeriu
Fig. 3.24. Value of length of raster using CO_2 laser

Kitas matavimas buvo atliktas CD skalei, kuri turi 1440 brūkšnių apskritime ir pagaminta Nd:YAG lazeriu. Matavimo rezultatai pateikti 3.4 lentelėje. Šios skalės minimalus rastro žingsnis siekia 0,17 mm. Rastro ilgio standartinis nuokrypis – 5 µm, rastro vidurio standartinis nuokrypis – 5 µm.

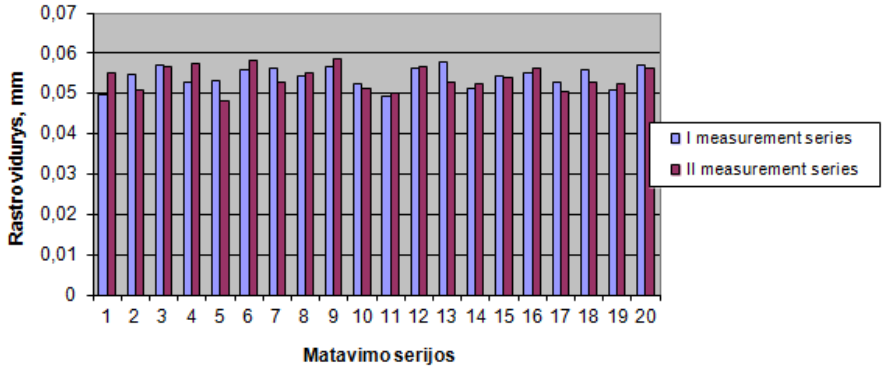
3.4 lentelė. CD skalės rastrų duomenys
Table 3.4. Result of CD raster scale

Nr.	Rastro vidurys, mm	Nr.	Rastro vidurys, mm	$\bar{x}$	Nr.	Rastro ilgis, mm	Nr.	Rastro ilgis, mm	$\bar{x}$
1.	0,0496	1.	0,0551		21.	5,1013	21.	5,1025	
2.	0,0547	2.	0,0507		22.	5,1125	22.	5,1180	
3.	0,05705	3.	0,05655		23.	5,1047	23.	5,1078	
4.	0,0528	4.	0,05755		24.	5,1031	24.	5,1046	
5.	0,05325	5.	0,04825	0,0541	25.	5,0989	25.	5,0985	5,1057
6.	0,05605	6.	0,0583		26.	5,1015	26.	5,1055	
7.	0,05625	7.	0,05275		27.	5,1078	27.	5,1025	
8.	0,05445	8.	0,05495		28.	5,1040	28.	5,0985	
9.	0,0566	9.	0,0586		29.	5,1027	29.	5,1045	
10.	0,05255	10.	0,05135		30.	5,1046	30.	5,1088	
11.	0,04935	11.	0,0499		31.	5,1137	31.	5,1124	
12.	0,0562	12.	0,0567		32.	5,1081	32.	5,1054	
13.	0,0577	13.	0,0527		33.	5,0994	33.	5,0988	
14.	0,0511	14.	0,0523		34.	5,1139	34.	5,1120	
15.	0,0542	15.	0,0541	S = 0,0055	35.	5,1043	35.	5,1065	S = 0,0049
16.	0,0551	16.	0,0562		36.	5,1062	36.	5,1078	

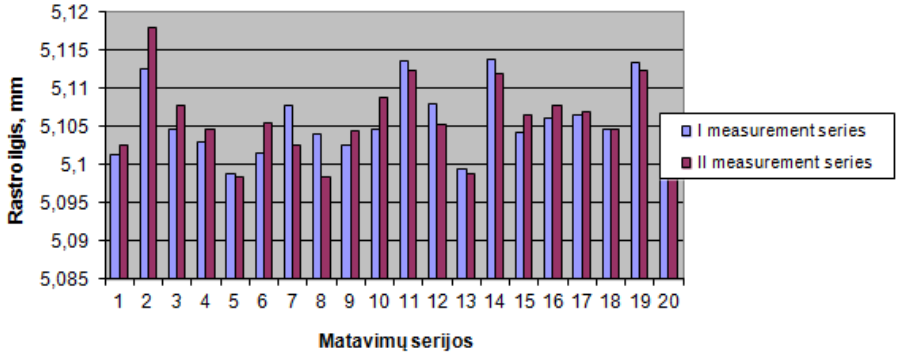
3.4 lentelės pabaiga

17.	0,0528	17.	0,05065		37.	5,1065	37.	5,1069	
18.	0,05605	18.	0,0527		38.	5,1046	38.	5,1046	
19.	0,05075	19.	0,0523		39.	5,1134	39.	5,1123	
20.	0,0569	20.	0,0563		40.	5,0986	40.	5,1018	

Ši skalė buvo matuota dvi matavimų serijas. Rastrų vidurio reikšmių grafikas pateiktas 3.25 paveiksle, jų ilgiai pavaizduoti 3.26 paveiksle.



3.25 pav. Rastrų vidurio reikšmės formuojant Nd:YAG lazeriu
Fig. 3.25. Value of centre of raster using Nd:YAG laser



3.26 pav. Rastrų ilgio reikšmės formuojant Nd:YAG lazeriu
Fig. 3.26. Value of length of raster using Nd:YAG laser

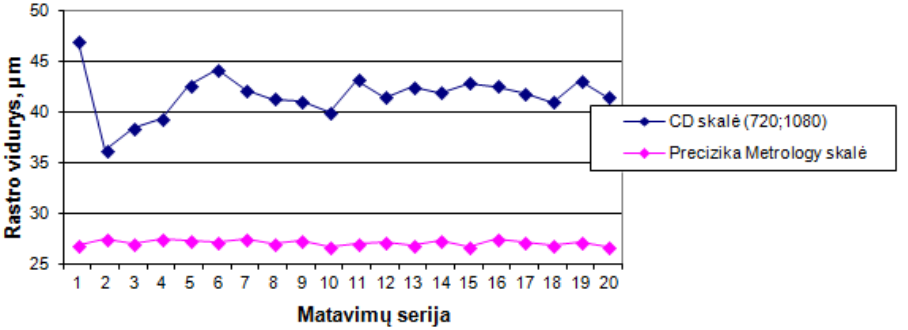
Trečiajam matavimui atlikti buvo pasirinkta skalė su dviem takeliais: 720 ir 1080 padalų apskritimuose. Skalės gamybos pjovimo proceso tikslumo parametrai buvo derinti kartu atsižvelgiant į gamybos ir įrangos techninius reikalavimus.

Aukščio fokusavimui naudojome papildomus gulsčiavimo elementus. Gauti rezultatai – skalės rastro vidurio reikšmių nuokrypis 4,4 µm.

CD skalės matavimo rezultatai palyginti su *Precizika Metrology* kompanijos pagamintos apskritiminės skalės rezultatais pateikti 3.5 lentelėje. Ši įmonė gamina ir tiekia įvairių matmenų ir rastrų parametrų stiklines inkrementines ir kodines liniuotes ir limbus, skirtus fotoelektrinėms matavimo sistemoms.

3.5 lentelė. Skirtingų gamybos technologijų skalių rastrų parametrai
Table 3.5. Scales raster parameters of different production technology

CD skalė (720;1080)		$\bar{x}$	Precizika Metrology skalė skalė (Ø30)		$\bar{x}$
Nr.	Rastro vidurys, µm		Nr.	Rastro vidurys, µm	
1.	46,9	41.7	1.	26,75	27.1
2.	36,15		2.	27,4	
3.	38,35		3.	27	
4.	39,3		4.	27,4	
5.	42,6		5.	27,25	
6.	44,15		6.	27,15	
7.	42,05		7.	27,35	
8.	41,2		8.	26,95	
9.	40,95	S = 4.4	9.	27,3	S = 0.5
10.	39,9		10.	26,6	
11.	43,1		11.	26,9	
12.	41,4		12.	27,05	
13.	42,4		13.	26,8	
14.	41,85		14.	27,2	
15.	42,8		15.	26,6	
16.	42,45		16.	27,35	
17.	41,75		17.	27,1	
18.	40,9		18.	26,8	
19.	43		19.	27,05	
20.	41,4		20.	26,65	



3.27 pav. Rastro centro reikšmių palyginimas naudojant skirtingas gamybos technologijas
Fig. 3.27. Centre of raster values comparison using different technologies

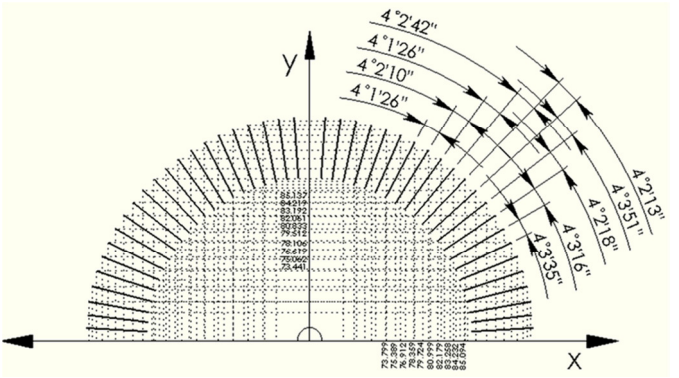
Jų gamybos technologija visiškai skiriasi ir rastras yra formuojamas ploname chromo sluoksnyje, kuris vakuume yra užgarinamas ant stiklinio pagrindo. Gaminamų skalių limbų paklaida siekia vos 2 kampo sekundes, o skalės gali turėti iki 10 µm rastro žingsnį. Šių skirtingų skalių viso matavimo padalų vidurio reikšmės pateiktos 3.27 paveiksle. Akivaizdu jog gamintojas specializuojasi šioje srityje jau ne vienerius metus, o jo gaminama produkcija sėkmingai konkuruoja pasaulinėje rinkoje.

CD skalės (90; 180; 360) kampo suradimas. Kampinei paklaidai įvertinti, matavimai atlikti CD skalei, kurios takelį sudaro 90 rastrų apskritime. Mikroskopas buvo sureguliuotas taip, jog keletos rastrų regėjimo lauką galima būtų matyti vienu metu. Siūlų sankirtos tašką sutapatinome su pirmojo rastro pradžios tašku ir nuskaitėme taško X, Y koordinates. Mikroskopo staliuko mikrometriniais sraigtais sureguliavome siūlų sankirtos tašką ties pabaigos rastro tašku bei užfiksavome 2-ojo taško koordinates. Skalėje buvo pamatuota 30-ties rastrų pradžios ir pabaigos taškų koordinates (3.6 lentelė). *SolidWorks* programoje taškus išdėliojome koordinačių sistemoje (3.28 pav.) masteliu (1:1). Gauti rezultatai: kampinis rastrų standartinis nuokrypis neviršija 40-ties kampo sekundžių.

3.29 paveiksle pateikėme šios skalės tyrimo duomenų variaciją t. y. kampo reikšmių pasikartojamumą bei jų svyravimų dydį. Visa tai galima būtų pavadinti eksperimento paklaida.

3.6 lentelė. Takelio su 4° kampo žingsniu CD skalės rastrų kampų rezultatai
Table 3.6. Result of angle value of the CD scale

Nr.	Brūkšnio koordinatės (X;Y), mm	Nr.	Brūkšnio koordinatės (X;Y), mm	Nr.	Brūkšnio koordinatės (X;Y), mm	Kampas	Vidurkis $\overline{x}$	Stand. kampo nuokrypis S
1.	X_1=73,799 Y_1=85,137 X_2=78,494 Y_2=93,967	11.	X_1=63.283 Y_1=88.153 X_2=63.981 Y_2=98.128	21.	X_1=49.097 Y_1=85.137 X_2=44.402 Y_2=93.967	4°1'26" 4°2'10" 4°1'26"	4° 1'26"	36,8"
2.	X_1=75,389 Y_1=84,219 X_2=80,689 Y_2=92,700	12.	X_1=65.109 Y_1=87.961 X_2=66.501 Y_2=97.864	22.	X_1=47.507 Y_1=84.219 X_2=42.208 Y_2=92.699	4° 2'42" 4° 3'51" 4° 2'18"		
3.	X_1=76,912 Y_1=83,192 X_2=82,789 Y_2=91,282	13.	X_1=87.581 Y_1=64.933 X_2=97.515 Y_2=66.082	23.	X_1=45.985 Y_1=83.192 X_2=40.107 Y_2=91.282	4° 3'16" 4° 3'35" 4° 1'45"		
4.	X_1=78,359 Y_1=82,061 X_2=84,787 Y_2=89,722	14.	X_1=87.712 Y_1=63.424 X_2=97.695 Y_2=63.999	24.	X_1=44.538 Y_1=82.061 X_2=38.110 Y_2=89.722	4° 2'32" 4° 2'45" 4° 2'38"		
5.	X_1=79,724 Y_1=80,833 X_2=86,670 Y_2=88,027	15.	X_1=59.613 Y_1=88.153 X_2=58.915 Y_2=98.128	25.	X_1=43.173 Y_1=80.833 X_2=36.226 Y_2=88.026	4° 1'48" 4° 2'13" 4° 2'56"		
6.	X_1=80,999 Y_1=79,512 X_2=88,431 Y_2=86,204	16.	X_1=57.787 Y_1=87.961 X_2=56.395 Y_2=97.864	26.	X_1=41.897 Y_1=79.512 X_2=34.466 Y_2=86.203	4° 3'18" 4° 2'41" 4° 2'44"		
7.	X_1=82,179 Y_1=78,106 X_2=90,060 Y_2=84,262	17.	X_1=55.978 Y_1=87.642 X_2=53.899 Y_2=97.423	27.	X_1=40.717 Y_1=78.105 X_2=32.837 Y_2=84.262	4° 1'54" 4° 1'13" 4° 2'27"		
8.	X_1=83,258 Y_1=76,619 X_2=91,550 Y_2=82,212	18.	X_1=54.197 Y_1=87.197 X_2=51.440 Y_2=96.810	28.	X_1=37.803 Y_1=73.441 X_2=28.815 Y_2=77.824	4° 2'36" 4° 2'47" 4° 2'35"		
9.	X_1=84,232 Y_1=75,062 X_2=92,892 Y_2=80,063	19.	X_1=52.450 Y_1=86.630 X_2=49.030 Y_2=96.027	29.	X_1=36.428 Y_1=70.038 X_2=26.917 Y_2=73.128	4° 2'16" 4° 3'29" 4° 2'48"		
10	X_1=85,094 Y_1=73,441 X_2=94,082 Y_2=77,825	20.	X_1=50.748 Y_1=85.942 X_2=46.680 Y_2=95.078	30.	X_1=35.540 Y_1=66.476 X_2=25.692 Y_2=68.213	4° 1'49" 4° 2'39" 4° 2'57"		

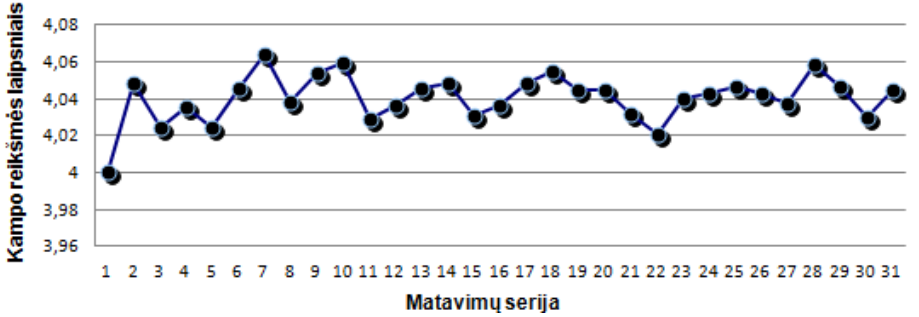


3.28 pav. Kampo suradimas naudojant *SolidWorks* programą
Fig. 3.28. Finding the angle using *SolidWorks* program

Kadangi matavimo reikšmių išsibarstymas yra nemažas, šiuo atveju patogu naudoti santykinį variacijos rodiklį – variacijos koeficientą.

$$\mathrm{CV}=\frac{S}{\bar{X}}100\%, \tag{3.22}$$

čia S – standartinis nuokrypis, $\bar{x}$ – aritmetinis vidurkis.



3.29 pav. CD skalės rastrų kampo reikšmių rezultatai
Fig. 3.29 Angle values results of CD raster scale

Apskritiminių skalių matavimo rezultatų neapibrėžties vertinimas, kampo matavimo rezultatų neapibrėžties įtakos faktorių analizė. Analizuojant kampo matavimo rezultatų patikimumo problematiką, būtina ištirti kampo matavimų neapibrėžties modelio įtakos faktorius. Kampo matavimo neapibrėžties įtakos faktorių dedamosios pagal kilmę gali būti skirstomos į:

- *prietaiso paklaidų dedamosios:* kiekvienam matavimo įtaisui kalibravimo metu yra apskaičiuojama kalibravimo neapibrėžtis. Ši

neapibrėžties dedamoji turi būti įtraukiama į bendrąjį matavimo neapibrėžties modelį.

- *aplinkos poveikio dedamosios:* kampo matavimo sistemų tikslas – pagal išmatuotus kampo dydžius įvertinti rastrų būklę. Dauguma stebimų mašinų dirba nelaboratorinėmis sąlygomis, todėl dėl aplinkos poveikio gali būti netikslumų išmatuotame virpesių dydyje, kuris savo ruožtu, įtakoja galutinį priimamą sprendimą bei jo pasekmes.

Nors kiekvienas keitlys turi nurodytą savo kalibravimo neapibrėžtį, ji nėra nekintanti ir neįtakojama. Todėl atsižvelgiant į matavimo posistemės atskirų prietaisų kalibravimo ir patikros periodiškumą, reikėtų įvertinti ir matavimo prietaisų įtakos faktorius, kurie gali turėti įtakos kampo matavimams.

Kampo matavimo prietaiso amplitudės dažnio charakteristikos netolygumas vertinamas pagal formulę (Isermann 1997, Eidukevičiūtė 2006, Eidukevičiūtė 2007):

$$\gamma_{mat} = \frac{\Delta X_{\max}}{X_{\delta}}, \tag{3.22}$$

čia $\Delta X_{\max}$ – maksimalus prietaiso parodymo nuokrypis nuo reikšmės, gautos nustatytame dažnyje, X_{δ} – prietaiso parodymas, esant fiksuotam dažniui.

Prietaiso perdavimo koeficientas $\hat{K}$ gali būti vertinamas pagal formulę:

$$\hat{K}_a = \frac{V_{\delta}}{\gamma_s \cdot \overline{a}}, \tag{3.23}$$

arba

$$\hat{K}_v = \frac{V_{\delta}}{\overline{v}}, \tag{3.24}$$

čia V_{δ} – įtampos matavimo prietaiso rodmuo, esant pagrindiniam dažniui, mV; $\hat{K}_a$ – perdavimo koeficiento vertė pagreičiui mV/mm s^{-2}; $\hat{K}_v$ – perdavimo koeficiento vertė greičiui, mV/mm s^{-1}; $\overline{a}$ – kampo vertė, mm/s^2; $\overline{v}$ – kampo vertė, mm/s; γ_s – stiprintuvo perdavimo koeficientas (jei stiprintuvo nėra $\gamma_s = 1$).

Tada skersinio santykinio transformacijos K_{ss} koeficientas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$K_{ss} = \frac{V_{\max}}{\gamma_s \cdot \overline{a} \cdot \hat{K}_a}, \tag{3.25}$$

čia V_{max} – įtampos matavimo prietaiso rodmuo.

Amplitudės dažnio charakteristikos netolygumas apibūdinamas santykiu:

$$\gamma = \frac{\left|V_r - V_\delta\right|_{\max}}{V_\delta}, \tag{3.26}$$

čia V_r – įtampos matavimo prietaiso maksimalus arba minimalus voltmetro rodmuo, mV, V_δ – prietaiso rodmuo, esant fiksuotam dažniui;

Amplitudės charakteristikos netiesiškumas aprašomas formule:

$$\delta_a = \frac{K_i - K_{vid}}{K_{vid}}, \tag{3.27}$$

čia K_i – perdavimo koeficientas z-tajai kampo vertei; K_{vid} – vidutinė perdavimo koeficiento vertė.

Dažninės amplitudės charakteristikos netolygumo charakteristika γ_{mat} pasiskirsčiusi pagal trikampį tikimybinį pasiskirstymo dėsnį. Šis skirstinys rodo, kad tikimybė P, kad charakteristika įgys vidutinę reikšmę, yra didžiausia, ir tolygiai mažėja, kitose intervalo vietose. Neapibrėžties įvertis skaičiuojamas pagal formulę:

$$u^2_{mat} = \frac{1}{6} \frac{\Delta X_{\max}\left(X_{\delta\max} - X_{\delta\min}\right)}{X_{\delta\min} X_{\delta\max}}. \tag{3.28}$$

Transformacijos koeficiento įvertis pasiskirstęs pagal stačiakampį dėsnį. Tai reiškia, kad tikimybė, kad koeficientas įgys bet kurią reikšmę iš paklaidos intervalo yra vienoda. Šio koeficiento standartinę neapibrėžtį galima išreikšti:

$$u^2_{\hat{K}_a} = \frac{V_{\delta\max} - V_{\delta\min}}{3\gamma_s \overline{a}}, \tag{3.29}$$

arba (jei matuojamas greitis)

$$u^2_{\hat{K}_v} = \frac{V_{\delta\max} - V_{\delta\min}}{3\overline{v}}. \tag{3.30}$$

Skersinio santykinio transformacijos koeficiento paklaida pasiskirsčiusi pagal stačiakampį pasiskirstymo dėsnį:

$$u_{K_{ss}}^2 = \frac{V_{\max}\left(\hat{K}_{a\max} - \hat{K}_{a\min}\right)}{\gamma_s \cdot \bar{a} \cdot \hat{K}_{a\min} \cdot \hat{K}_{a\max}}. \tag{3.31}$$

Kai atliekami nuolatiniai kampo matavimai, išauga matuojamųjų dydžių imties tūris *N,* o statistinis neapibrėžties sandas, apskaičiuojamas pagal formulę $u_{stat} = \frac{S_X}{\sqrt{N}}$ yra priklausomas nuo dydžio *N*.

Šis dydis, tęsiant matavimus ir didėjant N skaičiui, mažėja. Standartinis nuokrypis, kuris išreiškiamas formule $S_X{}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N}\left(x_j - \bar{x}\right)^2}{N-1}$ savo ruožtu, taip pat priklauso nuo imties tūrio, ir jam didėjant, artėja į vienetą. Statistinio neapibrėžties sando u_{stat} dydis lygus trečioje darbo dalyje skaičiuojamo standartinio vidurkio nuokrypio $S_{\bar{x}}$ reikšmei (3.3 lygtis). Dar šią lygtį būtų galima užrašyti taip:

$$u_{stat} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{N-1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} \approx \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}}{N}. \tag{3.32}$$

čia x_i – imties narys, $\bar{x}$ – imties vidurkis.

Kampo matavimo neapibrėžties įtakos faktorių aplinkos atžvilgiu dedamosios – temperatūros *T* ir drėgmės *H* sandai, atitinkamai u_T^2 ir u_H^2. Šie faktoriai yra tarpusavyje koreliuojantys bei gali įtakoti matavimų neapibrėžtį. Jų koreliacinė dedamoji:

$$u_{korel}^2 = 2 \cdot u_T u_H r\left(T, H\right). \tag{3.33}$$

Tačiau matavimai buvo atliekami patalpoje, kurioje palaikomi pastovūs drėgmė ir temperatūra, tai ši koreliacija neapibrėžties modeliui įtakos neturi.

Kampo matavimo rezultatų neapibrėžties įvertinimo pagrindiniai faktoriai pateikti 3.7 lentelėje (Vekteris 2000, Volkovas 2004).

Remiantis realiais duomenimis, apskaičiavus statistinį neapibrėžties įvertį u_{stat}^2, pagal išmatuotus duomenis bei remiantis aukščiau pateiktomis prielaidomis (Eidukevičiūtė 2007, Volkovas 2004), kampo matavimo sistemos rezultatų neapibrėžties modelis:

$$U_{KMS} = 2 \cdot \sqrt{u_{stat}^2 + u_{mat}^2 + u_{\hat{K}}^2 + u_{K_{ss}}^2 + u_T^2 + u_H^2 + 2 \cdot u_T u_H r(T,H) + u_{stip}^2 + u_{keit}^2 + u_{mat,duom}^2 + u_{tr}^2}, \quad (3.34)$$

čia u_{stat} – statistinis neapibrėžties sandas; u_{mat} – matavimo prietaiso neapibrėžties sandas; $u_{\hat{K}}^2$ – prietaiso perdavimo koeficiento neapibrėžties sandas; $u_{K_{ss}}^2$ – transformacijos koeficiento neapibrėžties sandas; u_T – temperatūros įtakos neapibrėžties sandas; u_H – drėgmės įtakos neapibrėžties sandas; u_{stip} – pirminio signalo stiprinimo neapibrėžties sandas; u_{keit} – analoginio signalo keitimo į skaitmeninį kodą neapibrėžties sandas; $u_{mat,duom}$ – matavimo duomenų apdorojimo neapibrėžties sandas; u_{tr} – triukšmo įtakos neapibrėžties sandas.

3.7 lentelė. Kampo matavimo sistemos rezultatų neapibrėžties įvertinimo pagrindiniai faktoriai
Table 3.7. Angle measurements in the assessment of the uncertainty of main factors

Žymėjimas	Aprašymas	Neapibrėžties įvertinimo metodas
u_{stat}	Statistinis neapibrėžties sandas, apskaičiuojamas iš matavimo duomenų	***A***
u_{mat}	Matavimo priemonės kalibravimo neapibrėžtis, nurodoma matavimo priemonės dokumentuose	***B***
u_K, u_{Kss}	Neapibrėžties sandai, atsirandantys dėl matavimo priemonės besikeičiančių charakteristikų	***B***
u_T, u_H	Neapibrėžties sandai, atsirandantys dėl besikeičiančių aplinkos sąlygų	***B***
u_{stip}	Pirminio signalo stiprinimo neapibrėžties sandas	***B***
u_{keit}	Analoginio signalo keitimo į skaitmeninį kodą neapibrėžties sandas	***B***
$u_{mat,duom}$	Matavimo duomenų apdorojimo neapibrėžties sandas	***B***
u_{tr}	Neapibrėžties sandas, atsirandantis dėl triukšmingos aplinkos, vertinamas iš turimų duomenų	***A***

Naudojant šiame skyriuje pateiktą matavimo rezultatų neapibrėžties nustatymo metodiką, kampo matavimo rezultatų neapibrėžties įverčiai (įvertinant imties standartinį nuokrypį kaip reikšminį dydį) pateikti formulėje 3.35. Kampo matavimo rezultatų ir neapibrėžties įvertinimas pateiktas 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Kampo matavimo rezultatų ir neapibrėžties įvertinimas
Table 3.8. Results of the angle measurements and the assessment of the uncertainty

Kampo matavimo rezultatai	Kampo aritmetinio vidurkio reikšmė $\overline{x}$, rad	Kampo standartinio nuokrypio įverčio S_x,	Kampo statistinio neapibrėžties sando reikšmė u_{stat},
Kampo matavimo rezultatai	0,07054	0,00019	0,00000160

Tada kampo matavimo sistemos rezultatų neapibrėžtis:

$$U_{VMSs} = 2 \cdot \sqrt{u_{stat}^2 + u_{mat}^2 + u_{\hat{K}}^2 + u_{K_{ss}}^2 + u_{stip}^2 + u_{keit}^2 + u_{mat,duom}^2}\,. \qquad (3.35)$$

Temperatūros ir drėgmės neapibrėžties sandai prilyginami nuliui. Triukšmo dedamoji taip pat prilyginama nuliui, kadangi yra nykstamai maža, nes patalpa, kurioje atliekami matavimai yra izoliuota nuo išorinių triukšmo šaltinių. Kampo matavimo rezultatų neapibrėžtis:

$$U_{KMS} = 0{,}43\ \%.$$

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Apskritiminių skalių rastrų gamyba lazerio spinduliu šiai dienai nėra ištobulinta, jog galima būtų konkuruoti su įprastiniais pakankamai sudėtingais ir brangiai kainuojančiais mechaniniais, fotolitografiniais ar kitais gamybos būdais. Tačiau naudojant lazerines technologijas galime pasiekti ne tik patikimą, greitą, bet ir kokybišką rezultatą. Įvertinant skirtingus rastrų gamybos būdus, jau dabar galima išskirti pagrindinius apskritiminių skalių padalų lazerinio žymėjimo privalumus: ilgalaikis, aukštos kokybės žymėjimo metodas; bekontaktis metodas, nereikia specialios darbo aplinkos; lengva automatizuoti ir integruoti; precizinis pozicionavimas (didelė skiriamoji geba); didelis žymėjimo greitis;
ažesnė gamybos kaina, lyginant su esančiomis rastrų gamybos būdais; nėra medžiagos užteršimo; prieinamas paprastam vartotojui.

2. Naujas apskritimines skales galima būtų pritaikyti vidutinio tikslumo kampų pozicionavimui, kur minimalus rastro žingsnis neviršija 45 μm, o rastro paklaida ne didesnė nei 20 kampo sek.

3. Atlikti optiniai matavimai lazerine matavimo sistema. Pasiūlyti papildomi įtaisai matavimams palengvinti. Atlikus skaičiavimus gauta kampo matavimo rezultatų neapibrėžtis 0,43 %.

Bendrosios išvados

1. Išnagrinėjus kampo matavimo sistemos konstrukciją ir ištyrus brūkšnio detektavimo procesą, nustatyta, kad brūkšninių kampo matų dinaminio kalibravimo rezultatų neapibrėžties komponentės susijusios su skaitmeninio vaizdo iškraipymais dėl judesio. Minimali brūkšninių matų paklaidos reikšmė gaunama optimizavus skalės apšvietimo, kameros ekspozicijos ir jos vėlinimo parametrus.
2. Modernizuotas naujas optinis skalių matavimo stendas, atlikti apskritiminių skalių matavimai. Suprojektuotas, pagamintas ir užpatentuotas naujas apskritiminių skalių centravimo-gulsčiavimo staliukas, skirtas skalėms pozicionuoti. Sudarytas kampo matavimo sistemos modelis leidžia analizuoti charakteringus kampo matavimo sistemai virpesius. Tiriant kampo matavimo sistemos centravimo-gulsčiavimo staliuko virpesius nustatyta, kad matavimo metu atsiradę dažniai 312 Hz, 423 Hz ir 570 Hz (1, 2 ir 3 modų) tiesiogiai įtakotų (sumažintų matavimo tikslumą) matavimo rezultatus.
3. Atlikus apskritiminių skalių gamybos analizę, pateiktas naujas optinis (lazerinis) rastrų žymėjimo būdas. Pagamintos naujos CD disko pagrindu apskritiminės skalės skirtingų tipų lazeriais (CO_2 LA-7050 ir Nd:YAG 50DP). Atlikus kampo matavimo sistemos gautų rezultatų

analizę bei skaičiavimus, kampo matavimo rezultatų neapibrėžtis 0,43 %.

4. Naujas apskritimines skales galima pritaikyti vidutinio tikslumo kampų pozicionavimui, kur minimalus rastro žingsnis neviršija 45 µm, o rastro paklaida ne didesnė nei 20 kampo sekundės.

Literatūra ir šaltiniai

Giniotis,V. 2005. Padėties ir poslinkių matavimas. Monografija. Vilnius: Technika.

Giniotis, V. 1997. Brief review of methods for measuring of circular scales, *Geodesy and Cartography / Geodezija ir kartografija* 2(26): 21–25.

Seilius, A. 2001. *Elektroninių matavimų metrologijos pagrindai*. Vilnius: Technika, 272 p.

Vekteris, V. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Žiburio leidykla, 384 p.

Kiryanov, A. V. 2005. *Estimation of Potential Accuracy of Angular Encoders using the Scales Fabricated by Raster Scanning Technology*. Russia.

Chugui, Y. V.; Kiryanov, V. P.; Verkhogliad, A. G. *High-performance Laser Technological Processing Systems for Scientific and Industrial Applications*. Russia.

Giniotis, V.; Rybokas, M.; Petroškevičius, P. 2004. Investigations into the accuracy of angle calibration, *Geodesy and Cartography / Geodezija ir kartografija* 3(30): 65–70.

Katowski, O.; Salzmann, W. 1983. The angle-measurement system in the Wild Theomat T2000, *Precision Engineering, Optics, Electronics* 1–10. Switzerland: Wild Heerbrugg Ltd.

Kiryanov, A. V.; Vedernikov, V. M.; Kiryanov, V. P.; Kokarev, S. A.; Nikitin, V. G. 2006. Forming high-precision angular measuring structures by the laser pattern generators with circular scanning, *Measurement science review* 6/3(1):10–13.

Giniotis, V.; Grattan, K. T. V. 2002. Optical Method for the Calibration of Raster Scales, *Measurement* 32/1: 23–29.

Giniotis, V.; Grattan, K. T. V.; Rybokas, M.; Kulvietiene, R. 2004. Uncertainty and indeterminacy of measurement data, *Measurement* 36: 195–202.

Giniotis, V.; Rybokas, M. 2003. Data processing and information assessment in scales measurement simulation, in *Proceedings XVII IMEKO World Congress* 1053–1056.

Zhimalov, A. B.; Solinov, V. F.; Kondratenko, V. S.; Kaplina, T. V. 2006. Laser Cutting of Float Glass during Production, *Science for Glass Production* 63(10): 3–5.

Lumley, R. 1968. Controlled Separation of Brittle Materials using a Laser, *American Ceramic Society Bulletin* 47(4): 385–390.

Tsai, C. H.; Liou, C. S. 2003. Fracture Mechanism of Laser Cutting with Controlled Fracture, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering* 125:519–528.

Tsai, C. H.; Lin, B. C. 2004, Laser Cutting of Silica Glasses by using the Controlled Fracture Technique, in *Proceedings of 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics* 34–41.

Dekker, J. N.; Zonneveld, M. H. 1989. Thermal Severing. The Cutting of Brittle Materials by Thermally Induced Fracture, Advances in *Fracture Research, in Proceedings of the 7th International Conference on Fracture* 4: 2825–2834.

Georgi, S. 2003. Separating and structuring of brittle material by the use of laser radiation, in Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering, 5063(1): 426–431.

Paterson, N. 2004. On the numerical modelling of laser shearing of glass sheets used to optimize production methods, in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Mechanical engineering science* 218(1): 1–12.

Black, M.; Finucane, A. 1996. CO_2 laser cutting of stained glass, *The International Journal Advanced Manufacturing Technology* 12(1): 47–59.

Krause, L. 2002. *Mathematical Simulation in Glass Technology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 3-540-43204-3.

Hermanns, C. 2000. Laser cutting of glass, in *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering* 4102: 219–226.

ISO 5725-1:1994 (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results – Part 1: General Principles and Definitions. Geneva: ISO, 1994. 22 p.

Rybokas, M.; Giniotis, V.; Petroškevičius, P.; Kulvietienė, R.; Bručas, D. 2006. Performance monitoring of geodetic instruments, *Insight* 48(8): 488–491. ISSN 1354–2575.

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, OIML. 1995. Guide to the expressions of uncertainty in measurement. ISO Publishing.

Giniotis, V.; Bručas, D.; Kuzas, P.; Gailius, D. 2007. Angular test bench for geodetic instruments, *Matavimai* 1(39): 15–18. ISSN 1392–1223.

Bazin, V. S.; Verkhogliad, A. G. *et al*. 2005. Multifunctional precision Laser technological system for processing large-scale articles with an arbitrary topology, *Instrumentation and Data Processing* 41(6): 89–94.

Kiryanov, V. P. 1997. Laser setup for flat optical components fabrication with submicron resolution, in *Proc. SPIE* 3091: 66–70.

Gurenko, V. M.; Kastorsky, L B.; Kiryanov, A. V.; Kiryanov, V. P.; Kokarev, S. A.; Vedernikov, V. M.; Verkhoglad, A. G. 2002. Laser writing systems CLWS-300/C-M for microstructure synthesis on axisymmetric 3D surfaces, in *Proc. SPIE* 4900: 320–325.

Safdar, S.; Sheikh, M. A.; Li, L.; Liu, Z. The effect of non-conventional laser beam geometries on stress distribution and distortions in laser bending of tubes, *Journal of Manufacturing Science and Technology*, ASME (In-Press).

Bataille, J. M., Cerez, J. M., and Kechemair, D. 1992. A Systematic Method for the Design of a Multivariable Controller Actuating Power and Speed during a CO_2 Laser Surface Treatment, *Journal of Laser Applications* 4(2): 43–47.

Safdar, S.; Li, L.; Sheikh, M. A.; Liu, Z. 2005. The effect of beam geometry on stress distribution in laser bending of tubes, in *Proceedings of 24th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2005*, pp. 54–63.

Giniotis, V.; Rybokas, M. 2008. Traceability enhancement in angle measurement, in: Traceability to support CIPM MRA and other international arrangements (TC8) Torino, Italy, 6–7 November 2008 [CD] / International Measurement Confederation (IMEKO), Instituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), pp. 1–8.

Bručas, D.; Giniotis, V. 2008. Circular scale eccentricity analysis, *Mechanika* 5(73): 48–53. ISSN 1392-1207.

Bloehs, W.; Grunenwald, B.; Dausinger, F.; Hugel, H. 1996. Recent progress in laser surface treatment: I., *Journal of Laser Applications* 8: 15–23.

Bloehs, W.; Grunenwald, B.; Dausinger, F.; Hugel, H. 1996. Recent progress in laser surface treatment: I., *Journal of Laser Applications* 8: 15–23.

Song, W. Y; Jung K. Y; Beom-hoan O. 2004. Precision laser diffractometry for grating period measurements, *Journal of the Korean Physical Society* 45(6): 1510–1516.

Brandt, M.; Scott, D. A. 1990. Nd:YAG Lasers for Australian Industry, in *The 5th International Conference on Manufacturing Engineering*, ICME-90, Australia: Wollongong, 110–112.

David, J. 1994. *Handbook of Surface and Nanometrology*. UK.

Mueller's, S. 2004. Upgrading and Repairing PCs. USA.

Poškus, A. 2004. Signalai Telekomunikacijų Sistemose, p. 16–44.

Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. 2013. Application documents and Technical Adcvisory documents for Conformity Assessment Bodies.

Acton, S. T.; Bovik, A. C. 2005. Basic linear filtering with application image enhancement, in *The Handbook of Image and Video Processing* (2nd ed.), pp. 99–108.

Allebach, J. P. 2000. Image Scanning, Sampling, and Interpolation, *Handbook of Image and Video Processing* (2nd ed.), Editor A. Bovik, Academic Press, pp. 629–643. ISBN 0-12-119792-1.

Barakauskas, A.; Čižiūnas, A.; Kasparaitis, A. 2008. The Researches of Long Linear Scale Comparator and its Environmental Temperatures Gradient, in *Proceedings of 13th International Conference on Mechanika*: *Mechanika-2008*, pp. 33–38. ISSN 1822-2591.

Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Šukys, A.; Kojelavičius, P. 2008. Analysis of geometrical accuracy of long grating scale calibration comparator, *Electronics and Electrical Engineering* 1(81): 3–6. ISSN 1392-1215.

Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika, 612 p.

Ben-Ezra, M.; Nayar, S. K. 2004. Motion-Based Motion Deblurring, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26(6): 689–699.

Bentkus, R.; Kasparaitis, A.; Požela, E. 2001. An Interactive Algorithm of Measurement Errors Fitting by Multidimensional Argument Spline, *Measurements* 1(17): 7–12. ISSN 1392-1223.

Bentkus, R.; Kasparaitis, A.; Šukys, A. 2005. Optimization of linear precise movements, *Mechanika* 1(51): 49–53. ISSN 1392-1207.

Birch, K. P. 1993. The effect of variations in the refractive index of industrial air upon the uncertainty of precision length measurement, *Metrologia* 30: 7–14.

Birch, K. P.; Downs, M. J. 1994. Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air, *Metrologia* 31: 315–316.

Boddeke, F.; Van Vliet, L. J.; Netten, H.; Young, I. 1995. Autofocusing in microscopy based on the OTF and sampling, *Bioimaging* 2: 193–203.

Bodermann, B.; Buhr, E.; Mirande,W. 2003. *Quatitative Mikroskopie: Dimensionelle Messtechnik an Mikro- und Nanostrukturen*. PTB Mitteilungen. Heft 4:113.

Boensch, G.; Darnedde, H. 1994. Temperature Measument of Gauge Block Calibration, *PTB- Bericht F–17:Temperature Measurements in Dimensional Metrology*. Braunschweig: PTB, pp. 23–35.

Bonsch, G.; Potulski, E. 1998. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae, *Metrologia* 35: 133–139.

Bosse, H.; Flügge, J. 2001. Requirements and recent developments in high precision length metrology, in Proceedings of the 159 PTB-Seminar. 180 p.

Bovik, A. C. 2005. Basic tools for image fourier analysis, *The Handbook of Image and Video Processing* (2nd ed.) New York: Academic Press, pp. 57–72.

Brikas, M.; Račiukaitis, G.; Gedvilas, M. 2007. Accumulation effects during processing of metals and silicon with repetition-rate lasers, *Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 273: 645–656. ISSN 1456-4491. ISBN 978-952-214-412-6

Bručas, D. 2008. *Geodezinių kampų matavimo prietaisų kalibravimo įrangos kūrimas ir tyrimas:* daktaro disertacija. Vilnius: VGTU.

Bručas, D.; Giniotis V. 2009. Analysis of calibration data of position of circular scale strokes, *Journal of Vibroengineering* 11(1): 177–184.

Bručas, D.; Giniotis, V.; Augustinavičius, G.; Stepanovienė, J. 2010. Calibration of the multiangular prism (polygon), *Mechanika* 4(84): 62–66.

Bryan, J. B. 1990. International status of thermal error research, *Annals of the CIRP* 39(2): 645–656.

Chaziachmetovas, A. 2007. *Etaloninių ilgio matų lyginimo rezultatų įvertinimas dispersinės ir regresinės analizės metodais*: daktaro disertacija. Kaunas: KTU.

Convergent Laser Technologies, 2004. http://www.convergentlaser.com, Oakland, CA, USA.

Družovec, M.; Ačko, B.; Godina, A.; Welzer, T. 2009. Robust algorithm for determining line centre within a video positional measuring system, *Optics and Lasers in Engineering* 11(47): 1131–1138.

EA 4/02. 1999. Expressions of the uncertainty of measurements in calibration, pp. 2–79.

Ellenberger, S. L. 2000. Influence of defocus on measurements in microscope images, *Proefschrift Technische Universiteit Delft*, 171 p. ISBN 90-9013859-5

Evans, C. J. 1989. *Precision Engineering: An Evolutionary View*. Cranfield Press, Cranfield, England.

Favaro, P.; Soatto, S. 2006. *3-d Shape Estimation and Image Restoration: Exploiting Defocus and Motion blur*. Springer-Verlag. 263 p.

Flatscher, G., Dr. Johannes Heidenhain GmbH. 2003 12 30. *Reflective measuring scale graduation and method for its manufacture*. US patent number 6671092.

Flügge, J.; Dai, G. 2000. Design of the temperature measurement and control system at the PTB nanometer comparator, in *Proc. of the 1st Euspen Topical Conference on Fabrication and Metrology in Nanotechnology* 2: 303–309.

Flügge, J.; Dangschat, H.; Spies, A.; Tschirnich, J.; Pieles, H. 1999. Concept of a interferometric length comparator with measurement uncertainties in the nanometer scale, in *Tagungsband 1. Euspen Conference, Bremen.*

Flügge, J.; Köning, R. 2001. Status of the nanometer comparator at PTB, in *Proc. SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements* 4401: 275–283.

Flügge, J.; Köning, R. 2002. Recent developments at the PTB Nanometer Comparator, in *Proceedings 3rd Euspen Int. Conf.* 2: 589–592.

Gaidamovičiūtė, L. 2002. *Valstybinio galinių ilgio matų etalono komplekso kūrimas ir tyrimas:* daktaro disertacija. Kaunas: KTU.

Gao, W. 2010. *Precision Nanometrology: Sensors and Measuring Systems for Nanomanufacturing.* Springer, 369 p. ISBN:1849962537

Gonzalez, H.; Galvan, C.; Muñoz, J. A. 2003. Image processing automatic interferometric calibration system for line scales, in *Proceedings of the SPIE* 5190: 93–102.

Goodman, J. W. 1996. *Introduction to Fourier optics* (2nd ed.) McGraw-Hill book company, 491 p.

Guide to the expression of uncertainty in measurement. ENV 13005, 1999.

Hale, L. C. 1999. *Principles and Techniques for Designing Precision Machines.* Ph.D. Thesis, Lawerence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, California, 94551.

Inasaki, I. 2002. *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium.* Springer, 1007 p.

Jakštas, A. 2006. *Precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas:* daktaro disertacija. Kaunas: KTU.

Jakštas, A.; Kaušinis, S.; Barauskas R.; Barakauskas A.; Kasparaitis A. 2008. Software based control techniques for precision line scale calibration, in Proceedings of the 11th Biennial Baltic Electronics Conference 5(8): 223–226.

Jakštas, A.; Kaušinis, S.; Barauskas, R. 2006. Modelling of precision line scale comparator, *Mechanika* 2(58): 57–62. ISSN 1392-1207.

Jakštas, A.; Kaušinis, S.; Barauskas, R.; Barakauskas, A.; Kasparaitis, A. 2009. Refinements of Precision Line Scale Calibration System, in *Proceedings of the 14th International Conference, Mechanika-2009*, 137–140.

Jakštas, A.; Kaušinis, S.; Flügge, J. 2005. Investigation of Calibration Facilities of Precision Line Scales, *Mechanika* 53: 62–67. ISSN 1392-1207.

Jürgen von Martens H. 2002. Evaluation of uncertainty in measurements problems and tools, *Optics and Lasers in Engineering* 38: 185–206.

Kärhä, P.; Toivanen, P.; Manoochehri, F.; Ikonen, E. 1997. Development of a detector-based absolute spectral irradiance scale in the 380–900-nm spectral range, *Applied Optic* 36: 8909–8918.

Kasparaitis, A.; Skirmantas, R. 1991. Estimation of temperature variations during definition of CMM errors, *Machine Building* 22–53 (in Lithuanian).

Kaušinis, S. 2007. Mokslinio tyrimų projekto „Precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas 2007 m. ataskaita (metinė)“, 4–15. Kaunas.

Kaušinis, S. 2007. *Precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas.* Aukštųjų technologijų plėtros programos projektas, Reg. Nr. B-07039, ataskaita. 178 p.

Kaušinis, S.; Barakauskas, A.; Barauskas, R.; Jakštas, A.; Kasparaitis, A. 2008. Investigation of Vibrations of Line Scale Calibrations System, *Journal of Vibroengineering, Vibromechanika* 1:79–89. ISSN 1392-8716

Kaušinis, S.; Jakštas, A.; Barauskas, R.; Kasparaitis, A. 2006. Dynamic Mode of the Line Scale Calibration, *Solid State Phenomena* 113: 47–452. ISSN: 1012-0394

Kaušinis, S.; Jakštas, A.; Barauskas, R.; Kasparaitis, A. 2006. Investigation of Dynamic Properties of Line Scale Calibration Systems, in *Proceedings of IMEKO World Congress 2006, September 17–22, Rio de Janeiro, Brazil, Proceedings on CD*.

Kaušinis, S.; Jakštas, A.; Flügge, J.; Barauskas, R. 2004. 1D High Precision Interferometer-Controlled Comparator, in *Proceedings of the 9th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, Estonia*, pp. 195–199. ISBN 9985-59-462-2

Kaušinis, S.; Kasparaitis, A.; Barakauskas, A.; Barauskas, R.; Jakštas, A.; Kilikevičius, A. 2009. Line Scale Calibration in Non-Ideal Measurement Situation, *Solid State Phenomena* 147–149: 682–685.

Kažys, R.; Mažeika, L.; Šliteris, R.; Svilainis, L. 1998. Smart ultrasonic vision system for mobile robots, in *Proceedings of IAPR workshop on Macine Vision Applications, Chiba, Japan*, pp. 347–350.

Kažys, R.; Mažeika, L.; Šliteris, R.; Tumšys O. 2002. Application of ultrasonic binaural method for measurement of spatial coordinates. *Ultragarsas* 44(3): 31–33.

Kilikevičius, A. 2009. *Ilgio matavimo mechatroninio komparatoriaus dinaminių paklaidų tyrimas:* daktaro disertacija. Vilnius: VGTU.

Kilikevičius, A.; Jurevičius, M.; Berba, M. 2010. Research of dynamics of a vibration isolation platform, *Journal of Vibroengineering* 12(3): 361–367.

Kilikevičius, A.; Petraška, A.; Juraitis S. 2009. Measurement errors of comparator on carriage vibrations, *Journal of Vibroengineering* 11(4): 658–664.

Köning, R.; Flügge, J.; Bosse, H. 2007. A method for the In-Situ determination of Abbe errors and their correction, *Measurement Science Technologies* 18: 476–481.

Korpelainen, V.; Lassila, A. 2004. Online determination of the refractive index of air by ultrasonic speed of sound measurement for interferometric displacement measurements, in ODIMAP IV, 16–18 June 2004, University of Oulu, Finland.

Kunzmann, H.; Pfeifer T.; Flügge J. 1993. Scales vs. laser interferometers performance and comparison of two measuring systems, in *CIRP Annals, Manufacturing Technology* 42(2): 753–767.

Kuzas, P.; Žilinskas, R. P. 2008. Neapibrėžties vertinimas optiniuose granulių dydžių matavimuose, *Matavimai* 2(42): 32–36.

Levin, A.; Sand, P.; Cho, T. S.; Durand, F.; Freeman, W. T. 2008. Motion-Invariant Photography, *SIGGRAPH*, ACM Transactions on Graphics.

Li, J. W.; Zhang, W. J.; Yang, G.;S. Tu, S. D.; Chen X. B. 2009. Thermal-error modeling for complex physical systems: the-state-of-arts review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 42: 168–179.

Lipinski, G.; Larsonnier, F. 2000. Calibration of line standards with an optical microscope equipped with a CCD camera, in *Proceedings of 1st Euspen Int. Conf. on fabrication and metrology in nanotechnology* 2: 290–296.

Ma, Y. 2001. *Sensor Placement Optimization for Thermal Error Compensation on Machine Tools:* Ph.D. Dissertation, the University of Michigan, Michigan.

Merino, S.; Retolaza, A.; Juarros, A.; Landis, S. 2007. A new way of manufacturing high resolution optical encoders by nanoimprint lithography, *Microelectronics Engineering* 84: 848-852.

Moghaddam, M. E.; Jamzad, J. 2007. Linear Motion Blur Parameter Estimation in Noisy Images Using Fuzzy Sets and Power Spectrum, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 8. doi:10.1155/2007/68985

Nakazava, H. 1994. *Principles of Precision Engineering*, Oxford University Press, 267 p.

NIKON. 2008. NIKON measuring microscopes, MM–400/800 series, Code No.2CE-IDYH-4, 31 p.

Pauža, A.; Mikalauskas, K.; Augevičius, V.; Stankevičius, R. 2001. Calibration of platinum resistance thermometers in the framework points of ITS-90 scale, *Matavimai* 1(17): 23–27.

Račiukaitis, G.; Brikas, M.; Darčianovas, G.; Ruthe, D.; Zimmer, K. 2007. Laser structuring of conducting filmson transparent substrates, in *Proceedings of SPIE 6732, 67320C*.

Saulevičius, D. 2009. *Savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų atpažinimas*: daktaro disertacija. Vilnius: VGTU.

Sharr, H. 2000. Optimal operators in digital image processing, *Combined Faculties for the natural sciences and mathematics of Rupertus Carola University.*

Stauton, R. C. 1998. Edge operator error estimation incorporating measurements of CCD TV camera tarnsfer function, in *IEE Proceedings Visual Image Signal Processin*g 145: 229–235.

Swyt, D. A. 2001. Length and Dimensional Measurements at NIST, *Journal of Research of NIST* 106: 1–23.

Thalmann, R. 1997. A new High Precision Length Measuring Machine, in Progress in Precision Engineering and Nanotechnology, in *Proceedings of the 9-IPES/UME4. Braunschweig, Germany* 1: 112–115.

Trimeche, M. 2006. Super-Resolution Image Reconstruction Using Non-Linear Filtering Techniques: Ph.D. Thesis, Tampere University of Technology. 127 p.

Truchetet F.; Nicolier F.; Laligant O. 2001. Subpixel edge detection for dimensional control by artificial vision, *Journal of Electronic Imaging* 10: 234–239.

Tuan, P. Q. 2006. Spational adaptivity in superesolution of under-sampled image sequences: Ph.D. Thesis, Delft Technik University. 134 p.

Venkatesh, V. C.; Izman, S. 2008. *Precision Engineering*, McGraw-Hill Professional, ISBN-10: 0071548270, 418 p.

WDGM–7. 2003. *Preliminary comparison on nanometrology according to the rules of CCL key comparison Nano3, Line Scale Standards*, Final Report, Braunschweig, 119 p.

Webb, C. E.; Jones, J. D. C. 2004. *Handbook of laser technology and applications*, Institute of Physics, Bristol, 625 p.

WGDM–7. 2000. *Preliminary comparison on nanometrology according to the rules of CCL key comparisons Nano4, 1D gratings*, Final Report, Wabern, 34 p.

Yang, H. 2002. *Dynamic modeling for machine tool thermal error compensation:* Ph.D. Dissertation, the University of Michigan.

Yang, H.; Ni, J. 2005. Dynamic neural network modeling for nonlinear, nonstationary machine tool thermally induced error, in *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45(4–5): 455–465.

Chapman, A.; Horwood E. 1990. The development of critical angular measurement in *astronom. Dividing the circle* 1500–1850. New York, NY (USA), 209 p.

Bručas, D.; Giniotis, V. 2010. Calibration of precision polygon/autocollimator measurement system, *Journal of Physics: Conference Series* 238: 1–7. London, UK.

Lazėnas G., Mikuckis J., Miniotas A. 1982. Kampų matavimo prietaisų UDP pritaikymas preciziniams kampams matuoti, *Lietuvos staklininkystė* 13: 103–108. Vilnius: Mintis.

Wilkinson, J. R. 1987. Ring Lasers, Progress Quanum, *Electronics* 11: 1–103.

Yang, H.; Feng, G.; Zhou, S. 2011. Thermal effects in high-power Nd:YAG disk-type solid state laser, *Optics & Laser Technology* 43: 1006–1015.

Trelles M.; García-Solana L. Calderhead RG. 1999. Skin resurfacing improved with a new dual wavelength Er:YAG/CO_2 laser system: a comparative study, *J Clin Laser Med Surg. Jun* 17(3): 99–104.

Autoriaus mokslinių publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Sabaitis, D.; Giniotis, V.; Rybokas, M.; Dmitrijev, G. 2011. Peculiarities of producing and measuring circular scales, *Geodesy and cartography* 37(3): 125–128.

Giniotis, V.; Rybokas, M.; Dmitrijev, G.; Sabaitis, D.; Šiaudinytė, L.; Janulevičius, J. 2013. Mechatronic elements for measuring systems, *Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials V* 199: 332–337. Zurich: Trans Tech Publications Ltd. ISSN 1012-0394. ISBN 9783037856451 (INSPEC).

Bručas, D.; Šiaudinytė, L.; Rybokas, M.; Kulvietis, G.; Sabaitis, D. 2014. Increasing of the accuracy of vertical angle measurements of geodetic instrumentation, *Mechanika* 20(4): 426–430. Kaunas: Technologija. ISSN 1392-1207. (Web of Science); [Citav. rod.: 0,336(F) (2013)].

Straipsniai kituose leidiniuose

Šiaudinytė, L.; Sabaitis, D.; Bručas, D. 2013. Assumptions for development of the new centering – leveling device, in *12th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics: New Perspectives in Measurements*, *Tools and Techniques for Industrial Applications, June 6–7, 2013, Florence, Italy*. Florence: IMEKO, p. 1–5.

Šiaudinytė, L.; Sabaitis, D.; Rybokas, M. 2013. Mechatronic adjustment device for optical measuring systems, in *Proceedings X Semetro 2013: 10th International Congress on Electrical Metrology*, *September 25–27, Buenos Aires, Argentina*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnologia Industrial, p. 1–4.

Šiaudinytė, L.; Rybokas, M.; Sabaitis, D.; Giniotis, V. 2012. Analysis of newly developed methods of angle measurement, in *XX IMEKO World Congress: metrology for green growth. September 9−14, 2012, Busan, Republic of Korea.* Busan: Korea Research Institute of Standards and Sciences (KRISS), p. 1–3. ISBN 9788995000052.

Šiaudinytė, L.; Sabaitis, D.; Bručas, D.; Dmitrijev, G. 2015. Development of calibration equipment for geodetic angle measurement instruments, *Solid Stale Phenomena* Vols. 220-221 (2015) pp 396-400 Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.220-221.396.

Šiaudinytė, L.; Sabaitis, D.; Rybokas, M.; Bručas, D. 2015. Assumptions of centering – levelling device application in mechatronic angle measuring system, *Solid State Phenomena* Vols. 220-221 (2015) pp 391-395 Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.220-22l.391.

Patentas įregistruotas Lietuvoje

Sabaitis, Deividas (aut., išrad.); Šiaudinytė, Lauryna (aut., išrad.); Rybokas, Mindaugas (aut., išrad.); Giniotis, Vytautas (aut., išrad.). Optinių ir geodezinių prietaisų justavimo įrenginys: patentas. Vilnius, 2013.

Priedai

A priedas. Skalių matavimai optine matavimų sistema. Signalų apdorojimas
B priedas. CD skalės 1 brėžinys
C priedas. CD skalės 2 brėžinys
D priedas. Patentas: optinių ir geodezinių prietaisų justavimo įrenginys

Deividas SABAITIS

APSKRITIMINIŲ RASTRINIŲ SKALIŲ KOMPAKTINĖJE LAIKMENOJE TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Matavimų inžinerija (10T)

Deividas SABAITIS

RESEARCH OF CIRCULAR RASTER SCALES IN COMPACT DISK

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Measurement Engineering (10T)

2014 12 23. 11,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius