VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rimantas LAZDINAS

PRECIZINIŲ BRŪKŠNINIŲ ILGIO MATŲ KALIBRAVIMO PAKLAIDŲ TYRIMAS ĮTERPTINĖS METROLOGIJOS SĄLYGOMIS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MATAVIMŲ INŽINERIJA (10T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2007–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Albinas KASPARAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 1967-M mokslo literatūros knyga
http://leidykla.vgtu.lt

ISBN 978-609-457-052-0

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2011
© Rimantas, Lazdinas, 2011
r.lazdinas@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rimantas LAZDINAS

INVESTIGATION OF CALIBRATION ERRORS OF PRECISE GRADUATED LENGTH GAUGES UNDER EMBEDDED METROLOGY CONDITIONS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MEASUREMENT ENGINEERING (10T)

VGTU
LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Albinas KASPARAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T).

Reziumė

Augantis pasaulio gamybos robotizavimo lygis sąlygoja tikslių brūkšninių ilgio matų poreikį, kuris savo ruožtu skatina tokių matų gamybos procesų greitėjimą. Tai neįmanoma realizuoti be didelio precizinių skalių kalibravimo našumo. Reikalaujamam našumui pasiekti kuriama naujos matavimo sistemos ir metodai, leidžiantys neidealiomis metrologinėmis sąlygomis dinaminiu kalibravimo būdu pasiekti aukštą kalibravimo tikslumą. Disertacijoje tiriamas dinaminis brūkšninių ilgio matų kalibravimas bei pagrindiniai veiksniai, įtakojantys kalibravimo paklaidas.

Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad šiuo metu dinaminių kalibravimo sistemų klausimas aktualus ir nagrinėjamas daugelio valstybių metrologinių centrų. Šiame darbe iškeltiems uždaviniams spręsti sukurti matematiniai modeliai, analitiškai bei eksperimentiškai ištirti vaizdo gavimo procesas, temperatūriniai gradientai ir tiesaus judesio nuokrypiai bei įvertinta jų įtaką brūkšninių matų kalibravimo paklaidoms.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir išvados.

Įvadiniame skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomos autoriaus publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame 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. Skyriaus pabaigoje apžvelgti artimiausiai su disertacijos tema susijusių darbų rezultatai.

Antrajame skyriuje aprašomas skalių brūkšnių padėties nustatymo proceso modeliavimas ir pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai.

Trečiajame skyriuje 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.

Disertacijos tema paskelbti 3 straipsniai ir 7 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose: vienas – straipsnių rinkinyje, įtrauktame į duomenų bazės Web of Knowledge žurnalų sąrašą, du – INSPEC duomenų bazėje cituojamuose žurnaluose, trys – ISI Proceedings konferencijų, vienas – recenzuojamoje tarptautinių konferencijų bei trys – respublikinių konferencijų medžiagose.

Abstract

The growing global robotization level of production challenge the need of accurate measures of long scales, which in turn stimulates acceleration the production processes of such scales, which is impossible without high calibration performance of precision scales. To achieve the required performance are developed new measurement systems and methods to enable non-ideal metrological conditions of calibration and dynamic method to achieve high calibration accuracy. This dissertation has investigated the dynamic calibration of length gauges and the main factors affecting the calibration errors.

The literature review found that currently the question of dynamic calibration systems is relevant to many national metrological centers. The paper raised the tasks for creating mathematical models, analytical and experimental study of image acquisition process, temperature gradients and a linear motion deviations and assess their impact on calibration errors.

The thesis is divided into introduction, four chapters and conclusions.

The first chapter is dedicated for review of literature. It includes review of length scales, calibration methods and tools, and analysis of measurements errors of calibration systems and uncertainty components. Also the specific conditions of the calibration in embedded metrology requirements are set out. The chapter ends with the results overview of the most closely related topic of the thesis.

The second section of the line position detection modeling and errors analysis of system under consideration, process of line position detection and carried out experimental studies.

The third chapter describes the investigation of internal and external factors associated with temperature gradients, an influence of geometric motion deviations for the scale calibration errors.

The fourth chapter presents the intercomparative results of precision scales calibrations. The evaluated accuracy of comparator ensures traceability with a primary standard of length.

The results of thesis were printed 3 scientific papers, one of which are referred Web of Knowledge database, two papers are published by INSPEC database. The results of thesis were also announced in 7 conferences. Three – are quoted in conference proceedings database, one is printed in reviewed international journal, three papers are published in reviewed conference proceedings.

Žymėjimai

Simboliai

µm – mikrometras;

nm – nanometras;

20x – 20 kartų padidinimo;

50x – 50 kartų padidinimo;

S – vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis;

M – matematinės vilties įvertis.

Santrumpos

3D – trimatis vaizdas;

BE – baigtinių elementų;

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

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

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;

Pt100 – platininiai 100 omų varžos jutikliai temperatūrai matuoti;

PT – platininiai;

PK – personalinis kompiuteris;

PIK – precizinis ilgio komparatorius;

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

VTIF – vaizdo taško išplitimo funkcija;

NRC – Kanados nacionalinis metrologijos institutas;

METAS – Šveicarijos nacionalinis metrologijos institutas;

NMIJ – Japonijos nacionalinis metrologijos institutas;

KRISS – Korėjos nacionalinis metrologijos institutas;

MIKES – Suomijos nacionalinis metrologijos institutas;

LNE – Prancūzijos nacionalinis metrologijos institutas;

NIST – Jungtinių Amerikos valstijų nacionalinis metrologijos institutas;

CMS/ITRI – Kinijos (Taivano) nacionalinis metrologijos institutas;

SP – Švedijos nacionalinis metrologijos institutas;

IMGC – Italijos nacionalinis metrologijos institutas;

NIM – Kinijos nacionalinis metrologijos institutas;

VNIIM – Rusijos nacionalinis metrologijos institutas.

Turinys

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

1. BRŪKŠNINIAI ILGIO MATAI IR KALIBRAVIMO PRIEMONĖS 5
1.1. Ilgio matų skalės ir jų paklaidos 5
1.2. Specifiniai kalibravimo įterptinės metrologijos sąlygomis reikalavimai 10
1.3. Ilgio matų kalibravimo sistemos 15
1.4. Ilgio matų kalibravimo paklaidų analizė 26
1.5. Kalibravimo neapibrėžties įverčio sandai 30
1.6. Artimiausiai susijusių su disertacija tyrimų apžvalga 32
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždaviniai 34

2. BRŪKŠNIO PADĖTIES ĮVERTINIMO PROCESO TYRIMAS 35
2.1. Rastrinio piešinio vaizdo modeliavimas ir brūkšnio padėties paklaidos analizė 35
2.2. Vaizdo apšvietimo netolygumo kompensavimo metodika 43
2.3. Brūkšnio detektavimo algoritmo analizė 51
2.4. Brūkšninių ilgio matų kalibravimo eksperimentiniai tyrimai 66
2.5. Antrojo skyriaus išvados 72

3. TYRIMAS KALIBRAVIMO PAKLAIDŲ, KYLANČIŲ DĖL IŠORINIŲ TRIKDŽIŲ 73
3.1. Temperatūriniai kalibravimo proceso faktoriai 73
3.2. Precizinis temperatūros matavimas 78
3.3. Patalpos temperatūros gradientų tyrimas 80
3.4. Komparatoriaus mikroskopo temperatūriniai laukai ir deformacijos 82
3.5. Komparatoriaus lazerinio interferometro temperatūriniai laukai ir deformacijos 89
3.6. Tiesaus judesio nuokrypių įtaka kalibravimo paklaidoms 92
3.7. Trečiojo skyriaus išvados 104

4. KALIBRAVIMO SISTEMOS KOMPLEKSINIO TIKSLUMO TYRIMAS 105

BENDROSIOS IŠVADOS 111

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI 113

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS DISERTACIJOS TEMA 113

Contents

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

1. LENGTH GAUGES AND THEIR CALIBRATION SYSTEMS
1.1. Length gauges and their errors 5
1.2. Specific requirements of the calibration under the embedded metrology conditions 10
1.3. Calibration system of lenght gauges 15
1.4. The analysis of calibration system errors 26
1.5. The components of calibration uncertainty 30
1.6. The review of works closely related to this thesis 32
1.7. Conclusions of 1st chapter and tasks of the thesis 34

2. INVESTIGATION OF LINE POSITION DETECTION PROCESS 35
2.1. Raster image modeling and analysis of the line position errors 35
2.2. Compensation methodology of image illumination distorsion..... 43
2.3. Line detection algorithm analysis..... 51
2.4. Experimental research of graduated length gauges calibration 66
2.5. Conclusion of 2th chapter..... 72

3. INVESTIGATION OF CALIBRATION ERRORS, ARISING DUE TO EXTERNAL INTERFERENCE FACTORS 73
3.1. Temperature factors of calibratio process..... 73
3.2. Precision measurement of temperature..... 78
3.3. Study of room temperature gradients 80
3.4. Temperature fields and deformations of comparator microscope 82
3.5. Temperature fields and deformations of comparator laser interferometer 89
3.6. The impact of linear motion deviations to calibration errors..... 92
3.7. Conclusion of 3th chapter..... 104

4. RESEARCH OF COMPLEX CALIBRATION SYSTEM ACCURACY 105

GENERAL CONCLUSIONS 111

REFERENCES 113

LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION 113

Įvadas

Problemos aktualumas

Brūkšniniai ilgio matai plačiai naudojami kaip palyginimo matai linijiniams poslinkiams CNC (angl. computer numerical control) staklėse, koordinatinėse bei kitose matavimo priemonėse, daugelyje kitų technologinių, automatizacijos ir kitos paskirties tikslių 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 ilgio vieneto etalonu klausimą. Gamybą užtikrinantis kalibravimas turi būti realizuotas įterptinės metrologijos sąlygomis, tai yra, kai nesudaromos etaloninės kalibravimo sąlygos. Kartu turi būti tenkinami našumo reikalavimai. Šių problemų sprendimas įmanomas atliekus kompleksinius proceso tyrimus ir optimizavimą.

Tyrimų objektas

Darbe tiriamos precizinių brūkšninių ilgio matų dinaminio kalibravimo paklaidos. Tyrimas apima:

- panašių sistemų ir šiai problemai spręsti skirtų tyrimų analizę;

- brūkšnių padėties nustatymo algoritmo sukūrimą, jo analizę, optimizavimą, matematinių modelių sprendimo metodus;
- vidinių ir išorinių trikdžių poveikį kalibravimo tikslumui ir poveikio minimizavimą;
- geometrinių paklaidų analizę, jų kompensavimo metodus ir priemones.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – ištirti dinaminio skalių kalibravimo proceso ypatumus, įvertinti šio proceso paklaidas ir sukurti metodus ir technines prielaidas gerinti tiksliųjų kalibravimo sistemų kokybę. Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Remiantis moksline literatūra apibendrinti ilgio kalibravimo sistemų ir brūkšninių ilgio matų žinias.
2. Sudaryti brūkšninių matų skalių vaizdo stebimo per mikroskopą fizinį modelį ir jį ištirti.
3. Sudaryti precizinių ilgio matų dinaminio kalibravimo metodiką, analitiškai ir eksperimentiškai ištirti kalibravimo tikslumą įtakojančių faktorių (matavimo greičio, apšvietos, ekspozicijos, vėlinimo) poveikį ir optimizuoti jų reikšmes.
4. Analitiškai ir eksperimentiškai ištirti išorinių ir vidinių temperatūrinių trikdžių įtaką kalibravimo tikslumui, sukurti priemones jų poveikio kalibravimo paklaidoms sumažinti.
5. Ištirti ir minimizuoti tiesaus judesio geometrinių paklaidų įtaką kalibravimo tikslumui.
6. Atlikti palyginamuosius pavyzdinių matų kalibravimus, įvertinti sukurtosios sistemos efektyvumą.

Tyrimų metodika

Teoriniai tyrimai remiasi vaizdų apdorojimo teorijos, teorinės optikos, mechatronikos ir matavimų teorijos principais. Sukurti ir analizuoti matematiniai sistemų modeliai. Rezultatai gauti taikant analitinius, empirinius ir skaitinius tyrimo metodus.

Linijinių brūkšninių skalių kalibravimo empiriniai tyrimai atlikti UAB „Precizika Metrology“ termokonstantinėse laboratorijose artimomis gamybinėms sąlygomis. Sukurtame komparatoriuje panaudoti preciziniai linijinių poslinkių įrenginiai, ZMI2000 ir HP5526A lazeriniai interferometrai, HH41 etaloninis termometras, PP2 daugiakanalis temperatūros matuoklis, MM40 „Nikon“ mikroskopas, skaitmeninė kamera ir kiti įrenginiai.

Darbo mokslinis naujumas

1. Atskleisti ilgio matų brūkšnių padėties dinaminio kalibravimo, veikiant išoriniams ir vidiniams trikdžiams, dėsningumai, sudarytos prielaidos, programinės ir aparatinės priemonės metodo įgyvendinimui.
2. Pasiūlyti kalibravimo sistemos tikslumą veikiančių temperatūros laukų ir tiesaus judesio geometrinių paklaidų valdymo ir jų poveikio minimizavimo principai.
3. Sukurti, ištirti ir pritaikyti precizinių brūkšninių ilgio matų optimizuotieji dinaminio kalibravimo metodai, algoritmai ir matematiniai modeliai.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

1. Išspręstas kompleksinis kalibravimo uždavinys apimantis aparatinių, programinių ir metodinių priemonių sukūrimą, užtikrinančių pakankamą aukščiausio pasaulinio lygio periodinės ir kodinės struktūros precizinių linijinių skalių kalibravimo tikslumą.
2. Kalibravimo priemonių kompleksas įdiegtas gamyboje ir naudojamas linijinių skalių, eksportuojamų į pirmaujančias pasaulyje keitiklių kūrime ir gamyboje įmones, kalibravimui.
3. Sukurtas Lietuvos brūkšninių ilgio matų valstybės etalono prototipas ir užtikrinta sietis su pirminiu ilgio vieneto etalonu.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurta veiksminga precizinių linijinių brūkšninių ilgio matų dinaminio kalibravimo metodika įterptinės metrologijos sąlygomis.
2. Sudarytas skalių brūkšnių padėties radimo skaitmeninėmis vaizdo priemonėmis proceso modelis įvertina optinių iškraipymų, judesio ir apšvietimo faktorių įtaką skalių kalibravimo tikslumui.
3. Įdiegta vidinių ir išorinių neigiamų veiksnių poveikio valdymo metodika, priemonės ir programinė matematinė įranga užtikrina brūkšninių iki 3400 mm ilgio matų kalibravimo išplėstinę neapibrėžtį (0,04–0,89 μm), esant aprėpties koeficientui 2,1.
4. Sukurtas ilgio matų kalibravimo priemonių kompleksas užtikrina sietį su pirminiu ilgio vieneto etalonu.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbta 3 straipsniai recenzuojamuose moksliniuose žurnaluose: vienas – straipsnių rinkiniuose, įtrauktuose į Web of Knowledge sąrašus, du – INSPEC duomenų bazėje cituojamuose žurnaluose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 7 mokslinių konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*“, Vilniuje, 2007 m.;

Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“, Vilniuje, 2010–2011 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „*REM 2007*“, Talinas, Estija, 2007 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „*REM 2008*“, Bergamo, Italija, 2008 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“, Bialystok, Lenkijoje, 2008 m.;

Tarptautinėje konferencijoje „*Mechanika*“, Vilniuje, 2010–2011 m.

Disertacijos struktūra

Darbą sudaro įvadas, 4 skyriai, išvados, literatūros sąrašas, publikacijų sąrašas. Bendra disertacijos apimtis – 120 puslapiai, 59 iliustracijos, 2 lentelės ir 95 formulės. Rašant disertacija buvo cituojama iš 94 literatūros šaltinių.

1

Brūkšniniai ilgio matai ir kalibravimo priemonės

Skyriuje analizuojamas rastrinių skalių brūkšnių paklaidos susijusios su gamybos procesu, pateikti skalės brūkšnių formos ir padėties nuokrypiai, nustatomi reikalavimai dirbant įterptinės metrologijos sąlygomis, apžvelgtos moderniausios kalibravimo priemonės, pateikti kitų tyrimų, susijusių su šios disertacijos tematika, rezultatai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir darbo tikslai.

1.1. Ilgio matų skalės ir jų paklaidos

Linijinės skalės yra ilgio matavimo priemonės, turinčios periodinę gradaciją. Gradacija daroma ant substrato – stiklinės, metalinės ar kitos medžiagos liniuotės ar juostos. Labai ilgoms linijinėms skalėms naudojama plieninė, dažniausiai nerūdijančio plieno, juosta. Trumpoms nedidelio tikslumo liniuotėms naudojamas polimerinis substratas, ant kurio gradacija spausdinama. Gradaciją sudaro vienodo pločio brūkšniai ir tarpai tarp jų. Kai brūkšnio plotis ir tarpo plotis lygus, tai toks brūkšnių išdėstymas vienoje linijoje vadinamas rastru.

Yra labai įvairių būdų išgauti rastrinę struktūrą ant substrato. Tai priklauso nuo reikalaujamo linijinės skalės tikslumo, gamybos kainos ir kitų rodiklių. Šiuo

metu naudojami lazeriniai dangų abliavimo įrenginiai (Račiukaitis *et al.* 2007), spausdinimo ir kitos dažų užnešimo technologijos, mechaninio įbrėžimo, įspaudimo įrenginiai. Precizinė rastrinė struktūra ypač tikslioms ilgoms liniuotėms, naudojamoms pramoniniuose įrenginiuose, dažniausiai gaminama litografijos proceso būdu (Flatscher 2003). Precizinės skalės gaminamos ant ilgos stiklinės liniuotės, kurios viena plokštuma padengta ypač kieta chromo plėvele, arba plieninė juosta su aukso plėvelės danga. Abiem atvejais, litografijos proceso metu suformuojamos tam tikrų brūkšnio matmenų skalė ar kelios skalės per visą liniuotės ilgį.

Šiuo metu dažniausiai gaminamos precizinės liniuotės skalės rastro struktūros periodas yra nuo 1 µm iki 40 µm, o brūkšnio ilgis siekia iki keliolikos milimetrų. Esant tokiam tankiam brūkšnių išdėstymui ir mažam brūkšnių pločiui, keliami ypatingi reikalavimai brūkšnių kraštams. Skenuojant precizinę liniuotę fotoelektrinėmis matavimo galvutėmis, brūkšnių kraštų parametrai tiesiogiai įtakoja matavimo galvutės signalą.

Litografijos metu etaloninis piešinys pernešamas ant gaminamos liniuotės ruošinio. Etaloninis piešinys formuojamas ant skaidraus, iš vienos pusės padengto chromo plėvele, dažniausiai stiklinio substrato, kurio storis būna nuo 4 mm iki 12 mm bei padengto fotorezistyvine plėvele, multiplikuojant nedidelį, kelių šimtų mikrometrų brūkšnių fragmentą. Fragmentas dažniausiai būna išdidintas du ar keturis kartus, nes multiplikavimo įrenginys turi atitinkama mažinanti objektyvą. Multiplikuojant sumažinama fragmento žingsniavimo paklaida, tačiau nuo to gali pablogėti brūkšnio krašto kokybė. Jei ant liniuotės turi būti kelios skalės, mašina gražinama į pradinį atskaitos tašką, pakeičiamas fragmentas ir formuojama sekanti skalė. Dėl to esant dideliam ilgiui, gali atsirasti tarp suformuotų skalių brūkšnių fazinis poslinkis. Po to seka fotorezisto plėvelės fiksavimo, plovimo, piešinio ėsdinimo, plovimo ir valymo procedūros. Tokiu būdu pagaminamas skalės originalas (kaukė), kurio piešinys bus perkeliamas ant produkcijos.

Jau apie dešimtmetį originalai gaminami kieto kūno lazeriais. Nanosekundiniai ar pikosekundiniai nedidelės ir vidutinės galios lazeriai geba abliuoti 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 ilgyje neatsiranda fazinis poslinkis tarp suformuotų brūkšnių linijų.

Litografijos proceso privalumai:

- procesas lengvai suderinamas;
- gaunama labai gera brūkšnio formos kokybė (kampai neužsiapvalina, brūkšnio kraštas tolydus);
- brūkšnius galima formuoti įvairiu kampu (tai nepriklauso nuo multiplikavimo mašinos pirminio rastrinio elemento pozicionavimo).

Pagrindiniai 2D skalės gamybos ištisiniu lazeriniu metodu privalumai:

- procesas greitas ir užtikrina didelį našumą;
- kodinė struktūra formuojama dinaminiame režime;
- visų brūkšnių orientacija vienoda.

Originalo skalės vaizdas perkėlimas ant gaminio specialia mašina, ant kurios originalas pritvirtinamas ir ant viršaus uždedamas gaminamosios liniuotės ruošinys. Ruošinys atremiamas į specialiai paruoštas atramas ir apšviečiamas ultravioletine šviesa. Ruošinio prigludimas prie originalo ir atramų įtakoja kopijuojamos liniuotės brūkšnių išsidėstymą ir kraštų kokybę.

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

$$\Delta_{\Sigma} = \sum_{j=i}^{k} \Delta_j \xi \pm t \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 \xi_i^2} \ , \qquad (1.1)$$

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. Žemiau vardinami gauti suminės skalių formavimo paklaidų skaičiavimo rezultatai.

Tikslaus originalo fragmento pozicionavimo metodui – $\Delta_{\Sigma ip}$ = +/-3,09 µm. Pagrindiniai šios paklaidos sandai:

- originalo fragmento rastrinio piešinio padėties jo bazinių paviršių atžvilgiu paklaida;
- originalo fragmento sugriebimo paklaida, manipuliatoriaus pozicionavimo paklaida.

Originalo fragmento ir ruošinio žymių sutapdinimo metodui – $\Delta_{\Sigma\check{z}i}$ = +/-1,40 µm. Pagrindinis paklaidos sandas – sutapdinimo žymių ant ruošinio išdėstymo paklaida.

Ištisiniam fotolitografiniam metodui – $\Delta_{\Sigma fc}$ = +/-1,03 µm. Pagrindiniai šios paklaidos sandai:

- originalo formavimo įrenginio tiesaus judesio linijinė paklaida rastro formavimo plokštumoje statmenai pagrindiniam judesiui; mechaninis ir terminis dreifas išilgai formuojamos skalės, vykstantis tarp atskirų rastrinių takelių eksponavimo pradžių;

- rastro formavimo sistemos ir ruošinio santykinio poslinkio matavimo paklaida.

Ištisiniam lazeriniam metodui – $\Delta_{\Sigma li}$ = +/-0,84 µm. Pagrindiniai paklaidos sandai: mechaninis ir temperatūrinis dreifas išilgai formuojamos skalės, vykstantis tarp atskirų rastrinių takelių eksponavimo pradžių; originalo formavimo įrenginio tiesaus judesio linijinė paklaida rastro formavimo plokštumoje statmenai pagrindiniam judesiui; rastro formavimo sistemos ir ruošinio santykinio poslinkio matavimo paklaida.

Skaičiuojant sumines paklaidas buvo priimtos šios prielaidos:

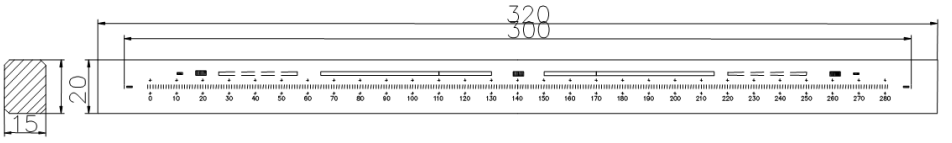
- Visų metodų paklaidos skaičiuojamos sąlyginai vienodam įrenginių tikslumui 95 % (+/-2*S*) pasikliovimo intervalui
- Atlikta visų sisteminguųjų paklaidų kompensacija ir korekcija;
- Visi technologiniai procesai vykdomi termokonstantinėje aplinkoje (temperatūra ir jos stabilumas laboratorijos kontroliniame taške 20 +/- 0,2 °C; temperatūros gradientas erdvėje – vertikalus 0,05 °C/m, horizontalus 0,2 °C/m; temperatūros gradientas, priklausantis nuo laiko 0,05 °C/h.

Tiriama ilgio matų komparavimo sistema gali kalibruoti ne tik rastrines skales, bet ir brūkšninius ilgio matus. Brūkšniniai ilgio matai gaminami litografijos būdu arba įbrėžiant ploną dangą su specialiai užgaląstu deimantiniu rėžtuku. Piešinys formuojamas naudojant lazerines technologijas arba specialias multiplikavimo mašinas. Brūkšninių matų tiesioginė paskirtis mašinų kalibravimui arba sieties perdavimui (Gaidamovičiūtė 2002). Todėl jų brūkšniams taikomi griežtesni reikalavimai, jie gaminami ant ruošinių iš specialių medžiagų, kurios turi labai stabilų temperatūros plėtimosi koeficientą arba labai mažą lyginant su stiklo plėtimosi koeficientu. Stabilaus temperatūros plėtimosi koeficiento matai pagaminti iš metalo lydinių (Invar, Super Invar, Invar 36, NILO 36, Pernifer 36, ASTM F-15, NILO K, Pernifer 2918, Rodar, Dilvar P1) turi ypatingą profilį (H formos, X formos) ir jų pernešamas ilgis neviršija 1m. Matai pagaminti iš specialios stiklo keramikos (Zerodur, Ceran, Suprasil) turi ypatingai mažą temperatūros plėtimosi koeficientą ir būna iki 600 mm ilgio. Šias stiklo keramikas 2000 metais pramoniniu būdu pradėjo gaminti Vokietijos firma „Schott AG“. Iki tol, šios medžiagos buvo gaminamos laboratorijose (Bosse and Flügge 2002).

Paskutinis tarplaboratorinis nacionalinių metrologijos institucijų ilgio komparatorių palyginimas vyko programoje NANO3 (WDGM–7 2003). Palyginimo tyrimams buvo pasirinktas precizinis brūkšninis ilgio matas, kurį galėjo kalibruoti daugumą šios programos dalyvių. Ilgio mato brūkšnių parametrai buvo parinkti pagal dalyvių turimą įrangą. Visų dalyvių komparatorių matavimo sistemoje buvo įvairios optinės regos sistemos ir lazeriniai interferometrai. Brūkšninis ilgio matas buvo pagamintas iš Zerodur, kadangi šios medžiagos temperatūros plėtimosi koeficiento dreifas bėgant laikui mažiausias, o kompara-

torių palyginimo tyrimo programa truko apie du metus. Šį matą pagamino Vokietijos įmonė Dr. Johanes Heidenhain bendradarbiaudama su Vokietijos nacionaline metrologijos institucija PTB.

Brūkšninio mato matmenys: mato ilgis 320 mm, 20 mm plotis ir 15 mm aukštis. Pagrindinė rastrinė struktūra – 280 mm ilgio skalė su 1 mm ilgio ir 4 µm pločio brūkšniais. Brūkšniai išdėstyti kas 1 mm, kas dešimtas brūkšnys turi skaitinę žymę. Tai pat mikroskopo kameros kalibravimui ant mato yra rastrai, sudaryti iš 49 brūkšnių turintis 1 µm, 2 µm, 10 µm ir 100 µm periodus. Ribinių matmenų pavieniai objektai išdėstyti dviejose grupėse, o jų matmenys kinta nuo 400 µm iki 0,5 µm. Kalibruojami pagrindinio takelio brūkšniai visame 280mm ilgyje kas 5 mm ir kiekvienas brūkšnys nuo pradžios iki 20 mm. Taip pat kalibruojami pasirinkti ribinių matmenų objektai.



1.1 pav. Brūkšninis matas skirtas palyginamiesiems matavimams
Fig. 1.1. Graduated gauge for interlaboratory comparison

Ilgio mato danga pagaminta litografijos būdu ant didelio atspindžio chromo dangos. Mato brūkšniai – atspindinčios linijos skaidriame fone. Skalės paviršiaus plokštumo nuokrypis mažesnė nei 0,5 µm, jei skalė pastatoma Beselio taškuose ant atramėlių. Skalės ruošinys – cilindro formos Zerodur lydinys, išlietas 1987 metais. Skalė tarplaboratoriniam komparatorių patikrinimui išpjauta iš centrinės ruošinio dalies taip, kad jos mechaninės savybės būtų simetriškos geometriniam skalės centrui.

Vokietijoje buvo tiksliai išmatuotas šios skalės temperatūrinis plėtimosi koeficientas. PTB laboratorijoje įmanoma išmatuoti šį koeficientą su 2×10^{-10} K^{-1} neapibrėžtimi įvertinant slėgį $0{,}04\times10^{-10}$ hPa tikslumu. Temperatūrinis plėtimosi koeficientas matuojamas 10–30 ^{o}C temperatūrų diapazone lėtai keičiant temperatūrą. Pakeitus per 10 ^{o}C temperatūrą ir sugrąžinus į 20 ^{o}C, skalė relaksuoja apie vieną savaitę, kol jos ilgis nesiskiria nuo pradinio per 10 nm.

Zerodur charakteristikos:

temperatūrinis plėtimosi koeficientas:

$\alpha = [1{,}826\text{-}0{,}229(t\text{-}20)]\times10^{-8}K^{-1}$,

$U_\alpha = 6\times10^{-10}$ K^{-1}.

ilgio spūdumas:

$dL_p/L_p = -5{,}76\times10^{-10}$ hPa^{-1},

$U_{dLp/Lp} = 0{,}08\times10^{-10}$ hPa^{-1}.

Šių charakteristikų duomenys, įtraukiant į matavimo paklaidą, jų įtaka kintant temperatūrai kelių dešimtųjų laipsnio ribose ir atmosferiniam slėgiui keliasdešimt hPa, šio mato ilgiui sudaro tik keletas dešimtųjų nanometro.

Precizinių ilgio matų temperatūros plėtimosi koeficientas žinomas su pakankamai dideliu tikslumu, tačiau komercinių stiklinių rastrinių skalių temperatūros plėtimosi koeficiento neapibrėžtis didelė. Tą sąlygoja gaminamo stiklo procesas, naudojamos medžiagos ir kiti faktoriai, todėl kiekvienoje stiklo partijoje šis koeficientas svyruoja nuo 7,5–9,8×10^{-6} K^{-1}. Matuoti tiksliai stiklo plėtimosi koeficientą kiekvienai rastrinių liniuočių serijai užtruks žymiai ilgiau nei tos skalių serijos pagaminimas.

Vienas pagrindinių ilgio mato brūkšnio parametras apibūdinantis brūkšnio krašto kokybę, yra krašto šiurkštumas. Kalibruojant precizinį ilgio matą įvairiomis priemonėmis su skirtingomis charakteristikomis, skiriamas ypatingas dėmesys brūkšnio kraštų šiurkštumui ir lygiagretumui.

PTB laboratorijoje sukurtas specialus ilgio matų originalų 2D komparatorius LMS 2020 (Flügge *et al.* 1999), kuris turi lazerinę interferometrinę 2D pozicijos nuskaitymo sistemą ir plyšinį skenuojantį mikroskopą, kuriuo buvo tyriami palyginimo tyrimuose pasirinkto ilgio mato brūkšnių kraštai. Gautas šiurkštumo įvertis 15 nm.

1.2. Specifiniai kalibravimo įterptinės metrologijos sąlygomis reikalavimai

Vienas sudėtingų iššūkių, su kuriais susiduria mokslas ir aukštųjų technologijų pramonė, yra vis didėjantis poreikis įterpti susietąją ilgio metrologiją tiesiogiai į technologinius procesus, atliekant tikslius dinaminius matavimus žymiai sudėtingesnėje negu kalibravimo laboratorijų aplinkoje (Kaušinis 2007). Aukštųjų technologijų pažanga kelia vis aukštesnius ilgio matavimo tikslumo kalibravimo reikalavimus, todėl jų įgyvendinimui reikia naudotis pažangiausiomis idėjomis ir priemonėmis, kuriomis remiantis galima pagrįsti ilgio kalibravimo sistemų tobulinimo kryptis ir sudaryti kalibravimo metodologijas.

Daugelyje šalių komparatoriai buvo kuriami tenkinti tam tikram iškeltam uždaviniui, atsižvelgiant į turimą valstybinį mato etaloną ir kitus pamatinius matus, metrologijos centrų kalibravimo galimybes ir poreikius. Kuriant naują sistemą jos tikslumo charakteristikos nustatomos individualiai, atlikus išsamius matavimo neapibrėžties sando tyrimus.

Projektavimo stadijoje labai svarbu turėti kuriamos sistemos numatomą matavimo neapibrėžties sando sandarą, kuris apsprendžia kokio dydžio paklaidos bus leidžiamos atskiriems precizinės mašinos mazgams (Jakštas 2006, Kaušinis *et al.* 2006). Tinkamai parinkti sprendimais, leidžia pasiekti, kad paklaidos de-

damosios taptų sistemingosios, nei atsitiktinės, ir nustačius tokių paklaidų dėsningumus naudoti paklaidų kompensavimo metodus.

Ilgio kalibravimo tikslumą labiausiai įtakoja temperatūra: interferometrinių sistemų jautris temperatūros svyravimams, medžiagų šiluminis plėtimasis, veikiantis mechaninių struktūrų geometrinių matmenų stabilumą. Precizinės kalibravimo sistemos paprastai talpinamos etaloninėse (kondicionuojamose) patalpose, kuriose užtikrinamas temperatūros stabilumas 20±0,2 ^{o}C, o atliekant kalibravimo procedūras temperatūros stabilumas gali būti išlaikomas iki 0,04 ^{o}C per parą (Flügge *et al.* 1993).

Šiuo metu temperatūros matavimams naudojama 1990 metais įteisinta tarptautinė temperatūros skalė ITS-90, kuri remiasi gerai atgaminamų termodinaminės pusiausvyros būsenų bei joms apibūdinti nustatytais fiksuotais taškais, atitinkančiais tam tikrą temperatūrą. Dažniausiai naudojami 2 būdingieji fiksuoti taškai: vandens trigubojo taško (0,01 ^{o}C) ir galio lydymosi taškas (29,7646 ^{o}C), kurių temperatūros matavimo neapibrėžtys 0,1 mK. Matuojant varžiniais termometrais ITS-90 temperatūrų nustatymo neapibrėžtį lemia tokios sisteminės paklaidos: interpoliavimo prietaisų stabilumas, būdingųjų fiksuotų taškų atitiktis, platinos cheminis grynumas, paklaida dėl savaiminio keitiklių įšilimo, aplinkos slėgio įtaka; pasiekiama matavimo neapibrėžtis u = 10 mK per metus, o tokių prietaisų matavimo tikslumas 1 mK (Pauža 2001).

Temperatūros matavimo metodai ir matavimo priemonių veikimo principai, naudojami ilgio matų komparatoriuose nesiskiria nuo anksčiau aprašytųjų. Daugiausia problemų kelia jutikliai, jų konstrukcijos ir tvirtinimo prie komparatorių arba ilgio matų būdai. Šie matavimai atliekami platinos (PT) varžos jutikliais ir termoelektriniais termometrais (termoporos).

Anglijos Nacionalinės fizikinės laboratorijos interferometre, skirtame absoliučiam galinių matų ilgio matavimui nuo 100 mm iki 1500 mm, oro ir galinio mato temperatūros matavimui ITS-90 skalėje naudojami etaloniniai platinos varžos termometrai.

Ilgio matavimo neapibrėžtis, esant pasikliovimo koeficientui 95 %, yra:

$-14\ \text{nm} + 27\ \text{nm} + 1{,}15\times10^{-8}\,L \pm 6{,}12\times10^{-8}\,L$

Jos oro matavimo temperatūros sandas: $\pm\ 8{,}58\times10^{-10}$ L arba ± 0,926 mK. Galinio mato temperatūros korekcijos sandas: $\pm\ 1{,}13\times10^{-8}$ L arba ± 1,05 mK.

Atliekant Rusijos ir Suomijos nacionalinių ilgio vieneto brūkšninio ir galinio iki 1000 mm etalonų palyginimus temperatūros matavimams buvo naudojami 100 omų platinos varžos jutikliai.

Suomijos galinių matų iki 1000 mm ilgio interferometre temperatūra matuojama platinos varžos jutikliais PT100. Jų atlikti tyrimai vienų metų bėgyje parodė, kad jutiklių varža kinta. Perskaičiavus į temperatūros vertes, pakitimas siekia iki 10 mK. Jutiklių smūginiai sutrenkimai sukelia pakitimus iki 20 mK. Jutiklių kalibravimas atliekamas kas metai.

Šveicarijoje pagamintos didelio tikslumo ilgio matavimo (iki 700 mm) mašinos neapibrėžties sandas, susijęs su temperatūros matavimais, yra 0,003 °C.

Vokietijos nacionalinės metrologijos institucijos ilgio matų komparatoriuose naudojami dviejų tipų jutikliai: termoelektriniai (termoporos) ir platinos elektros varžos. Termoelektriniai jutikliai yra mažo jautrumo (mažas santykinis signalo pakitimas) ir matuoti temperatūrą su maža neapibrėžtimi praktiškai neįmanoma. Jų neapibrėžties vertės yra nuo 10 mK iki 50 mK.

Įterpiant susietąją ilgio metrologiją į technologinius procesus ir adaptuojant ją gamybinei aplinkai, kur galimi dideli temperatūriniai gradientai ir greiti temperatūros pokyčiai, tikrąją temperatūrą išilgai lazerio spindulio tradiciniais metodais nustatyti sunku (Yang 2002, 2005). Disertacijoje keliamas uždavinys nustatyti pakankamu tikslumu temperatūrą išilgai lazerio spindulio. Ši temperatūra reikalinga paskaičiuoti oro lūžio koeficientui. Realiomis kalibravimo sąlygomis įmanomas temperatūros matavimas tik atskiruose taškuose, be to temperatūros keitiklių inercija didelė – nuo kelių sekundžių iki kelių minučių. Tai didina matavimo paklaidas, ypač matuojant ilgas skales (Ma 2001).

Gamybinėmis aplinkos sąlygomis ilgio kalibravimo neapibrėžtį galima ženkliai sumažinti, nustačius efektyviąją kalibravimo aplinkos temperatūrą ir įvertinus pagal ją etaloninio lazerio spinduliuotės bangos ilgio pataisas.

Komparatoriaus laboratorijoje temperatūros, drėgmės ir slėgio duomenų rinkimui naudojamas daugiakanalis temperatūros matavimo modulis PP2, sukurtas PTB (Flügge 1993), o jų kaupimui ir pataisų skaičiavimui – PK. Oro lūžio rodiklis apskaičiuojamas pagal modifikuotą Edleno formulę:

$$n = 1 + 3{,}8369 \times 10^{-7}\, p\left[\frac{1 + p\left(0{,}817 - 0{,}0133T\right) \times 10^{-6}}{1 + 0{,}003661T}\right] - 5{,}607943 \times 10^{-8} f\,, \qquad (1.2)$$

$$f = \frac{RH}{100}\left[4{,}07859739 + 0{,}4401857T + 0{,}00232093T^2 + 0{,}00045785T^3\right], \qquad (1.3)$$

čia p – atmosferos slėgis, T – oro temperatūra, f – dalinis vandens garų slėgis, RH – santykinė oro drėgmė.

Kadangi Edleno formulėje naudojama vidutinė temperatūra (Bonsch 1998, Birch 1994), tai praktiškai nuo efektyviosios temperatūros nustatymo tikslumo priklauso oro lūžio rodiklio nustatymo tikslumas bei neapibrėžties komponentės dydis, kurį įneša oro lūžio rodiklio pokyčiai.

Oro lūžio rodiklio nustatymo pagal modifikuotos Edleno lygtys tikslumą lemia aplinkos parametrų matavimo tikslumas. Parametrų eiliškumas pagal parametro įtaką matavimo tikslumui: temperatūra, slėgis, santykinė oro drėgmė bei CO_2 koncentracija.

Lūžio koeficiento reikšmes realiame laike ir erdvėje galima apskaičiuoti, panaudojant efektyviosios oro lūžio rodiklio priklausomybę nuo ultragarso grei-

čio (Korpelainen 2004, Kažys 1998). Garso greitis yra apie 2000 kartų jautresnis temperatūros pokyčiams, negu oro lūžio rodiklis, ir tuo galima pasinaudoti, atliekant vienalaikius garso greičio ir interferometro poslinkio matavimus. Pagal ultragarso greičio matavimų duomenis įmanoma nustatyti efektyviąją temperatūrą bei apskaičiuoti oro lūžio rodiklį. Pirmieji tokius bandymus ilgio komparavimo laboratorijoje ir jų rezultatus paskelbė MIKES mokslininkai (Kažys 2002).

Nustačius efektyviąją kalibravimo aplinkos temperatūrą ir įvertinus pagal ją etaloninio lazerio spinduliuotės bangos ilgio pataisas galima ženkliai sumažinti ilgio kalibravimo neapibrėžtį.

Be to, temperatūros svyravimai lemia ne tik oro lūžio rodiklio svyravimus, tačiau įtakoja ir neapibrėžties dedamąsias, susijusias su mechaniniais poveikiais interferometro matavimo grandinei dėl jos struktūrinių komponentų temperatūrinių deformacijų (Li 2009, Bryan 1990). Eksperimentiškai jas įvertinti gana sudėtinga, kaip ir sudaryti teorinius modelius, išskiriant atskirų komponentų poveikį. Todėl disertacijoje buvo sudarytas mikroskopo su skaitmenine kamera baigtinių elementų modelis, kad įvertinti mikroskopo korpuso deformacijas dėl nehomogeniškų temperatūrinių laukų poveikio.

Absoliutus skaitinių metodų tikslumas ribotas dėl kompleksinių neapibrėžčių dedamųjų susijusių su geometriniais parametrais, kraštinėmis sąlygomis bei mechaninių jungčių modeliavimu (Barauskas *et al.* 2004), tačiau skaičiavimo rezultatai leis tiksliau parinkti temperatūros jutiklių pozicijas charakteringuose komparatoriaus struktūros taškuose bei numatyti efektyvesnį šilumos šaltinių įtakos sumažinimą.

Brūkšninių matų kalibravimo tikslumą iš esmės nusako dvi poslinkio matavimo procedūros: tikslus poslinkio matavimas lazeriniu interferometru (Webb 2004) bei tikslus skalės brūkšnio centro padėties nustatymas – atskaitos taško suradimas fotoelektrinio mikroskopo pagalba (Kunzmann 1993, Kaušinis *et al.* 2006). Nagrinėjant kalibravimo neapibrėžtį galima sudaryti atskirus neapibrėžties modelius lazeriniam interferometrui bei mikroskopui.

Dėl optikos netobulumo, lazerio bangos ilgio nestabilumo, geometrinių interferometro konstrukcijos paklaidų, aplinkos parametrų nuokrypių realus interferometro matuojamas poslinkis L (Agilent 2002)

$$L = L_f + L_n + L_T + L_m + L_a + L_A, \tag{1.4}$$

čia Lf – matuojamo ilgio korekcija dėl matuojamo interferometro optinių kelių skirtumo netikslumo, L_n – ilgio korekcija dėl oro lūžio rodiklio matavimo netikslumo, L_T – pataisa dėl temperatūros poveikio matavimo grandinei, L_m – įtakos faktorius, nusakantis mechaninius poveikius sistemos konstrukcijoje, L_a – ilgio korekcija dėl oro turbulencijos, L_A – matuojamo ilgio pataisa dėl konstrukcijos komponentų geometrinių paklaidų (Abbe, kosinuso paklaidos).

Pasinaudojus 1.4 lygtimi lazerinio interferometro matuojamo ilgio jungtinės neapibrėžties u_c matematinio modelio išraiška:

$$u_c^2(L) = c_\phi^2 u^2(L_\phi) + c_n^2 u^2(L_n) + c_T^2 u^2(L_T) + c_m^2 u^2(L_m) + c_a^2 u^2(L_a) + c_A^2 u^2(L_A), \quad (1.5)$$

čia – c_i jautrio koeficientai, t.y. įtakos faktorių dalinės išvestinės.

Pirmasis lygties 1.5 narys yra susijęs su lazerio bangos ilgio stabilumu bei fazių skirtumo matavimo netikslumais, t.y.; atsitiktiniais fazių svyravimais, kurie šiuolaikiniams lazeriams sudaro <0,1 nm (Kaušinis *et al.* 2004). Trečiojo, ketvirtojo ir penktojo formulės nario dydžiai yra santykinai maži su antruoju nariu (Flügge and Konig 2001).

Atliekant matavimus ore, reikalinga įvertinti oro lūžio rodiklio įtaką lazerio λ bangos ilgiui $\lambda = \frac{\lambda_{vak}}{n}$, čia λ_{vak} lazerio bangos ilgis vakuume. Oro lūžio rodiklio matavimo paklaida yra susijusi su tiksliais aplinkos parametrų (temperatūros, slėgio, santykinės drėgmės bei CO_2 kiekio) matavimais bei skaičiavimo metodikos, pagrįstos Edleno formule įnešama neapibrėžtimi (Flügge 2000).

Brūkšninio mato temperatūros matavimo neapibrėžtis, kaip varžinių termometrų Pt100 kalibravimo tikslumo (20 mK) pasekmė, pateikta 1.1 lentelėje (Kaušinis 2007).

1.1 lentelė. Aplinkos parametrų matavimo paklaidų ir neapibrėžčių sandų dydžiai
Table 1.1. Measurement errors and uncertainty values of enviromental parameters

Paklaidos šaltinis	Dydis	Standartinė neapibrėžtis	Jautrio koeficientas	Neapibrėžties sando dydis
Temperatūra				
Pt100 kalibravimas	20 mK	10,2 mK	$9{,}3\times10^{-7}$ *L*/K	$9{,}5\times10^{-9}$ *L*/K
Pt100 matavimo grandinės tikslumas	3 mK	1,7 mK	$9{,}3\times10^{-7}$ *L*/K	$1{,}6\times10^{-9}$ *L*/K
Keitiklio savaiminis įšilimas	5 mK	2,9 mK	$9{,}3\times10^{-7}$ *L*/K	$2{,}7\times10^{-9}$ *L*/K
ITS-90 temperatūrinės skalės lygčių paklaida	0,13 mK	0,13 mK	$9{,}3\times10^{-7}$ *L*/K	$1{,}2\times10^{-10}$ *L*/K
Slėgis				
Pirminio slėgio etalono neapibrėžtis	5 Pa	2,6 Pa	$2{,}7\times10^{-9}$ *L*/Pa	7×10^{-9} *L*/Pa
Slėgio jutiklio	10 Pa	5,8 Pa	$2{,}7\times10^{-9}$ *L*/Pa	$1{,}6\times10^{-8}$ *L*/Pa
Slėgio jutiklio skyra	1 Pa	0,3 Pa	$2{,}7\times10^{-9}$ *L*/Pa	8×10^{-10} *L*/Pa
CO_2 kiekis				
Nuokrypis nuo standartinių sąlygų (400 ppm)	100 ppm	100 ppm	$1{,}47\times10^{-8}$ *L*/ppm	$1{,}47\times10^{-8}$ *L*/ppm

Apibendrinant, galima teigti, kad siekiant kalibravimo neapibrėžties įverčio 10^{-8} m eilės dydžio ir kalibruojant ilgio matus įterptinės metrologijos sąlygomis būtina užtikrinti ilgio mato ir jo aplinkos temperatūros matavimo jutiklių kalibravimo neapibrėžties dydį, neviršijantį 20 mK, slėgio jutiklio – 10 Pa. Lazerio spindulio kelyje ir mato aplinkoje turi būti užtikrinamas temperatūros stabilumas 20±0,2 ^{o}C.

1.3. Ilgio matų kalibravimo sistemos

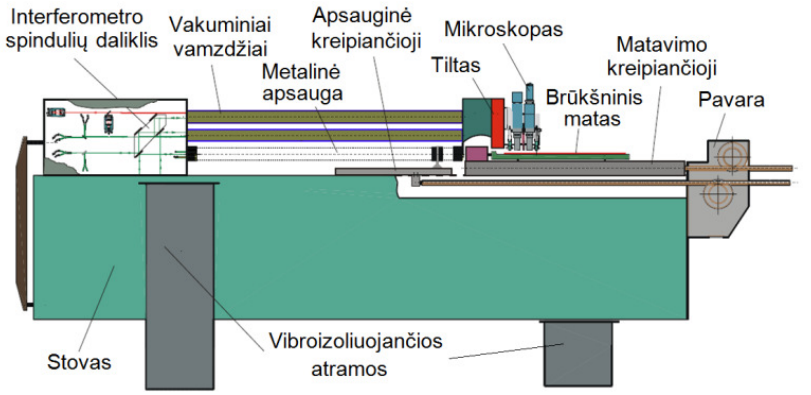
Iki 1960 m. SI ilgio vienetas – metras – buvo įgyvendintas, panaudojant materialų prototipą. Tokiems etalonams gaminti ir matuoti buvo reikalingi preciziniai interferometriniai ilgio komparatoriai. Nors 1983 m. ilgio vienetas buvo apibrėžtas per šviesos greitį vakuume ir sekundę, iki šiol preciziniai ilgio komparatoriai reikalingi praktiškai įgyvendinant ir išplatinant metrą (Gaidamovičiūtė 2002).

Vienas moderniausių pasaulyje ilgio komparatorių „Nanokomparatorius" sukurtas Vokietijos nacionaliniame metrologijos institute. Nanokomparatorius buvo sukurtas tam, kad, kalibruojant linijines skales, pasiekti išplėstinę matavimo neapibrėžtį (k = 2) mažesnę, nei 5×10^{-9} m. Pradėtas kurti apie 1999 metus (Flügge and Konig 2001), jis nuolat tiriamas ir tobulinamas, siekiant sumažinti kalibravimo neapibrėžtį. Šiuo metu pasikartojamumo paklaida, pasiekta kalibruojant aukštos kokybės linijines brūkšnines skales, kurių ilgis iki 300 mm, neviršija 0,3 nm.

Todėl pastarųjų metų šio komparatoriaus tyrimai ir jų pagrindu padaryti patobulinimai yra ypatingai aktualūs ir įdomūs – tiek metodine, tiek ir technine prasme rašant disertaciją.

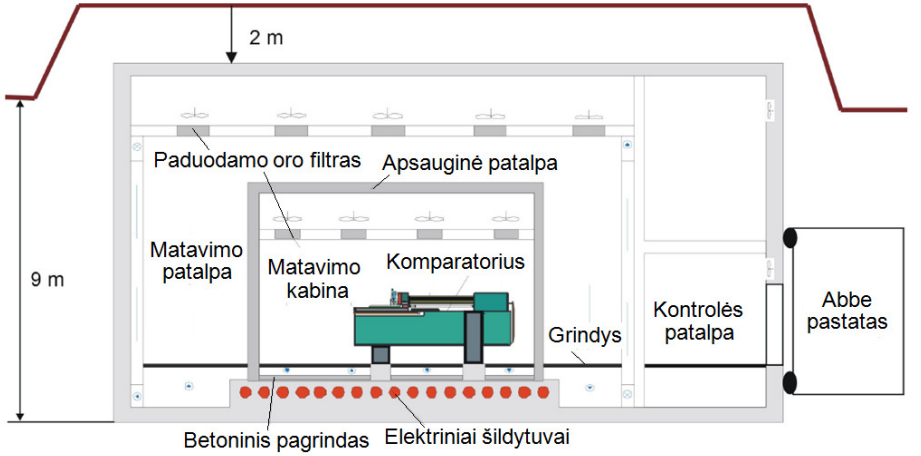
PTB nanokomparatorius (1.2 pav.) plačiai aprašytas (WDGM–7 2003). Šiame skyriuje pateikiame tik tuos duomenis apie komparatorių ir jo pastarųjų metų tyrimus, kuris siejasi su disertacijos objektu. Tai pirmiausia mechaninė dalis, virpesių izoliavimo ir aplinkos sąlygų užtikrinimo sistema, o taip pat interferometras ir mikroskopas.

Pagrindą sudaro masyvus granito blokas, kurio masė apie 6000 kg. Jį laiko trys vibroizoliuojančios atramos. Granito kreipiamųjų paviršių, naudojamų oro guoliams, plokštumos nuokrypiai neviršija 1 µm. Poslinkių matavimo interferometro spindulys sklinda vakuume, tai yra specialioje vakuumo rankovėje, kuri gali išsiplėsti kalibruojamu atstumu. Karietėlė su matuojama skale perstumiama linijiniu varikliu. Išmatuotos variklio įnešamos paklaidos neviršija 10 nm. Įdiegta speciali papildoma karietėlė perduoda jutiklių laidus ir suspausto oro žarnelės į pagrindinę karietėlę. Pagrindinės karietėlės padėtis vertikalia kryptimi tiksliai išlaikoma pjezovykdikliais.



1.2 pav Bendras nanokomparatoriaus vaizdas
Fig. 1.2. Main view of Nano-comparator

Komparatorius įrengtas specialioje patalpoje su dviguba temperatūros kondicionavimo sistema, įrengtoje 9 m po žeme (1.3 pav.).



1.3 pav. Nanokomparatoriaus patalpos schema
Fig. 1.3. Measurement room of Nanocomparator

Matavimo kabina stovi ant betoninio pagrindo; komparatorius pastatytas ant spyruoklių. Temperatūros stabilumui užtikrinti matavimo patalpos sienos ir pati patalpa kondicionuojamos atskirai. Betoninis pagrindas gali būti šildomas, panaudojant elektrinius šildytuvus.

Interferometro sandara ir jos integravimas su mechanine struktūra yra vienas pagrindinių matavimo sistemos dalių, leidusios sumažinti neapibrėžtį. Jo optinių paviršių kokybė vertinama dydžiu (A/40). Mechaniniams ir šiluminiams trikdžiams išvengti pagrindiniai interferometro komponentai pagaminti iš me-

džiagų, pasižyminčių mažo šiluminio plėtimosi koeficientu. Spindulys nuo spinduliuotės šaltinio – jodu stabilizuoto neodimio granato lazerio, (Nd: YAG) – perduodamas interferometrui, panaudojant vienmodžius šviesolaidžius.

Interferometras leidžia kompensuoti granito pagrindo pailgėjimus ir įlinkius. Jei šios deformacijos atsiranda matavimo metu, jos gali sukelti Abbe tipo paklaidas, detektuojant kalibruojamos linijos padėtį. Šie nuokrypiai, o taip pat interferometro optikos korpuso pokrypiai kompensuojami, panaudojant papildomą Maikelsono interferometrą. Įvedus kampinių karietėlės svyravimų valdymo kontūrą, šie svyravimai sumažėjo iki 0,15 μrad ir tai leido sumažinti Abbe paklaidą iki nykstamai mažų dydžių.

Šviesos šaltinio spinduliuotė, praėjusi žalios spalvos filtrą, patenka į mikroskopo apšvietimo sistemą per šviesolaidį. Panaudojus Kohlerio schemą, apšvietos homogeniškumas mikroskopo regėjimo lauke neviršija 3 % jos maksimalios reikšmės. Matavimams naudojamas 50 kartų didinimo objektyvas. Šis mažos apertūros achromatinis objektyvas nėra sufokusuotas į begalybę, bet jo darbinis atstumas yra didelis. Kadangi vaizdo spindulys konverguoja, vaizdo aberacijoms išvengti naudojamas plėvelinis spindulio skaidytuvas. Brūkšnio detektoriai (fotodaugintuvas ir CCD kamera) talpinami mikroskopo viršuje.

Įvairių komparatorių sandaros ir brūkšnio nustatymo algoritmų apžvalga parodo didelę įvairovę komparatorių konstrukcijos ir struktūros sprendimų. Sugrupuosiu 12 šalių komparatorių pagal pagrindinių mazgų grupes.

Judesio perdavimui naudojamos kreipiamosios ir variklis. Dažniausiai yra naudojama granitinė bazė su oro guoliais (NRC, METAS, NMIJ, KRISS, MIKES, LNE, PTB1, PTB2), antroje vietoje – riedėjimo kreipiamosios (NIST, CMS/ITRI, SP, IMGC), trečioje – tefloniniai slydimo guoliai (NIM, VNIIM, PTB3).

Brūkšnio detektavimo aparatūrinė realizacija: CCD mikroskopas (NRC, METAS, CMS/ITRI, MIKES, IMGC, PTB2), plyšinis fotoelektrinis skenuojantis mikroskopas (NIST, CMS/ITRI, NIM, NMIJ, KRISS, VNIIM, SP, LNE, PTB1, PTB2). Brūkšnio detektavimui naudojamas: profilio nupjovimas tam tikrame lygyje su tiesine aproksimacija (NIST, CMS/ITRI, NMIJ, SP, VNIIM, IMGC, PTB1, PTB2), gradiento operatorių (METAS, LNE), kiti (NIM, MIKES) (WGDM–7 2000, WGDM–7 2003).

Daugumos minėtų komparatorių matavimo ilgis siekia tik 1 m, tik KRISS, SP ir LNE gali matuoti ilgesnius matus. Vokietijos firma Dr. Johannes Heidenhain GmbH kuria vakuuminį komparatorių brūkšniniams matams iki 3 m ilgio kalibruoti, tačiau tyrimo rezultatai pristatomi labai ribotai (Kilikevičius 2009). Daugumos komparatorių išplėstinės neapibrėžties komponentė priklausanti nuo ilgio yra didesnė nei 0,08 μm, tik PTB2 Nanokomparatoriaus, veikiančio ypač aukšto stabilumo termokonstantinės patalpos sąlygomis, ši neapibrėžties dedamoji nuo ilgio siekia 0,015 μm.

Įvairių pasaulio šalių nacionalinių laboratorijų komparatoriai turi įvairias briaunos detektavimui skirtas sistemas, kurių charakteristikos yra 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Komparatorių briaunos detektavimo sistemų parametai
Table 1.2. Edge detection system parameters in various comparators

NMI valstybė	Mikroskopo tipas	Gamintojas	Objektyvas NA/x	Analizuojantis plyšys, µm	Briaunos detektavimo tikslumas, µm	Režimas statinis/ dinaminis
PTB Vokietija	Skenuojančiu veidrodžiu	LEICA	0,9/100x	1-12,5	2	Statinis
Mitutoyo Japonija	Plyšinis, trijų plyšių			6,5	5	Dinaminis 20 mm/s
NIST JAV	Skenuojantis veidrodis		100x	100	1	Statinis
PTB nano Vokietija	Plyšinis ir CCD	WERTH	10x; 20x; 50x; 100x	8	5	Statinis ir dinaminis 2 mm/s
METAS Šveicarija	CCD analoginė			11	4	Statinis
MIKES Suomija	CCD analoginė	LEITZ	25x	50	10	Dinaminis 0,2 mm/s
SP Švedija	Skenuojantis plyšys		5x	4	40	Dinaminis
IMGC Italija	CCD skaitmeninė	NIKON	0,8/125x		4	Statinis
VNIIM	Konfokalinis		0,9/80x	0,3		Dinaminis 0,05 mm/s
NMIJ Japonija		NIKON	0,55/50x	20	20	Dinaminis 0,5 mm/s
LNE Prancūzija	CCD analoginė	LEITZ	10x	2	60	Dinaminis 5 mm/s
Prototipas Lietuva	CCD skaitmeninė	NIKON	20x; 50x		25	Dinaminis 6 mm/s

Brūkšnio detektavimui (briaunos radimui) ilgio kalibravimo sistemose naudojamos techninės regos sistemos, kurių pagrindą sudaro preciziniai šviesos mikroskopai. Šių mikroskopų yra didelė įvairovė (tamsaus lauko, konfokaliniai, skenuojantys, stovinčios bangos, fluorescenciniai mikroskopai ir kt.). Matuojamos skalės brūkšnių padėtims nustatyti ilgio komparatoriuose dažniausiai naudojami plyšiniai fotoelektriniai mikroskopai ir fotoelektriniai mikroskopai su

CCD ar CMOS 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.

Matuojamo objekto apšvietimas yra bene kritiškiausias ir subtiliausias aspektas, su kuriuo susiduriama mikroskopijoje, siekiant išryškinti dominančias bandinių savybes. Analizuojamos struktūros apšvietimas optimizuojamas, nustatant ryšį tarp apšvietos ir vaizdo parametrų, siekiant gauti didžiausią erdvinę skyrą, jautrį ir brūkšnio detektavimo tikslumą. Techninės regos sistemose naudojami trys pagrindiniai objektų apšvietimo būdai:

- episkopinis apšvietimas (atspindėta šviesa),
- diaskopinis apšvietimas (praeinanti šviesa),
- struktūrizuotas apšvietimas.

Dažnai atspindėta ir praeinanti šviesa naudojama kartu, kad išryškinti specifines bandinio charakteristikas. Siekiant padidinti vaizdo kontrastą, šviestuvai papildomi filtrais, prizmėmis, poliarizatoriais, analizatoriais ir kt. optikos elementais (Goodman 1996).

Kaip jau minėta, brūkšnių analizei naudojami įvairūs matavimo metodai. Naudojant tradicinį mikroskopijos metodą – šviesaus lauko metodą – gaunamas šviesus objekto vaizdas mikroskopo vaizdo plokštumoje. Skenuojant pro plyšį galima gauti apšvietos kreivę, pagal kurią nustatomos brūkšnio kraštų koordinatės, tačiau vaizdas smarkiai priklauso nuo naudojamos šviesos bangos ilgio ir poliarizacijos, o skirtumas tarp brūkšnio pločių, pamatuotų naudojant skirtingos poliarizacijos šviesą gali siekti apie 10 %.

Konfokaliniame mikroskope naudojamas taškinis šviesos šaltinis, kurį sudaro lazerio apšviesta skylutė diafragmoje, o objektyvas fokusuoja šaltinio šviesą į objekto paviršių. Nuo objekto atsispindėję spinduliai dar kartą praeina objektyvą ir taškinę diafragmą, pastatytą prieš fotoimtuvą, bei sudaro fotoimtuve objekto atvaizdą. Šis metodas ypač jautrus defokusavimui, kadangi spinduliai, atsispindėję nuo objekto plokštumų, kurios nėra mikroskopo židinio plokštumoje yra sulaikomi diafragmos ir nepasiekia fotoimtuvo, todėl vaizdo skaistis labai smarkiai sumažėja. Toks mikroskopo jautris fokusavimui svarbi mikroskopo ypatybė, kuri pasireiškia tuo stipriau, kuo didesnė objektyvo skaitinė apertūra NA.

Plyšiniai mikroskopai 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).

Tradiciškai skaitmeninėse brūkšnio detektavimo sistemose mikroskopai su matriciniais CCD (ar CMOS) jutikliais dėl ribotos greitaveikos, reikalavimų megabitiniam informacijos kiekio srautui, sudėtingesnių vaizdų apdorojimo algoritmų buvo naudojami tik statiniame režime, t. y. analizuojant nejudančius miroskopo atžvilgiu objektus. Tačiau, lyginant su plyšinėmis, tokios sistemos gali pateikti informaciją ne tik apie linijos (briaunos) padėtį, bet ir apie pačią skalę, jos defektus, t. y. jos gali būti naudojamos ir skalės kokybės charakterizavimui. Tobulėjant CCD technologijoms šviesai jautrių elementų – pikselių (angl. picture elements) matmenys nuolat mažėja, kai tuo tarpu jutiklių greitaveika sparčiai didėja. Šiuolaikinės komercinės greitaveikės CCD jutiklio matricas sudaro nuo iki 64000×64000 pikselių, o pikselių dydis siekia 2,2×2,2 μm. CCD kameros su ypač mažų matmenų šviesai jautriais fotoelementais pasiekia didelę erdvinę skyrą ir jautrį, tačiau jų dinaminis matavimo diapazonas yra ribotas (Lipinski and Larsonnier 2000).

Judančių vaizdų matavimui vis plačiau naudojami CCD jutikliai su vienmačiais (vienoje eilutėje išdėstytais) vaizdo elementais (angl. line scan). Esmėje tokios sistemos yra skaimeninių plyšinių mikroskopų atitikmuo. Priklausomai nuo jutiklio tipo eilutėje talpinama 128–10680 pikselių nespalvoto vaizdo keitikliuose, o trijose spalvoto vaizdo jutiklių eilėse išdėstoma 3072–32040 pikselių. Dvimatis vaizdas gaunamas fotografuojant objektą, judantį statmenai jutiklių išdėstymo linijai. Sinchroninį ir asinchroninį darbo režimą palaiko atitinkamai išorinio ir vidinio sinchronizavimo schemos. Pikselių nuskaitymo dažnis siekia 400 MHz. Tai leidžia efektyviai panaudoti šiuos keitiklius dinaminiame ilgio kalibravimo režime, nors lyginant bei derinant optinius mikroskopus ir interferometrines sistemas, pastarųjų matavimo greičio galimybės vis dar nežymiai didesnės.

Skaitmeninėje mikroskopijoje analizuojant brūkšninio mato brūkšnius naudojami trys parametrai: kontrastas, plotis ir šlaitas. Tiksliam kiekybiniam precizinių ilgio brūkšninių matų vaizdų apdorojimui ir analizei reikalingi aukštos kokybės jų skaitmeniniai atvaizdai. Vaizdų, gaunamų panaudojant mikroskopus, tikslumą riboja optinės schemos komponentų, o taip pat skaitmeninių signalų formavimo galimybės. Norint gauti tikslius brūkšninių ilgio matų vaizdus, skalės paviršius turi būti sutapdintas su mikroskopo židinio plokštuma. Nesutapimo paklaida neturi būti didesnė už objektyvo židinio gylį. Židinio gylis būna nuo 0,7 iki 5 μm. Todėl preciziniuose ilgio komparatoriuose tiksliam atstumui tarp objektyvo ir skalės palaikyti dažniausiai naudojamos automatinio fokusavimo sistemos (Flügge 2005, Jakštas *et al.* 2005, 2006).

Naudojant mikroskopus su CCD kamera, fokusuoti galima pagal vaizdo kontrastą, analizuojant gretimų vaizdo elementų (pikselių) intensyvumų skirtumą (Boddeke 1995). Kai vaizdas nėra židinio plokštumoje, kontūro linijoje gre-

timų vaizdo elementų intensyvumai skiriasi nedaug, o geriausia židinio padėtis atitinka didžiausią vaizdo elementų intensyvumų skirtumą.

Fokusuojant brūkšnių vaizdus precizinių ilgio komparatorių detektavimo sistemose, perslenkamas visas mikroskopo korpusas. Tiksliam pozicionavimui naudojami įvairūs mikropozicionavimo mechanizmai užtikrinantys vertikalų mikroskopo judesį iki 1 mm ribose (Bodermann 2003).

Pagrindinis brūkšnių detektavimo sistemos uždavinys, kalibruojant brūkšninius ilgio matus – nustatyti brūkšnio vaizdo signalo krašto/briaunos padėtį erdvėje, tačiau realiai reikia nustatyti signalo kraštą tiesėje. Apibendrinus matavimo signalų gavimo principus galima laikyti, kad paprastai signalai gaunami dviem pagrindiniais būdais:

- skenuojant matuojamosios liniuotės brūkšnius vienmačiu davikliu, išėjimo skaitmeninis signalas gali būti traktuojamas kaip vieno argumento funkcija.
- fotografuojant skaitmeninės kameros dvimačiais jutikliais. Vienmatis brūkšnio linijos profilio signalas gali būti gaunamas ne tik iš registruojančio įrenginio (skenuojančio fotoelektrinio mikroskopo), bet ir sukonstruojamas iš dvimačio skaitmeninio signalo. Tokiu atveju, dvimatis signalas traktuojamas kaip vienmačių signalų aibė ir toliau gali būti nagrinėjamas šiai aibei apskaičiuotas vidutinis signalas (Allebach 2000).

Vienareikšmio brūkšnio krašto ar briaunos apibrėžimo nėra (Bovik 2005, Truchetet 2001, Flügge *et al.* 2005), todėl brūkšnio signalo briauna gali būti apibrėžiama tiktai sąlyginai, t. y. kaip geometrinė vieta taškų, kur signalas greitai kinta pereidamas iš foninio šviesos intensyvumo lygio į brūkšnio signalo lygį. Šiam perėjimui detektuoti dažnai naudojama diferencijavimo operacija.

Esant didesniems triukšmų lygiams taikyti signalo diferencijavimą negalima, kadangi triukšmų spektras visada yra platesnis negu naudingojo (matuojamojo) signalo spektras, o atliekant išankstinį signalo diferencijavimą, gautume klaidingą brūkšnio briaunos detektavimo rezultatą. Brūkšnio signalo briaunos detektavimui naudojami įvairūs algoritmai bei lokaliniai filtrai, kurie paryškina briauną (Acton 2005). Priklausomai nuo signalo registravimo sąlygų – apšvietimo būdo ir linijos profilio – signalas turi kelias charakteringas formas. Žinant brūkšnio signalo charakteringą formą, signalai efektyviai gali būti filtruojami žemų dažnių arba medianiniu filtru, kad sumažinti triukšmo įtaką (Sharr 2000). Tačiau minėtų filtravimo metodų taikymas ne tik sumažina triukšmo lygį nagrinėjamame signale, bet tuo pačiu yra prarandama dalis naudingos informacijos. Todėl reikia teisingai pasirinti filtravimo metodą.

Signalo briaunos detekcijai gerai tinka vadinamieji lokaliniai filtrai, pagrįsti matematine operacija – sąsūka (angl. convolution). Žinant lokalinio filtro branduolį, kitaip vadinamąją filtro svorinę funkciją w, galima rasti (sąsūkos integralo pagalba) filtro išėjimo signalą, kai jo įėjime veikia bet kokios formos matuoja-

masis signalas (Sharr 2000, Tuan 2006). Jei matuojamasis (įėjimo) signalas *f*(x), o išėjimo – *y(x)*, tai sąsūkos formulė vienmačio signalo atveju yra tokia:

$$y(x) = \int_{-\infty}^{\infty} w(x-\tau) f(\tau) d\tau . \qquad (1.6)$$

Signalo briaunos išryškinimui (padarant jį statesnį, o taip pat padarant briaunos perviršius, kuriuos geriau mato žmogaus regos sistema) yra naudojami specialios formos lokaliniai filtrai.

Signalo briaunos (krašto arba kontūro dvimačio signalo/vaizdo atveju) išryškinimas gaunamas, taikant minėtą sąsūkos operaciją. Šiuo atveju svorinė funkcija w(x) turi teigiamą piką su neigiamais šoniniais impulsais. Tokių lokalinių filtrų esmė ir privalumas glūdi tame, kad dėka sąsūkos operacijos yra tarytum vienu filtravimu atliekami ir signalo glodinimas, ir operacija, stiprinanti aukštesnius dažnius.

Minėtoji tipinė lokalinio filtro svorinės funkcijos forma galioja ir dvimačių signalų, t.y. vaizdų, atveju. Tik šiuo atveju filtro modelis yra aprašomas dvimatės sąsūkos formule:

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} w(x-\tau_x, y-\tau_y) f(\tau_x, \tau_y) d\tau_x d\tau_y , \qquad (1.7)$$

čia *f(x,y)* – dviejų argumentų įėjimo funkcija, *w(x,y)* – svorinė funkcija.

Skaitmeniniams dvimačiams signalams (skaitmeniniams vaizdams, kurie ir yra dvimačiai sveikųjų skaičių masyvai) tai pat galima taikyti matematinę operaciją, analogišką prieš tai nagrinėtajai sąsūkai. Diskretiniu atveju kintamieji įgyja tiktai sveikas skaitines reikšmes, o dvigubas integralas yra keičiamas dvigubu sumavimu.

Darbe formuluojamas uždavinys surasti abu skaitmeninio signalo kraštus. Žinant signalo kraštų padėtį gali būti apskaičiuojama signalo centro padėtis. Signalo kraštams detektuoti gali būti naudojami keli būdai:

- signalo diferencijavimas. Kairysis kraštas bus tame signalo taške, kur išvestinė įgyja maksimalią teigiamą reikšmę, o dešinysis – tame taške, kur ji įgyja maksimalią neigiamą reikšmę. Tačiau šis būdas turi didelį trūkumą, nes diferencijuojant labai sustiprėja triukšmo įtaka, todėl maksimalios reikšmės nustatymas gali būti netikslus.
- signalo „nupjovimas“ pasirinktame lygyje. Signalo kraštai detektuojami tam tikrame signalo lygyje (paprastai imamos gana įvairios reikšmės nuo 30 iki 80% maksimalios signalo amplitudės). Šis būdas panašiai, kaip ir ankstesnis, yra labai jautrus triukšmui, todėl signalas turi būti filtruojamas, tuo pačiu prarandant dalį tikslumo.

- kombinuoto signalo nagrinėjimas. Vienmačiai gradavimo linijos profilio signalai gali būti registruojami kelių, specialiai tam tikra tvarka išdėstytų, registravimo įrenginių. Tokiu būdu gaunami keli signalai, kurie vėliau sudedami į vieną taip, kad tame taške, kur yra gradavimo linijos kraštas, kombinuoto signalo reikšmė būtų lygi nuliui.

Kaip jau minėta, aukščiau aprašytais būdais vienmačio signalo kraštai (dėl triukšmo ir matavimo paklaidų įtakos) dažniausiai detektuojami nepakankamai tiksliai. Todėl naudojami įvairūs metodai tam, kad signalo krašto nustatymas būtų tikslesnis:

Suderintojo detektoriaus metodas yra naudojamas detektuoti žinomos formos signalą triukšmingame fone. Suderintasis detektorius aprašomas vienmate sąsūka, kurioje naudojama parinkta (priklausomai nuo ieškomo signalo formos) svorinė funkcija $p(x)$

$$p(x) = \sum_{i=-m}^{m} s(x+i)w(m-i), \tag{1.8}$$

čia $m = M/2$, M – svorinės funkcijos plotis.

Signalo pradžioje ir pabaigoje trūkstami taškai imami veidrodinio atspindžio principu. Nustatyta, kad varpo formos signalui $s(t)$ detektuoti geriausiai tinka pjūklo formos svorių funkcija $w(t)$, kurios plotis atitinka ieškomo signalo plotį. Tiriamos sistemos brūkšnio signalas nėra visiškai varpo formos, tačiau galima manyti, kad signalo sektoriaus kraštai yra skirtingo pločio varpo formos signalai. Tokiu būdu naudojamos dvi skirtingos svorių funkcijos detektuoti kairiajam ir dešiniajam signalo kraštui. Taikant šį metodą, svarbu parinkti tinkamą svorinę funkciją.

Signalo kraštų aproksimavimo tiesėmis metode tam tikrame lygyje (dažniausiai nuo 30 % iki 70 % maksimalios signalo amplitudės) signalo kraštas gali būti aproksimuojamas tiese. Tiesės parametrai (krypties koeficientas β ir poslinkis α) apskaičiuojami, naudojant mažiausiųjų kvadratų metodą. Tiesių, kuriomis aproksimuojami pasikartojančių gradavimo linijų profilių kraštai, krypties koeficientai idealiu atveju turi būti vienodi. Nagrinėjant iš registravimo įtaiso gautą signalą, pastebima, kad kiekvienam signalo kraštui apskaičiuoti krypties koeficientai nežymiai skiriasi. Todėl tolesniems skaičiavimams naudojami signalo kraštai, aproksimuoti tiesėmis, kurių krypties koeficientas β suvienodintas (Flügge *et al.* 2005). Tarkime turime du signalo kraštus, kurie aprašomi formulėmis:

$$y_i(1) = \alpha_1 + \beta x_i(1) + \varepsilon_i(1),\ i = \overline{1,n}, \tag{1.9}$$

$$y_i(2) = \alpha_1 + \beta x_i(2) + \varepsilon_i(2),\ i = \overline{1,m}, \tag{1.10}$$

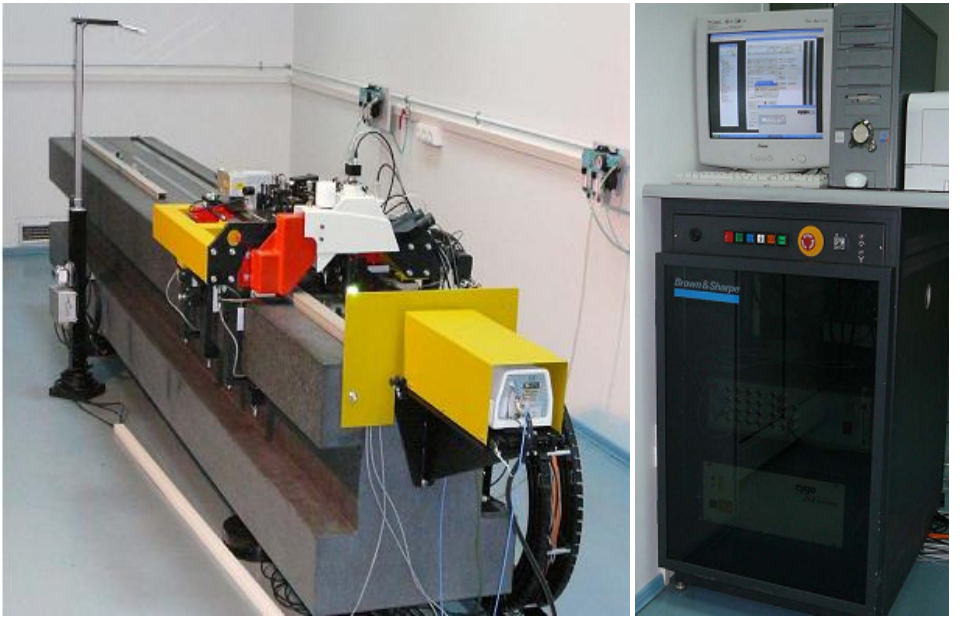
čia $\varepsilon(1)$ ir $\varepsilon(2)$ – „baltasis“ triukšmas su vienodu standartiniu nuokrypiu $\sigma(\varepsilon)$.

Taigi, naudojant mažiausiųjų kvadratų metodą, galima apskaičiuoti suvienodinto krypties koeficiento β reikšmę pagal formulę

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i(1)-\bar{x}(1)\right)\left(y_i(1)-\bar{y}(1)\right)\right]+\sum_{i=1}^{m}\left[\left(x_i(2)-\bar{x}(2)\right)\left(y_i(2)-\bar{y}(2)\right)\right]}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i(1)-\bar{x}(1)\right)\right]^2+\sum_{i=1}^{m}\left[\left(x_i(2)-\bar{x}(2)\right)\right]^2}. \qquad (1.11)$$

Kadangi nagrinėjamas brūkšnių signalas dažnai yra periodinis, jam galima taikyti diskrečiąją kosinusinę transformaciją, kurios pagalba apskaičiuojama dažninė signalo charakteristika. Iš dažninės charakteristikos surandamas signalo pasikartojimo dažnis (tuo pačiu apskaičiuojamas brūkšnių periodas), o iš apskaičiuoto signalo galima rasti atstumus tarp gretimų brūkšnių centrų.

1.4 paveiksle yra sukurtas brūkšninių ilgio matų komparatorius, skirtas linijinių rastrinių skalių kalibravimui įmonėje UAB „Precizika Metrology“. Jis eksploatuojamas termokonstantinėje laboratorijoje.

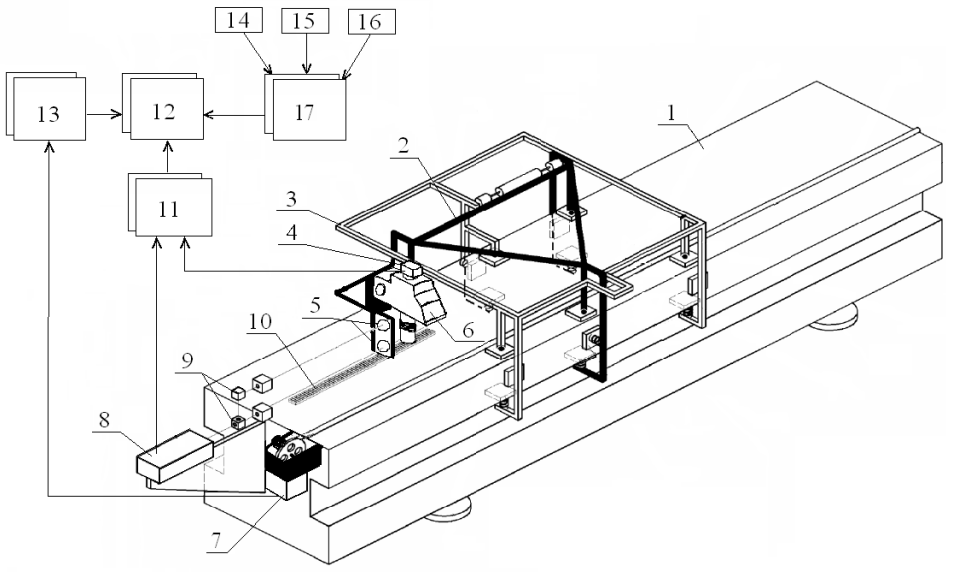


1.4 pav. Brūkšninių ilgio matų komparatoriaus ir valdymo bloko nuotrauka
Fig. 1.4. Main view of precision comparator and control unit

Šio komparatoriaus kūrime ir tyrimuose dalyvavo Kauno technologijos universiteto profesoriai Saulius Kaušinis, Rimantas Barauskas, Vilniaus Gedimino technikos universiteto profesoriai Albinas Kasparaitis, Vladas Vekteris, Mindaugas Jurevičius, docentai Arūnas Šukys, Artūras Kilikevičius, UAB „Precizika Metrology“ vyriausiasis konstruktorius Juozas Kumetaitis ir kiti specialistai.

Projektas buvo remiamas Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo pagal Aukštųjų technologijų plėtros programos. Kompleksinių ilgų brūkšninių matų (3,5 m) kalibravimo bandymų, atliktų „Precizika Metrology“ matavimų laboratorijoje, ir ES šalių ilgių brūkšninių matų kalibravimo galimybių palyginimas parodė, kad (2003–2009 m.) sukurto komparatoriaus kalibravimo tikslumo charakteristikos yra neblogesnės nei Olandijos, Švedijos, Austrijos, Prancūzijos analogiškų kalibravimo sistemų. Lietuvos pramonininkų konfederacijos „Lietuvos metų gaminio“ konkurse brūkšninių ilgio matų komparatoriaus prototipas laimėjo garbingiausią konkurso apdovanojimą – „Lietuvos metų gaminys 2007“ aukso medalį.

Brūkšninių ilgio matų kalibravimas vykdomas komparatoriumi (1.5 pav.), gamybinių sąlygų aplinkoje, kurios temperatūra artima norminei 20 ^{o}C. Komparatoriaus bazinę dalį sudaro masyvi granitinė bazė su kreipiamosiomis plokštumomis (1), vibroizoliacinės pneumatinės aktyvios atramos, precizinė linijinė poslinkio sistema (7, 13), karietėlė su specialios konstrukcijos oro guoliais (2, 3). Kalibruojamų ilgio matų rastrinių elementų padėtį karietėlės atžvilgiu nuskaito optinis mikroskopas su skaitmenine kamera ir blykste (4, 6), o karietėlės padėtį – dviejų dažnių lazerinis interferometras (5, 8, 9).



1.5 pav. Principinė brūkšninių ilgio matų komparatoriaus schema
Fig. 1.5. The principal scheme of precision line scale comparator

Lazerinio interferometro skaitliukų ir valdymo plokštės yra atskirame bloke (11), kuris poslinkio duomenis perduoda personaliniam kompiuteriui PK (12). Karietėlės poslinkį valdo servo pavaros kontroleris (13), kuriam poslinkio dy-

džius perduoda PK (12). Temperatūros (14), slėgio (15) ir santykinės drėgmės (16) jutiklius nuolat apklausia, surenka jų duomenys ir persiunčia į PK precizinis aplinkos sąlygų matuoklis (17) (Barakauskas 2007, 2008, Kilikevičius 2009, Jakštas 2006).

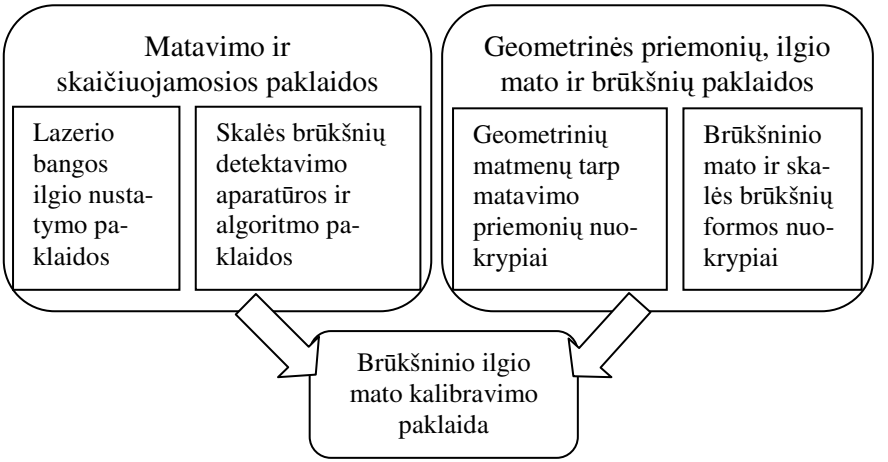
Kalibravimo procesas vykdomas automatiškai, sistemų darbą valdo PK ir valdiklio programos. Valdymo kompleksas sinchronizuoja visų sistemų darbą pagal originalų, šiai sistemai sukurtą algoritmą. Dirbant įrenginiui įterptinės metrologijos sąlygomis, skaitmeniniai prietaisai pastoviai matuoja aplinkos sąlygų pokytį nuo norminių, kaupia duomenis ir skaičiuoja kompensacijas.

Įrenginys dirba dinaminiame kalibravimo režime, t. y. visų matavimų duomenys surenkami karietėlei judant virš kalibruojamo objekto. Vaizdo sistema fotografuoja ilgio matų brūkšnių vaizdus ir perduoda juos į PK. Brūkšnio padėtis randama įvertinant abiejų brūkšnio kraštų padėtis. Nustatant mato brūkšnių paklaidą, yra įvertinamas matuojamo mato ir komparatoriaus konstrukcinių elementų temperatūrinės deformacijos, oro lūžio koeficientas, Abbe kompensacija, vaizdo gavimo parametrai, apšvietimas, judėjimo greitis.

1.4. Ilgio matų kalibravimo paklaidų analizė

Esminis dalykas projektuojant ir sudarant precizinės mašinos paklaidų biudžetą, yra identifikavimas ir įvertinimas svarbiausių paklaidų, galinčių įtakoti mašinos tikslumą. Šiuo atveju reikalinga praktinė patirtis bei žinios, kurios leistų numatyti galimas paklaidas, o taip pat teorinis modelis, apibūdinantis mechaninius ryšius sistemoje, pvz. ryšius tarp interferometro prizmės, judančio veidrodėlio ir matuojamo (kalibruojamo) objekto, kurie sudaro interferometrinę poslinkio matavimo grandinę. Bet koks šių komponentų geometrinių matmenų pokytis dėl šiluminio plėtimosi, deformacijų, kampinių paklaidų ar vibracijų sukelia ilgio matavimo paklaidas. Konstruojant mašinas siekiama, kad matavimo grandinė būtų kuo trumpesnė ir kad ją sudarytų kuo mažiau narių, be to yra vengiama struktūrinių komponentų, kurių poveikis negali būti iš anksto prognozuojamas ir įvertinamas (Gao 2010).

Pagrindinis ilgio kalibravimo sistemos (kaip ir daugelio kitų precizinių mašinų) parametras yra jos darbo tikslumas, lemiantis kalibravimo neapibrėžties dydį, todėl tiksliųjų matavimų taikymuose dažniausiai svarbūs ne tiek konstrukcijos įtempimai ar deformacijos, kiek matavimo procesui svarbių konstrukcijos taškų poslinkiai (Hale 1999). Kalibravimo sistemos paklaidas galima suskirstyti dvi grupes, kaip parodyta 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Brūkšninių ilgio matų padėties nustatymo paklaidos
Fig. 1.6. Positioning errors of graduated lenght gauge

Galima nurodyti tokius tipinius brūkšninių matų kalibravimo paklaidų šaltinius (Kaušinis 2009):

Lazerio bangos ilgis:

- lazerio bangos ilgio dreifas darbo metu;
- oro lūžio rodiklio nustatymas.

Interferometras:

- interferometro nustatymas skalės ašies atžvilgiu;
- atstumo tarp atraminio veidrodžio ir mikroskopo nuokrypis;
- atstumo tarp lazerio spindulį dalinančios prizmės ir mikroskopo nuokrypis;
- atstumas tarp matuojančio veidrodžio ir skalės nuokrypis.

Brūkšninio mato skalė:

- skalės temperatūros matavimas;
- šiluminio plėtimosi koeficiento įvertinimas;
- mato padalų (brūkšnio) geometrijos nuokrypiai.

Matuojant atstumus tarp kalibruojamų skalių brūkšnių, reikia tiksliai perslinkti arba pačią skalę, arba atskaitos mikroskopą. Tikslių valdomų judesių įgyvendinimo poreikis sąlygoja papildomus griežtus tikslumo reikalavimus mechaninei ir optinei interferometro struktūrai. Su tuo susiję tokie paklaidų šaltiniai:

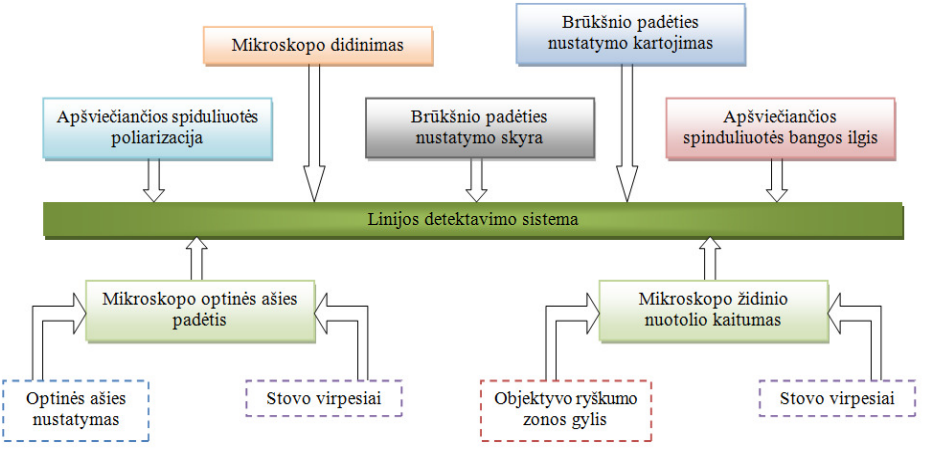
- kosinuso paklaida – jei karietėlės judesio kryptis nėra lygiagreti lazerio spinduliui, tarp matavimo rezultato ir tikrosios matuojamojo dydžio reikšmės atsiranda kosinuso priklausomybė. Šį nuokrypį mažiname derinant optinę sistemą.

- Abbe paklaida – jei matavimo ir atskaitos linijos nesutampa, karietėlei sukiojantis judesio metu atsiranda Abbe paklaida. Yra įvairūs metodai šiai paklaidai eliminuoti ar sumažinti iki leistino dydžio (Barakauskas 2008).
- įlinkio paklaida – kai vidurinė skalės dalis, net jei skalė paremta Airy taškuose, įlinksta keletą mikrometrų skalės galų atžvilgiu. Jei atskaitos mikroskopo ašis nestatmena skalės ašiai, atsiranda matavimo rezultato paklaida. Įlinkio paklaida minimizuojama derinant prietaisą.

Svarbiausias neapibrėžties šaltinis matuojant ilgus brūkšninius matus yra susijęs su mato temperatūra ir jos matavimu (Jakštas 2006). Nors temperatūros jutiklius galima sukalibruoti kelių mK tikslumu, tačiau visada reikia įvertinti temperatūros gradientus dėl kintančių aplinkos sąlygų:

- šiluminio plėtimosi koeficientas – jei kalibruojamo mato temperatūra skiriasi nuo 20 ^{o}C, turi būti įskaičiuota matuojamojo ilgio pataisa dėl šiluminio plėtimosi. Pataisos neapibrėžtis priklauso nuo šiluminio plėtimosi koeficiento neapibrėžties, matuojamojo ilgio ir temperatūros nuokrypio nuo 20 ^{o}C;
- padalos brūkšnio kokybė (skalėms);
- skalės paviršiaus plokštumos nuokrypiai;
- skalės atramų išdėstymas.

Kadangi padalos ilgis nustatomas kaip trumpiausias atstumas tarp dviejų brūkšnių centrų, išmatuotas ilgis labai priklauso nuo brūkšnio kokybės, o taip pat nuo brūkšnio padėties nuskaitymo sistemos. Brūkšnio detektavimo paklaidų sandai pateikti 1.7 paveiksle (Jakštas 2009, Kilikevičius 2009). Jei brūkšniai nelygiagretūs, netiesūs, ar neidentiški, brūkšnio centro nustatymas tampa neapibrėžtas. Praktikoje tai pasireiškia kaip skirtumas tarp tos pačios skalės kalibravimo skirtingais prietaisais rezultatų (Chaziachmetovas 2007).



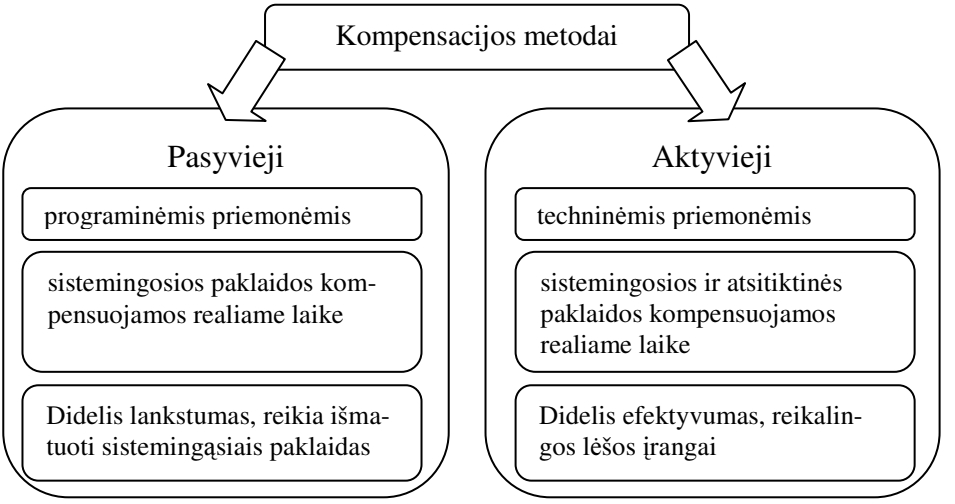
1.7 pav. Brūkšninių ilgio matų padėties nustatymo paklaidos
Fig. 1.7. Positioning errors of graduated lenght gauge

Visos šios paklaidos yra specifinės ir priklauso nuo konkrečios ilgio kalibravimo sistemos struktūrinių sprendimų, todėl konstruojant valdomo tikslumo sistemą reikia kiekybiškai įvertinti šias paklaidų dedamąsias.

Atlikus tokių sistemų analizę galima tvirtinti, ilgio kalibravimo sistemos tikslumui didžiausią įtaką:

1. matavimo ir skaičiuojamosios paklaidos, kurių pagrindinė priežastis yra temperatūros kitimas;
2. geometrinės paklaidos, susijusios su jų formų, derinimo, judesių paklaidomis bei matmenų stabilumu.

Sudarant realų brūkšninių ilgio matų kalibravimo neapibrėžties biudžetą, labai svarbu išnagrinėti ir įvertinti skaitmeninio paklaidų kompensavimo galimybes, todėl šiame 1.8 paveiksle pateikiamos paklaidų kompensacijos metodų charakteristikos.



1.8 pav. Brūkšninių ilgio matų padėties nustatymo paklaidos
Fig. 1.8. Positioning errors of graduated lenght gauge

Svarbi matavimo neapibrėžties dedamoji kalibruojant brūkšnines ilgio skales yra susijusi su Abbe principo neišlaikymu, o pagrindiniai tokių paklaidų šaltiniai yra komparatoriaus stovo formos paklaidos, karietėlės deformacijos ir pavaros jėgų poveikis.

Ekonomiškai yra efektyvu gamybos tikslumo sąskaita užtikrinti tiesų judesį, kurio linijinės paklaidos X ir Z ašių kryptimi neviršytų 2–3 μm, o kampiniai posūkiai apie šias ašis būtų 1–2 kampinės sekundės. Tolimesnis paklaidų mažinimas būtų vykdomas jų skaitmeninės kompensacijos sąskaita (Barakauskas 2008, Jakštas 2009, Kilikevičius 2009).

1.5. Kalibravimo neapibrėžties įverčio sandai

Norint nustatyti atliekamų matavimų patikimumą reikia įvertinti galimų netikslumų įtaką matavimo rezultatui. Patikimumo mato apibūdinimui naudojama matavimo neapibrėžtis, kuri iš esmės yra galimo netikslumo įvertis, pateiktas kartu su matavimo rezultatu. Neapibrėžtis parodo, kiek matavimo rezultatas yra artimas tikrajai matuojamo dydžio vertei, o neapibrėžties skaitinė vertė nusako pasikliovimo intervalo, atitinkančio tam tikrą tikimybės lygį, ribas. Brūkšninių ilgio matų kalibravimo tikslumas taip pat įvertinamas jam priskiriama neapibrėžtimi.

Nustatant neapibrėžties dydį visų pirma sudaromas matematinis neapibrėžties įvertinimo modelis, kuris nusako ryšį tarp matuojamo dydžio (išėjimo dydžio) ir dydžių (įėjimo dydžių), į kuriuos reikia atsižvelgti vertinant matuojamus parametrus.

Ilgio kalibravimo uždaviniuose tikslumo lygio įvertinimui yra dvi charakteristikos: santykinės neapibrėžties skaitinė vertė ir apibendrinta suminės neapibrėžties formulė, turinti dvinario formą. Suminę neapibrėžtį sudaro sandai priklausantys nuo matuojamo ilgio ir nepriklausantys, todėl vertinant ilgio matų su skirtingomis matavimo ribomis kalibravimo tikslumą būtina nurodyti abi dedamąsias.

Pagal ISO rekomendaciją (EA 4/02 1999) matavimo neapibrėžtis skirstoma į dvi, A ir B grupes:

A) Neapibrėžtys, nustatomos statistiniais metodais.

B) Neapibrėžtys, nustatomos kitais metodais.

Kalibruojant ilgesnes negu 10 mm skales dominuoja B tipo neapibrėžtys. Kiekviena dedamoji nustatoma atskirai. Jas sumuojant, gaunama jungtinė neapibrėžtis u_c (1.5), priklausanti nuo matuojamojo ilgio, o jos dydį apsprendžia sisteminiai faktoriai.

Kalibruojant labai tikslias skales, jos matuojamos bent 6 kartus (Kuzas 2008). Iš šių matavimų duomenų kiekvienam skalės intervalui apskaičiuojamas standartinis matavimo rezultatų nuokrypis. A tipo matavimo neapibrėžtis nustatoma šiuo metodu. Ši dedamoji sudaro nuo ilgio nepriklausančią kalibravimo neapibrėžties dedamąją. Ji atsiranda dėl paklaidų komponenčių, kurių kalibravimo metu atskirai įvertinti neįmanoma, tai yra dėl mikroskopo, briaunos padėties nustatymo paklaidų, interferometro aplinkos sąlygų (drėgmės, slėgio, temperatūros), matuoklių paklaidų, skalės kokybės, mikroskopo ir retroreflektoriaus tarpusavio padėties pasikeitimo ir kitų atsitiktinių paklaidų.

B tipo matavimo neapibrėžtis nustatoma lyginant tiriamojo ir aukštesnio tikslumo komparatoriaus precizinio brūkšninio mato kelių kalibravimų vidurkių rezultatus.

Išplėstinė neapibrėžtis apskaičiuojama, kaip standartinės neapibrėžties u ir aprėpties koeficiento k sandauga.

Didžiausiems neapibrėžties sandams priskiriami: vaizdo sistemos triukšmai, Abbe ir kampinės mikroskopo karietėlės paklaidos, vaizdo fokusavimo, brūkšnio detektavimo kartojimasis, oro temperatūros ir slėgio matavimas, brūkšninio mato plokštumo nuokrypa.

Neapibrėžties sandas, kuris įvertina Edleno lygties įnešamą paklaidą į bendrą neapibrėžties biudžetą, sudaro 1×10^{-8}. Bendras temperatūros ir slėgio neapibrėžties dedamųjų dydis randamas susumuojant atskiras jų komponenčių skaitines vertes (Birch 1993, Boensch 1998). Be to reikia nepamiršti, jog dėl oro lūžio rodiklio svyravimų atsiranda atsitiktinės paklaidos, kurios taip pat įtakoja atitinkamas matavimų neapibrėžties komponentes.

Dėl kalibravimo sistemos komponentų geometrinių ar surinkimo paklaidų atsiranda tam tikras nuokrypis tarp mikroskopo karietėlės judesio trajektorijos ir lazerinio interferometro matavimo ašies, kuris pasireiškia, kaip ilgio matavimo paklaida tiesiogiai proporcinga kampo tarp šių ašių kosinusui.

Abbe paklaida dėl gamybos tolerancijų ir surinkimo paklaidų atsiranda visose sistemose, o jos dydžiui nustatyti atliekami judesio trajektorijos tiesumo matavimai. Ši paklaida labiausiai priklauso nuo kreipiamųjų kokybės ir jos didžioji dalis yra sistemingoji, tai reiškia – kompensuojama. Judesio trajektorijos tiesumo matavimų ir aproksimacijos paklaidos įneša savo neapibrėžties sandus.

Temperatūros jutiklių kalibravimo neapibrėžtis įtakoja kitų faktorių, susijusių su temperatūros verte, įnešamas paklaidas.

Dėl temperatūros nehomogeniškumo brūkšninių ilgio matų kalibravimo laboratorijoje, susidaro temperatūriniai laukai išilgai skalės, kurie sąlygoja nevienodus skalės taškų poslinkius dėl temperatūrinių gradientų pačioje skalėje.

Dėl paklaidos vertinant mato medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientą, neapibrėžties dedamoji vertinama $0{,}5\times10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$ (Jurgen von Martens 2002).

Brūkšninio mato bazavimas ant komparatoriaus įneša geometrines paklaidas, kurios pasireiškia kaip matuojamos skalės ne visiško sutapimo su matavimo kryptimi, matuojamos skalės plokštumos nuokrypiais, matuojamos skalės įlinkio ir detektuojamų brūkšnių defokusavimo neapibrėžties sandais.

1.6. 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.

Daktaras A. Jakštas įnešė didelį indėlį sudarant brūkšninių ilgio matų kalibravimo neapibrėžties modelį, tiriant jos sandus.Profesoriaus habil. dr. S. Kaušinio ilgametė patirtis, dalyvavimas MTEP projektuose (NATO mokslinių tyrimų programa, MEMS integravimo į sudėtingas sistemas problematika, precizinių ilgio kalibravimo sistemų tyrimas) padėjo nustatyti šios disertacijos tyrimų tematiką.

A. Jakšto disertacijos teorinis ir eksperimentinis precizinio ilgio kalibravimo problemų tyrimas, siekiant sukurti kokybiškai naujas didelio ilgio metrologiškai susieto brūkšninių ilgio matų kalibravimo dinaminiame režime sistemas bei jų projektavimo metodologiją.

Susistemintos precizinio ilgio kalibravimo srities žinios ir sukurta metrologiškai susieto brūkšninių ilgio matų kalibravimo dinaminiame režime tikslumo tyrimo metodika.

Darbe apžvelgta daug literatūros šaltinių, kuriuose randama žinių apie tokių sistemų teorinių ir fizinių modelių tyrimus, o taip pat ištyrus šiuolaikinių aukštųjų technologijų teikiamas galimybes, nustatytos ilgio kalibravimui būdingos paklaidų reikšmės. Gauti duomenys panaudoti laukiamai kalibravimo neapibrėžčiai bei paklaidų kompensavimo galimybėms įvertinti.

Disertacijoje pateikti įvairių ilgio kalibravimo sistemų paklaidų biudžeto tyrimai, o taip pat kompleksiniai kalibravimo proceso tyrimai įgalino pagrįsti racionalius struktūrinius, scheminius ir konstrukcinius metrologiškai susieto precizinių linijinių skalių komparatoriaus sprendimus, tenkinančius patvirtintus reikalavimus brūkšninių ilgio mato valstybės etalonui. Atlikto tyrimo rezultatai panaudoti, kuriant kokybiškai naują precizinę metrologiškai susieto brūkšninių matų kalibravimo dinaminiame režime sistemą, tenkinančią aukštus skalių gamybos našumo ir kalibravimo tikslumo reikalavimus.

A. Kilikevičiaus disertacijoje (vadovas prof. habil. dr. V. Vekteris) ištirta virpesių atsiradimo priežastys ir jų įtaka komparatoriaus duomenų gavimo tikslumui. 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. Disertacija turi didelę vertę, nes buvo 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 eksperi-

mentinių 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.

Didžiausias daktaro nuopelnas yra tas, kad šioje brūkšninių ilgio matų kalibravimo srityje, yra paskelbta itin mažai mokslinių darbų, nebuvo sukurtų komparatoriaus dinaminių paklaidų metodikų, todėl iki tol tyrimuose šios paklaidos laikytos nereikšmingomis.

A. Chaziachmetovo (vadovas prof. dr. V. Dailidėnas) disertacijoje keliama Lietuvos ilgio etalono tobulinimo būtinybė, pereinant nuo liestukiniu principu prie etaloninės spinduliuotės šaltinių veikiančios kalibravimo įrangos. Tai pat autorius nustatė laboratorijų kalibravimo galimybes, įvertindamas regresinės analizės metodais etaloninių ilgio matų kalibravimo rezultatus iš tarplaboratorinių lyginimų ataskaitų.

Darbe parodytas esamo Lietuvos galinių ilgio matų sieties su valstybiniu etalonu schema (Gaidamovičiūtė 2000), ir numatomos gairės sukurti aukščiausio tikslumo lygmens etaloną, nurodyti komparatoriaus su lazerinio interferometro poslinkio nuskaitymo sistema privalumai.

Atliktas tarplaboratorinių lyginimų rezultatų neapibrėžties įverčių sklaidos tyrimas parodė, kad trumpiems matams yra pasiekiamas neapibrėžties įvertis 2–30nm 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. 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. Tai pat tyrinėti jau ne tik žinomi plokščiųjų kampų matavimo metodai, bet ir sukurtas naujas apskritiminės skalės kalibravimo metodas. Autorius šį metodą skelbia kaip išradimą ir yra pateikęs paraišką LR Valstybiniam patentų biurui.

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.

D. Saulevičiaus darbe (prof. habil. dr. Laimutis Telksnys) sprendžiama problema – yra savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo automatizavimas. Tam, kad būtų pasiektas tikslas, buvo sukurti savaimingai besiformuojančių puslaidininkių elementų struktūrų atpažinimo metodas ir algoritmas, bei šias struktūras atpažįstanti programinė įranga.

Disertacijoje 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. Deja disertacijoje yra labai trumpas eksperimento ir eksperimentiškai gautų rezultatų aprašymas, todėl nelabai aišku kaip autorius įgyvendino metodus ir pasiekė tikslą.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir uždaviniai

Atlikus literatūros analizę nustatyta, kad dinaminio kalibravimo problematika aktuali ir yra mažai skirta tyrimų realios brūkšninių matų kalibravimo sistemos paklaidoms. 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. Kad ištirti ilgio kalibravimo paklaidas, reikia:

1. Sudaryti brūkšninių matų skalių judančio vaizdo stebimo per mikroskopą fizinį modelį ir jį ištirti.
2. Sudaryti precizinių ilgio matų dinaminio kalibravimo metodiką, analitiškai ir eksperimentiškai ištirti kalibravimo tikslumą įtakojančių faktorių poveikį ir optimizuoti jų reikšmes.
3. Analitiškai ir eksperimentiškai ištirti išorinių ir vidinių temperatūrinių trikdžių įtaką kalibravimo tikslumui, sukurti priemones jų poveikio kalibravimo paklaidoms sumažinti.
4. Ištirti ir minimizuoti tiesaus judesio geometrinių paklaidų įtaką kalibravimo tikslumui.

2

Brūkšnio padėties įvertinimo proceso tyrimas

Skyriuje pateikiamas vaizdo gavimo matematinis modelis, tiriamas originaliai realizuotas dinaminis kalibravimo režimas. Įvertinami vaizdo gavimo sistemos fiziniai, dėl judesio ir kiti paklaidų šaltiniai. Atskirų elementų įtaka kalibravimo paklaidoms yra tiriama modeliuojant, atliekant eksperimentus. Gauti nauji, originalūs duomenys brūkšnio padėties paklaidos įvertinimo dinaminiu kalibravimu. Skyriaus tematika paskelbti keturi straipsniai (Barakauskas 2007, 2008, 2010; Prielaidas 2010).

2.1. Rastrinio piešinio vaizdo modeliavimas ir brūkšnio padėties paklaidos analizė

Fotonas (gr. φως, phōs – šviesa) – elektromagnetinio lauko kvantas (elektromagnetinės sąveikos nešiklis), viena iš elementariųjų dalelių. Jis neturi elektros krūvio, rimties masės ir egzistuoja tik judėdamas šviesos greičiu. Fotonas 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.

Vieno vaizdo elemento šviesos signalo kelias pavaizduotas 2.1 paveiksle. Yra trys fizikinių virsmų fazės, kol fotonas tampa įtampa.



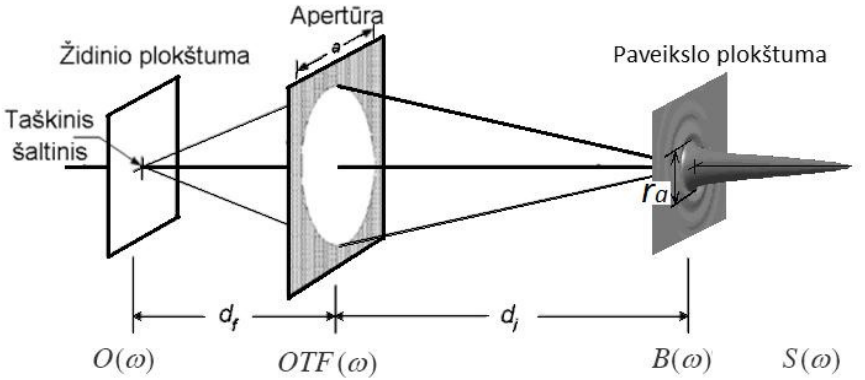
2.1 pav. Šviesos signalo fizikinių virsmų fazės
Fig. 2.1. The physical phase transitions of light signal

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. Šiuo metu rinkoje vyrauja dvi vaizdo jutiklių gamybos technologijos: CCD ir CMOS. Kameros tikrą vaizdą įsimena jutiklyje skaitmeninio paveikslo pavidale, kuriame informacija saugoma ląstelėse (angl. cell, pixel). Ląstelės yra išdėstytos eilutėmis ir stulpeliais ir kiekviena ląstelė saugo vieną reikšmę (Bovik 2005).

Šviesos srauto intensyvumas patekęs į jutiklio ląstelę keičiamas išmatuojamu įtampos dydžiu (2.1 pav.). Todėl toliau darbe, apibūdinti jutiklio ląstelės ar viso jutiklio patekusio per vaizdo užgriebimo laiką šviesos srauto dydį, kuris pereinant visą virsmų grandinę yra tiesiog proporcingas jutiklio matuojamai įtampai, naudosime terminą intensyvumas. CCD ir CMOS technologijos vaizdo jutiklių architektūra ir darbo principai aprašomi (Acton 2005, Bovik 2005).



2.2 pav. Optinės sistemos sudarytos iš vieno lęšio modelis
Fig. 2.2. Optical system consisting of a single lens model

Taškinio šaltinio šviesos srautas į kameros jutiklį patenka sklisdamas pro optinę sistemą. Jos baigtiniai matmenys vadinami apertūra. Modelyje (Acton 2005), kuris parodytas 2.2 paveiksle, yra taškinis šviesos šaltinis *O(ω)*, cilindrinis lęšis su apertūra *a* ir vaizdo jutiklis, esantis vaizdo susidarymo, toliau vadinsime paveikslo plokštumoje. Jutiklio dažninė perdavimo funkcija žymima *B(ω)*. Šioje plokštumoje susidarantis vaizdas *I(ω)* aprašomas formule:

$$I(\omega) = \frac{1}{2\pi}\{O(\omega)\cdot OTF(\omega)\cdot B(\omega)\}\otimes S(\omega). \tag{2.1}$$

Objekto taškinis šaltinis, esantis židinio plokštumoje, atspindi šviesą sferinėmis bangomis, kurias apriboja lęšio apertūra. 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). 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:

$$\frac{1}{d_f}+\frac{1}{d_i}=\frac{1}{f}. \tag{2.2}$$

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

$$\mathrm{VTIF}=\left[2\frac{\mathrm{J}_1\left(\pi\left[\frac{r}{r_o}\right]\right)}{\pi\left[\frac{r}{r_o}\right]}\right]^2, \tag{2.3}$$

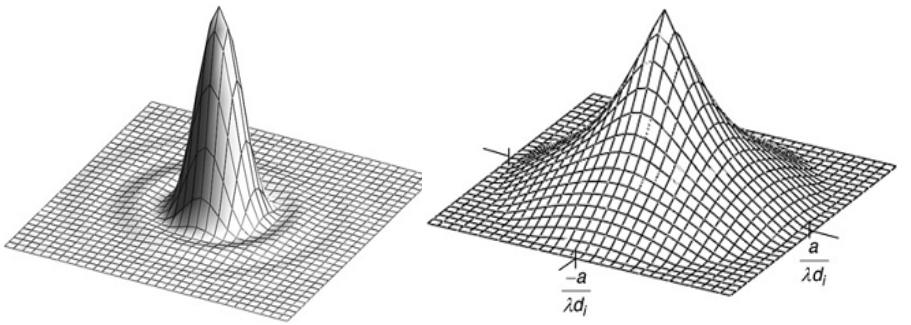
čia J_1 yra pirmos eilės Beselio funkcija, r_o konstanta ir spindulio atstumas r tarp taškinio šaltinio ir paveikslo plokštumos. Jie skaičiuojami iš formulių:

$$r_o=\frac{\lambda d_i}{a},$$

$$r=\sqrt{x_i^{\,2}+j_i^{\,2}}. \tag{2.4}$$

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 2.3 paveiksle (Bovik 2005).

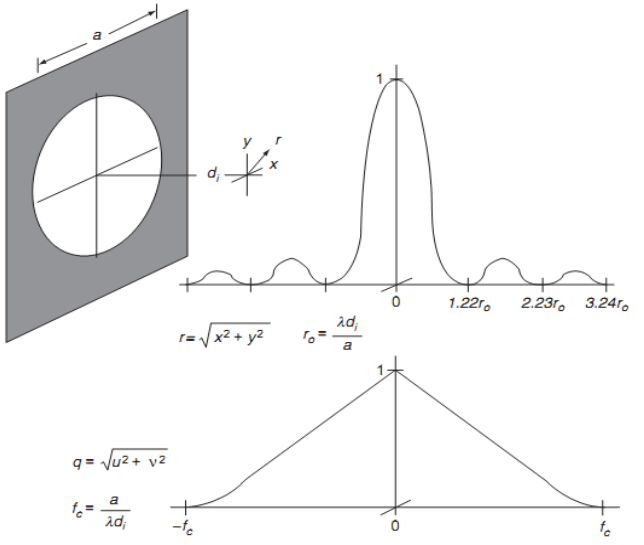


a) b)

2.3 pav. a) Cilindrinio lęšio formuojamų Airy žiedų intensyvumo trimatis vaizdas b) Cilindrinio lęšio optinės perdavimo funkcijos trimatis vaizdas
Fig. 2.3. a) three-dimensional intensity image of Airy ring of cylindrical lens b) three-dimensional image of the optical transfer function of cylindrical lens

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

$$f_c = \frac{a}{\lambda d_i}. \tag{2.5}$$



2.4 pav. Paveikslo plokštumoje formuojamas taškinio šaltinio vaizdo normuotas intensyvumas
Fig. 2.4. Normalised image intensity formed by a point source in the image plane

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. Praktikoje, visose vaizdo sistemose yra fonas, kuriame yra nors šiek tiek šviesos. Tai pat reali fizinė sistema turi didžiausio paveikslo intensyvumo ribojimą:

$$0 < C(x, y, t, \lambda) \le A\,, \tag{2.6}$$

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:

$$-L_x \le x \le L_x\,, \tag{2.7}$$

$$-L_y \le y \le L_y\,. \tag{2.8}$$

Paveikslas registruojamas ribotą laiko intervalą t:

$$-T \le t \le T\,. \tag{2.9}$$

Paveikslo šviesos srauto funkcija $C(x, y, t, \lambda)$ priklauso nuo keturių nepriklausomų kintamųjų. Funkcija turi būti netrūki visoje apibrėžties erdvėje.

Intensyvumo atsakas šviesos srauto funkcijai jutiklyje dažnai aprašomas kaip momentinė paveikslo šviesos srauto lauko intensyvumo vertė:

$$V(x, y, t) = \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) V(\lambda) d\lambda\,, \tag{2.10}$$

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

Kadangi, jutiklio jautros spektrą priimta skaidyti į trijų spalvų atskirus spektrus, dažniausiai RGB trispalvę, tai galime išreikšti:

$$\begin{aligned} R(x, y, t) &= \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) R_s(\lambda) d\lambda\,, \\ G(x, y, t) &= \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) G_s(\lambda) d\lambda\,, \\ B(x, y, t) &= \int_0^\infty C(x, y, t, \lambda) B_s(\lambda) d\lambda\,, \end{aligned} \tag{2.11}$$

čia $R_s(\lambda)$, $G_s(\lambda)$, $B_s(\lambda)$ yra trispalvės 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:

$$F(x,y,t) = \int_0^\infty C(x,y,t,\lambda)S(\lambda)d\lambda\,, \tag{2.12}$$

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

Monochromatinės kameros jutiklio dažninė funkcija aprašoma viena kreive. Monochromatinėse sistemose paveikslo funkcija $F(x, y, t)$ reiškia paveikslo intensyvumą. Čia trispalvės sistemos atskirų spektrų intensyvumų reikšmės yra išreiškiamos viena intensyvumo reikšme. Ši trimatė paveikslo funkcija tai pat naudojama kameros jutiklio triukšmams aprašyti.

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

$$\langle F(x,y,t)\rangle_T = \lim_{T\to\infty}\left[\frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} F(x,y,t)L(t)dt\right], \tag{2.13}$$

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

$$\langle F(x,y,t)\rangle_S = \lim_{\substack{L_x\to\infty\\ L_y\to\infty}}\left[\frac{1}{4L_xL_y}\int_{-L_x}^{L_x}\int_{-L_y}^{L_y} F(x,y,t)dxdy\right]. \tag{2.14}$$

Tiriamoje sistemoje paveikslai yra fiksuojami tam tikrą laiko intervalą kas tam tikrą atstumą, todėl toks diskretus paveikslo fiksavimo būdas panašus į filmavimo procesą. Filmuojant erdvės vaizdas yra diskretizuojamas laiko erdvėje ir išsaugoma vaizdo informacija pasirinktam laiko tarpui pasirinktu laiku.

Dvimatės sistemos nepertraukiamas vaizdas sudarytas iš dvimačių įėjimo funkcijų rinkinio $F_1(x, y)$, $F_2(x, y)$, ... , $F_N(x, y)$ 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 $-\infty < x, y < \infty$.

$$\begin{bmatrix} G_1(x,y) = O_1\{F_1(x,y), F_2(x,y), ..., F_N(x,y)\} \\ \vdots \\ G_m(x,y) = O_m\{F_1(x,y), F_2(x,y), ..., F_N(x,y)\} \\ \vdots \\ G_M(x,y) = O_M\{F_1(x,y), F_2(x,y), ..., F_N(x,y)\} \end{bmatrix}. \tag{2.15}$$

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

Kai pirminio vaizdo kiekvieną įėjimo funkciją atitinka viena išėjimo funkcija, tai yra perkeliami atitinkami elementai iš stebimo objekto plokštumos į vaizdo jutiklio plokštumą, gauname tokią išraišką:

$$G(x,y) = O\{F(x,y)\}. \tag{2.16}$$

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

$$\int_{-\varepsilon-\varepsilon}^{\varepsilon\ \varepsilon}\delta(x,y)dxdy = 1, \tag{2.17}$$

$$\int_{-\varepsilon-\varepsilon}^{\varepsilon\ \varepsilon}F(\xi,\eta)\delta(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta = F(x,y), \tag{2.18}$$

čia ε yra teigiamas, į nulį artėjantis dydis. 2.18 formulė yra vadinama Dirac‘o funkcijos *sijojimo savybe*.

Operaciniame skaičiavime dažnai tenka susidurti su Dirac`o delta funkcija. Ji buvo pradėta naudoti fizikoje ir pavadinta funkciją įvedusio fiziko vardu. Griežtai kalbant, ši funkcija yra visai ne funkcija, o funkcionalas, t.y. funkcija, kuri įgyja prasmę tik po integralo ženklu. Dirac`o delta funkcija ypatinga tuo, kad visoje realių skaičių ašyje ji yra lygi nuliui, išskyrus vieną vienintelį tašką. Taške t = 0 ji lygi begalybei, tačiau ne bet kokiai, o tokio „didumo“, kad jos integralas prilygsta vienetui, jei tik „begalinis taškas“ pakliūva į integravimo sritį.

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):

$$O\{aF_1(x,y)+bF_2(x,y)\} = aO\{F_1(x,y)\}+bO\{F_1(x,y)\}, \tag{2.19}$$

čia a ir b konstantos visoje skaičių aibėje.

Iš aukščiau parašytų formulių galima išvesti:

$$G(x,y) = O\left\{\int_{-\varepsilon-\varepsilon}^{\varepsilon\ \varepsilon}F(\xi,\eta)\delta(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta\right\}. \tag{2.20}$$

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

$$G(x,y) = \int_{-\varepsilon-\varepsilon}^{\varepsilon\ \varepsilon}F(\xi,\eta)O\{\delta(x-\xi,y-\eta)\}d\xi d\eta\,. \tag{2.21}$$

Tada antrasis integralo narys gali būti išreikštas:

$$H(x,y,\xi,\eta) \equiv O\{\delta(x-\xi, y-\eta)\}. \tag{2.22}$$

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

$$G(x,y) = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} F(\xi,\eta)H(x,y,\xi,\eta)d\xi d\eta\,. \tag{2.23}$$

Adityvi tiesinė dvimatė sistema yra vadinama simetriška, jei impulsinis atsakas priklauso tik nuo x-ξ ir y-η. Optinėse sistemose stebimas vaizdas visada būna židinio plokštumoje ir perstumiamas tik joje, todėl ją galima laikyti simetriška. Simetriškumo savybę galime užrašyti taip:

$$H(x,y,\xi,\eta) = H(x-\xi, y-\eta). \tag{2.24}$$

Tada superpozicijos integralas supaprastinamas

$$G(x,y) = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} F(\xi,\eta)H(x-\xi, y-\eta)d\xi d\eta\,. \tag{2.25}$$

Panaudojus sąsūkos operacija gaunama išraiška

$$G(x,y) = H(x,y) \otimes F(x,y). \tag{2.26}$$

Kadangi sąsūkos integralas yra simetriškas, tai galioja

$$G(x,y) = \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} F(x-\xi, y-\eta)H(\xi,\eta)d\xi d\eta\,. \tag{2.27}$$

Apibendrinimas. Jei yra vaizdo fiksavimas kadrais kas tam tikrą laiko intervalą, tai priimtina kaip tolydžios vaizdo funkcijos diskretizavimas laiko ašyje naudojant Dirac delta funkciją $\delta(x, y)$. 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)

$$F(x_o, y_o) = \iint F(x,y)\delta(x-x_o, y-y_o)dxdy\,. \tag{2.28}$$

Iš to galime daryti išvadą, kad:

$$F(x,y)\delta(x-x_o, y-y_o) \equiv F(x_o, y_o)\delta(x-x_o, y-y_o). \tag{2.29}$$

Tai yra centruotos fiksuotame taške (x_o, y_o) delta funkcijos sandauga su tolydžia erdvėje paveikslo funkcija yra ekvivalenti delta funkcijos sandaugai su fiksuota paveikslo funkcijos verte $F(x_o, y_o)$, todėl gauname

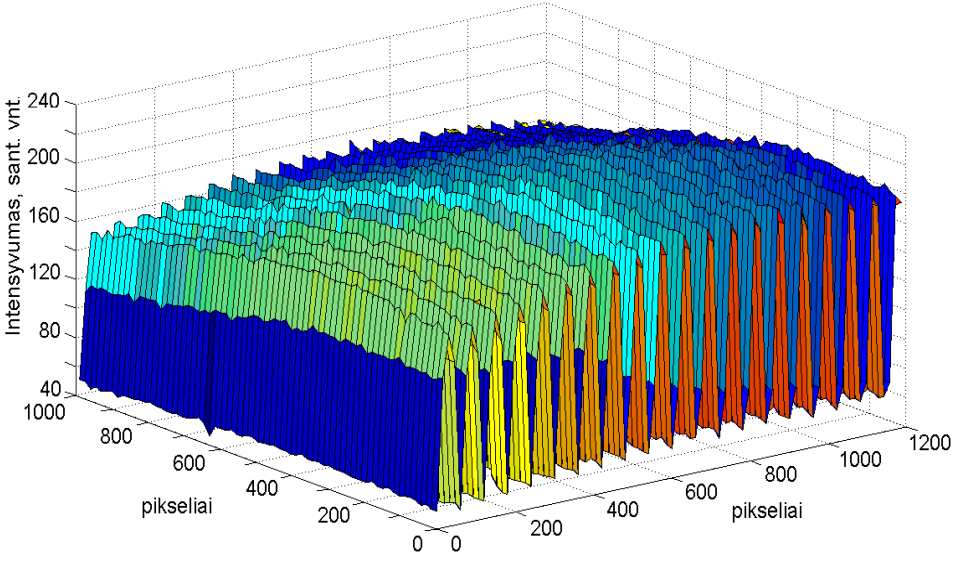
$$F(x,y)\otimes\delta(x-x_o,y-y_o)=F(x-x_o,y-y_o). \tag{2.30}$$

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.

2.2. Vaizdo apšvietimo netolygumo kompensavimo metodika

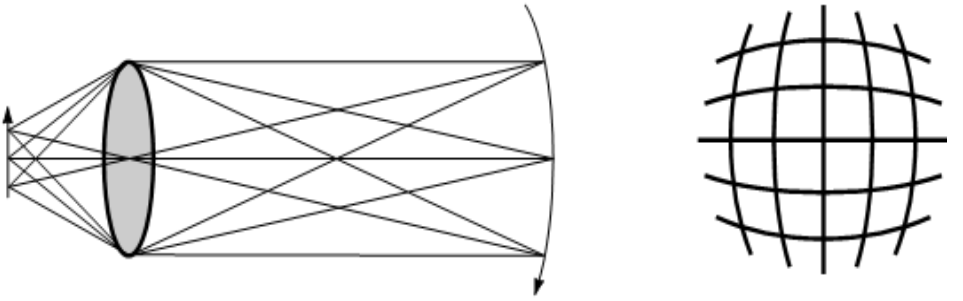
Vaizdo duomenys, pagal kuriuos randama brūkšnio padėtis, esminiai priklauso nuo skalės apšvietimo, jo tolygumo ir skalės padėties židinio plokštumos atžvilgiu. Šiame poskyryje tirtas skalės segmento, esančio mikroskopo regos zonoje, apšvietimo intensyvumo nevienodumas brūkšnio detektavimo metu, apšvietimo intensyvumo išlyginimo galimybė ir galimybė tokiu būdu padidinti brūkšnio padėties detektavimo tikslumą.



2.5 pav. 1000x1200 pikselių raiškos rastro paveikslo intensyvumas
Fig. 2.5. Intensity of raster image at 1000x1200 pixel resolution

2.5 paveikslo vaizdas gaunamas nufotografavus rastrą per 20 kartų padidinimo objektyvą su trumpa, kelių dešimčių mikrosekundžių ekspozicija. Pagrindinė optinių iškraipymų priežastis yra cilindrinė optika. Plokščias objekto vaizdas pereidamas cilindrinę optika turi būti fokusuojamas į sferinį paviršių. Deja

šiuo metu tik laboratorijose yra pagaminami šviesai jautrūs jutikliai ant kreivų paviršių. Prekyboje visi skaitmeninių kamerų jutikliai yra plokšti ir dėl to panaudojus cilindrinę optiką, gauname „statinės“ formos objekto vaizdo iškraipymą kameros jutiklio lauke. Tokio vaizdo susidarymo schema yra 2.6 paveiksle.



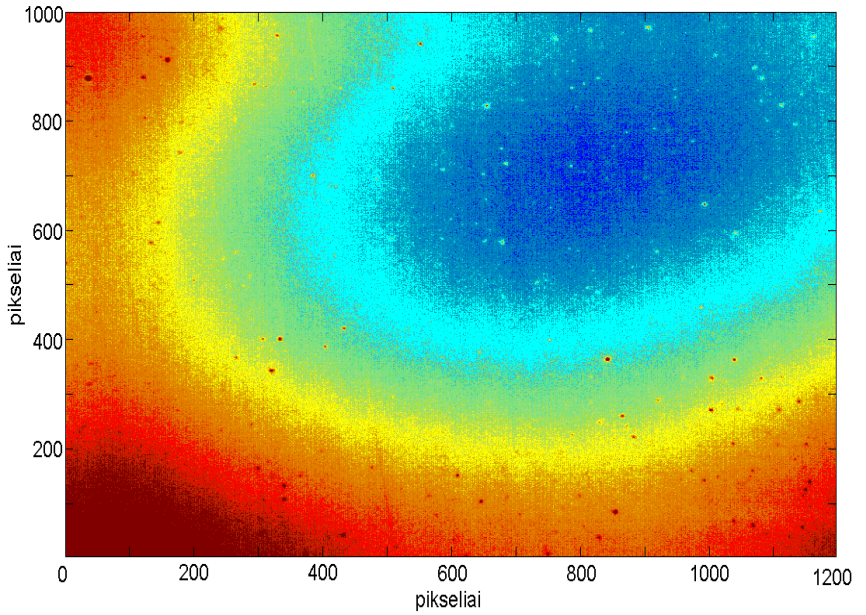
2.6 pav. Cilindrinės optikos aberacijos dėl jutiklio formos
Fig. 2.6. Aberrations of the cylindrical lenses caused by sensor shape

Kitas iškraipymo faktorius yra susijęs su kameros jutiklio centro sutapdinimu su mikroskopo optikos ašimi. Plokščio jutiklio kraštuose vaizdas bus išfokusuotas. Dėl to kraštuose turėsime mažesnę brūkšnių signalo amplitudę. Jei jutiklio centras yra paslinktas mikroskopo optinės ašies atžvilgiu, tai kraštuose signalo amplitudės bus nevienodos. Tą patį efektą gali sąlygoti ir kameros jutiklio plokštumos nestatmenumas optinei ašiai.

Jei matuojama atspindinčioje šviesoje, tai mikroskopo objektyvo optinė ašis turi būti statmena matuojamo objekto ašiai. Tą užtikrinti įvairiems objektams yra sudėtinga. Mikroskopo objektyvas išstatomas granitinės bazės atžvilgiu. Tačiau matuojant skalę, reikia tikrinti ar skalės paviršius yra statmenas objektyvo optinei ašiai.

Skalės brūkšniai turi būti apšviečiami kolimuota šviesa. Jei turime taškinį šaltinį, tai optikoje reikalaujama, kad jis būtų nutolęs bent per 30 židinio atstumų. Tai padaryti neįmanoma, be kolimuojančios optikos. Tačiau, kai šaltinis ne taškinis, ir naudojamas didelės galios šviesos blyksnis, kolimuojančių lęšių sistema tampa parazitinių atspindžių priežastimi. Todėl nenaudojant kolimuojančios optikos, yra labai svarbu pastatyti šviesos šaltinį taip, kad patenkantis šviesos srautas į židinio plokštumą būtų kuo tolygesnis. Jo centrinė ašis tai pat turi sutapti su mikroskopo optikos centrine ašimi.

2.7 paveiksle pateiktas apšvietimo intensyvumas, kai yra apšviečiama chromo danga su 58 % atspindžio koeficientu. Paveiksle matome, kad yra nesimetriškai apšviečiamas fotografuojamas paviršius. Apšvietimo intensyvumo reikšmes atvaizduojame spalvomis, kad lengviau suvokti matomą vaizdą.



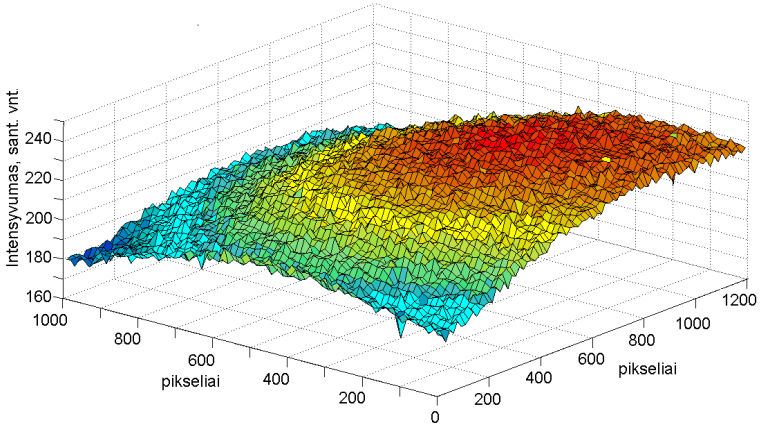
2.7 pav. Apšvietimo intensyvumas naudojant dujinio išlydžio lempą
Fig. 2.7. Illumination intensity using the gas discharge lamp

Mėlyna spalva parodytas didžiausias intensyvumas, raudona – mažiausias. Matomas laukas yra apytiksliai 330x400 μm. Dideli elipsės formos žiedai rodo, kad kameros plokštuma nepakankamai statmena mikroskopo optinei ašiai. Maži tamsūs taškeliai tai ant chromo dangos išbertų poliravimo miltelių grūdeliai. Jie reikalingi tam, kad galima būtų sufokusuoti mikroskopą ir pagal juos nuspręsti, kur yra židinio plokštuma, kiek ir kur pasislinkusi kameros jutiklio centrinė ašis objektyvo ašies atžvilgiu. 2.7 paveiksle dešiniame apatiniame kvadrante ryškumas yra geriausias, nes čia poliravimo miltelių grūdeliai ryškiausiai matomi.

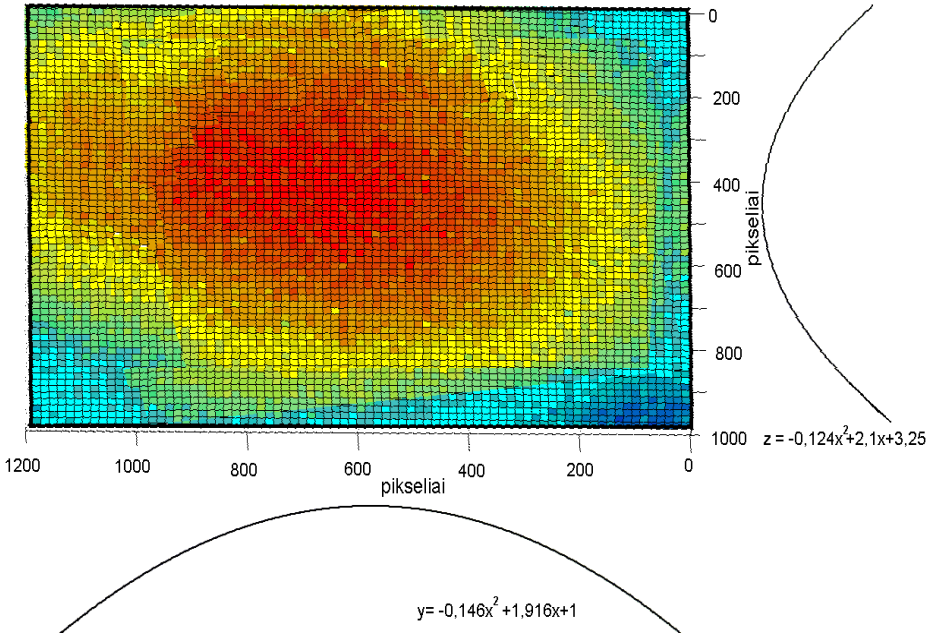
Vėliau išfiltruojamos grūdelių reikšmes specialiu filtru, kuris aptinka mažus objektus, išskiriančius savo atspindėtos šviesos kiekiu. Toks vaizdas pateiktas 2.8 paveiksle. Stebint kompiuterio ekrane atnaujinamas nuotraukas yra keičiamos kameros ir apšvietimo šaltinio padėtys, kol gauname tenkinanti rezultatą 2.9 paveiksle. Šiame paveiksle vienas langelis yra 12x15 pikselių lauko vidutinio intensyvumo reikšmė.

Apšvietimo intensyvumo išlyginimas atliekamas aproksimuojant apšvietimo reikšmes parametrine funkcija (šiame darbe algebriniu polinomu) arba sumuojant apšvietimo intensyvumą išlyginančias reikšmes kiekvienam pikseliui. Abu būdai yra realizuojami tik nufotografavus ir persiuntus paveikslą iš kameros į PK. Tai pasyvios kompensacijos metodas, realizuojamas programiniu būdu. Jo

privalumai: tai lankstumas (galima lengvai perkonfigūruoti naujam apšvietimo šaltiniui), nereikia papildomų prietaisų.



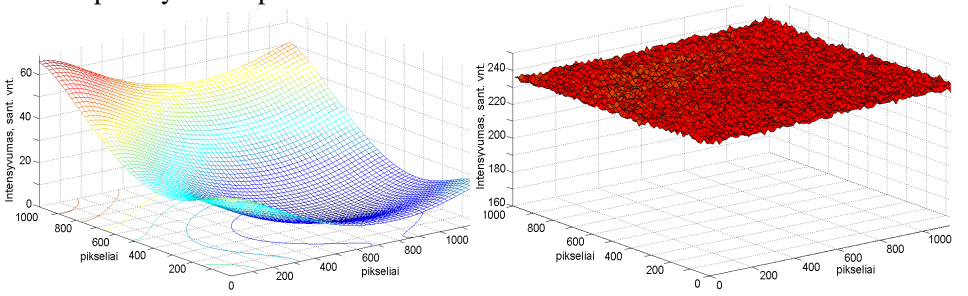
2.8 pav. Apšvietimo intensyvumo vaizdas nufiltravus poliravimo grūdelius
Fig. 2.8. The image of illumination intensity after grain filtration



2.9 pav. Atspindinčio paviršiaus vaizdas suderinus kameros ir apšvietimo šaltinio optinių ašių koordinates
Fig. 2.9. The image of reflective surface after the alignment camera and light source optical axis coordinates

Papildomiems parametrams nustatyti fotografuojami trys skalių ruošiniai: 1) kurio atspindys 52 %, 2) kurio paviršius yra skaidrus, 3) ruošinio nėra ir fotografuojama be apšvietimo.

Apšvietimo intensyvumo nevienodumo kompensavimas yra efektyvus būdas sumažinti paklaidas detektuojant brūkšnio kraštą. Tam pradžioje paskaičiuojame gautų nuotraukų eilučių ir stulpelių vidurkiai ir gauti jų reikšmių vektoriai yra aproksimuojami 2 laipsnio algebriniu polinomu (2.9 pav.). Vėliau panaudojus šių dviejų polinomų ortogonalią sandaugą ir apskaičiavus reikšmes kameros jutiklio dydžio laukui yra gaunama kompensavimo matrica. Ji pakankamai gerai aproksimuoja tiriamą paveikslą, tačiau aukštesnės, 4 ir 6 eilės polinomo sandaugos rezultatai dar geresni. Įvertinimui skaičiuojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis atimant iš nufotografuoto vaizdo aproksimuotą kompensavimo matricą. Tarp aproksimacijos 4 ir 6 eilės polinomais šio įverčio skirtumas nedidelis, todėl paveikslams dėl paprastesnių skaičiavimų skaičiuojame 4 eilės polinomą. Gautos kompensavimo matricos ir kompensuoto paveikslo apšvietimo trimačiai vaizdai parodyti 2.10 paveiksle.



2.10 pav. 3D vaizdai a) kompensavimo matricos b) kompensuotas
Fig. 2.10. 3D image a) of compensation matrix, b) compensated

2.10 paveikslai parodo, kad įmanoma išlyginti paveikslo intensyvumą. Tačiau įvairioms dangoms su skirtingais atspindžio koeficientais reikia suskaičiuoti individualias matricas. Todėl buvo ieškota priklausomybė kaip kinta kompensavimo matricos forma nuo dangos atspindžio koeficiento. Atlikus eksperimentus sudarytos priklausomybės nuo ekspozicijos laiko, nedideliame intervale (14 – 20 µs), ir nuo dangos atspindžio. Buvo sudarytos septynios kompensavimo matricos skirtingiems ekspozicijos laikams kas vieną µs. Nustatyti priklausomybei nuo dangos atspindžio bandymų metu buvo išmatuoti skalių ruošiniai pilnai chromuotos, su mažesniu atspindžio koeficientu ir be dangos. Buvo rasta netiesinė priklausomybė nuo dangos atspindžio koeficiento.

Tiriamoje sistemoje yra naudojama ksenono dujų išlydžio lempa. Jos energijos virsmo į šviesą naudingumo koeficientas siekia 50 %. Ji yra uždegama aukšta įtampa pramušant stiklinėje kolboje esančias dujas ir jas jonizuojant. Jonizuotos dujos praleidžia srovę ir kondensatorius pradeda lempoje išsikrauti.

Srovė įkaitina dujas iki plazmos būsenos, tada elektrinė varža yra mažiausia ir kondensatorius pilnai išsikrauna. Nustojus tekėti srovei, dujose elektronai peršoka atgal į artimesnes orbitas ir išspinduliuoja fotonus. Gaunamas keliasdešimt mikrosekundžių didelės galios šviesos blyksnis. Deja, kiekvieno blyksnio energija nėra vienodo dydžio, pačių moderniausių šiuo metu esančių ksenono lempų aprašymuose pateikiama ±2–3 % blyksnio energijos sklaida.

Blyksnio energijos išsibarstymui nustatyti buvo atliktas eksperimentas. Jei mikroskopas su kamera nekeičia savo padėties atžvilgiu stebimo objekto eksperimento metu, tai tokią optinę sistemą galima laikyti tiesine. Užfiksuoto vaizdo intensyvumas tiesiogiai proporcingas blyksnio energijai. Taip pat intensyvumas priklauso nuo ekspozicijos laiko. Todėl viso intensyvumo išsibarstymas bus lygus blyksnio energijos ir ekspozicijos laiko išsibarstymų sąveikai.

Skaitmeninės kameros gamintojas pateikia, kad kameros ekspozicijos laikas kartotinis kameros procesoriaus ciklui. Procesoriaus ciklas proporcingas 160 MHz taktavimo dažniui. Bet koks užprogramuotas veiksmas turi būti atliktas tam tikrą ciklų skaičių, todėl ekspozicijos laikas gali svyruoti vieno ciklo ribose. Be to jis priklauso ir nuo trumpiausios eilutės nuskaitymo laiko. Tai yra susiję su elektroninės sklendės atidarymo būdu (rolling arba global shutter).

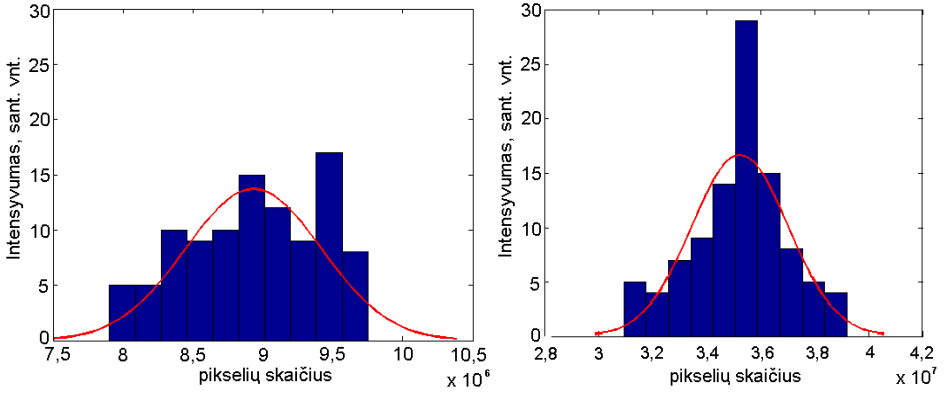
Išlaikydami tokias pačias sąlygas kaip ir kalibravime, atidarome elektroninę sklendę, kad visų eilučių ekspozicija prasidėtų vienu metu. Sklendė atidaroma išoriniu signalu, kuris kameros įėjimo grandinėje yra filtruojamas ir mažiausia jo trukmė, į kurią reaguoja procesorius yra apie 500 ns. Minėti faktoriai gali pavėlinti elektroninės sklendės atsidarymą, tačiau ekspozicijos trukmę nustato tik procesoriaus ciklo trukmė. Laiko intervalams yra naudojamas ciklas, kurio trukmė 48 ns, todėl 10 µs trumpiausiai ekspozicijos trukmei gausime mažesnę nei 0,25 % paklaidą.

Kadangi ekspozicijos trukmės paklaida yra nykstamai maža, tai fotografuojam vaizdų intensyvumų išsibarstymas bus proporcingas blyksnio energijos išsibarstymui. Eksperimento metu buvo keičiamas ekspozicijos laikas nuo 10 iki 20 µs kas 1 µs 40 paveikslų serijai. Vertinimui imama serijos kiekvieno paveikslo visų pikselių reikšmių suma.

Kiekvieną seriją atvaizduoju histograma. Histogramos aproksimuotos standartizuota normaliojo skirstinio funkcija:

$$f(x)=\frac{1}{s\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_V}{s}\right)^2}, \tag{2.31}$$

čia x – histogramos stulpelių reikšmės, x_V – histogramos stulpelių reikšmių vidurkis, e – natūrinis logaritmas, s – histogramos stulpelių skaičius.

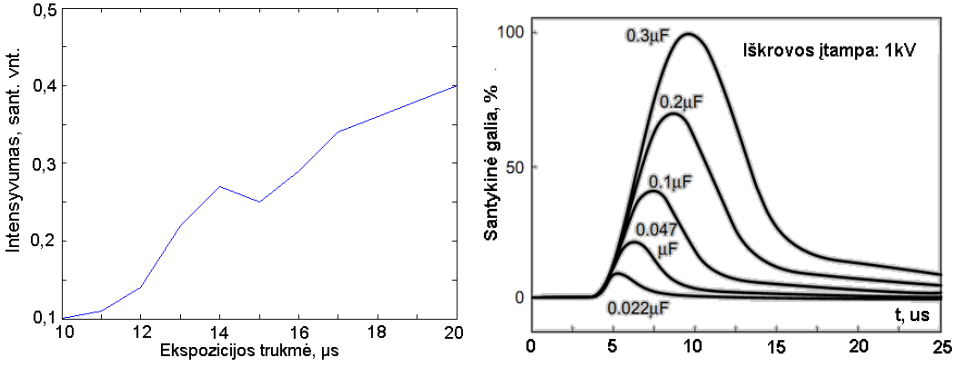


a) b)

2.11 pav. 40 paveikslų serijos bendro intensyvumo histogramos a) 10 µs ekspozicijos trukmės b) 20 µs ekspozicijos trukmės

Fig. 2.11. Overall intensity histogram of 40 images serie a) at 10 µs exposure b) at 20 µs exposure

Paveiksluose 2.11 a) ir b) pavaizduotos mažai atspindinčio paviršiaus tirtos trumpiausios 10 µs ir ilgiausios 20 µs ekspozicijos trukmės serijos histogramos. Matome, kad esant trumpiausiai ekspozicijai, gauname labiau išsibarsčiusi bendrą intensyvumą. Ilgėjant ekspozicijai išsibarstymas mažėja. Gauta bendro paveikslų intensyvumo priklausomybė nuo ekspozicijos laiko (2.12 a) pav.) mus dominančiame intervale yra beveik tiesinė.



a) b)

2.12 pav. a) Paveikslų bendro intensyvumo priklausomybė nuo ekspozicijos trukmės, b) Blykstės santykinės galios nuo kondensatoriaus talpos laikinė priklausomybė

Fig. 2.12. a) Dependence of image overall intensity from exposure time, b) Dependence of relative power of flash fom capacitor capacitance

Nors yra teigiama, kad dujų išlydžio lempa užsižiebia per mikrosekundės dalis, tačiau pilną galią pasiekia tik po kelių mikrosekundžių, kaip matome 2.12 b) paveiksle. Blyksnio galia priklauso nuo kondensatoriaus talpos ir užkrovimo.

2.3. Brūkšnio detektavimo algoritmo analizė

Svarbiausias mikroskopo parametras yra jo skyra – sugebėjimas skirti mažiausias objekto dalis. Optinė skyra apibrėžiama kaip mažiausias atstumas tarp dviejų taškinių šaltinių, kurie vaizdo paveikslo plokštumoje yra atpažįstami kaip du objektai. Nėra unikalaus būdo nustatyti šiai skyrai, kadangi šiuolaikinės optinės sistemos yra sudarytos iš daugybės lęšių, ir jų VTIF labai skirtingos. Kadangi skyros sąvoka siejama su taškiniais šaltiniais, tai galima skyrą apibūdinti VTIF funkcijos skiriamumu. Kai VTIF persikloja daugiau nei leidžia optinio jutiklio skyra, tai stebimi objektai tampa neatskiriami. Skyra charakterizuojama dažniausiai dviem parametrais: Abbe ir Reilėjaus atstumais

$$r_{Abbe} \approx 0{,}5\left(\frac{\lambda}{NA}\right),\ r_{Airy} = 1{,}22 r_o = 0{,}61\left(\frac{\lambda}{NA}\right). \qquad (2.32)$$

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.

Turint šiuos parametrus galima parinkti 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 20x padidinimui diskretizuojamas objekto vaizdas 0,32 µm intervalais arba 1,5 rastrinės struktūros periodo į µm. Tai tenkina Reilėjaus kriterijų.

Optinei sistemai privalomas dar vienas reikalavimas, kad signalo diskretizavimo dažnis turi būti ne mažiau kaip du kartus didesnis, nei aukščiausias signalo dažnis. Kadangi mažiausias brūkšnio plotis yra 2 µm, tai šiai sistemai toks reikalavimas tenkinamas.

Šie skaičiavimai yra apytiksliai, kadangi pilnam įvertinimui reikia žinoti objekto paviršiaus atspindžio, pralaidumo, optinio tankio charakteristikas ir apšvietimo šviesos srauto intensyvumą.

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

$$\frac{\Delta\sigma_{LER}}{\sigma_{LER}} \approx \frac{1}{\sqrt[2]{2n}}. \qquad (2.33)$$

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

Kontūras – tai riba tarp šviesios ir tamsios vaizdo dalies. Kontūras yra ten kur susiduria vertikalūs ir horizontalūs paviršiai. Kontūras parodo ryškius vaizdo intensyvumo pasikeitimus, kurie mūsų atveju yra šviesą atspindintys brūkšniai ir šviesą praleidžiantys tarpai tarp jų. Tikrovėje šviesa yra atsispindima ir tarpų paviršiaus, bei įvairių šiukšlių esančių ant matuojamo objekto paviršiaus, todėl papildomi atspindžiai gali iškraipyti kontūro linija.

Kontūro nustatymo uždavinys subpikseline skyra yra sudėtingas uždavinys. Brūkšnių kontūrams nustatyti yra naudojama daug metodų, iš kurių būtų sunku išskirti efektyviausią. Kiekvienas metodas turi savitumų, nuo kurių priklauso kontūro kokybė ir jo detektavimo tikslumas.

Norint išmatuoti brūkšnio krašto šiurkštumą su mažiau nei 5 % tikslumu, reikia matuoti brūkšnio kontūro ne mažiau kaip 200 reikšmių. Tai nustatoma iš vienos nuotraukos, nes skaitmeninės kameros jutiklis užfiksuoja nuotrauką 1024x1280 pikselių matrica. Išnaudojant visą jutiklio matricos dydį, įstačius atitinkamas reikšmes formulę į 2.33 paskaičiuojama, kad šiurkštumo matavimo neapibrėžties santykinė paklaida bus ne didesnė nei 2,2 %.

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

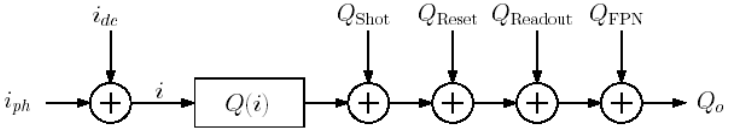
mą, tai brūkšnio krašto matavimo tikslumas yra brūkšnio kontūro pozicijų ir kameros jutiklio triukšmo vidutinio kvadratinio nuokrypių suma.

Todėl matuojamas krašto šiurkštumo nuokrypis yra skaičiuojamas:

$$\sigma^2_{matuojamas} = \sigma^2_{LER} + \sigma^2_{Kameros_triuksmas}\ . \tag{2.34}$$

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 2.13 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.



2.13 pav. Fotosrovės i_{ph} pavertimo į išėjimo įkrovą Q_o modelis
Fig. 2.13. 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:

$$Q(i) = \begin{cases} \dfrac{1}{q}(it_{int}), & 0 < i < \dfrac{qQ_{sat}}{t_{int}} \\ Q_{sat} & i \geq \dfrac{qQ_{sat}}{t_{int}} \end{cases}, \tag{2.35}$$

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 diskreti-

zuojamas pikselio dydžio padalinto iš mikroskopo objektyvo didinimo intervalais. Šiame intervale brūkšnio krašto reikšmės yra optiškai vidurkinamos. Tai pagerina brūkšnio krašto šiurkštumo rodiklį.

Kameros jutiklio užfiksuoto vaizdo nuskaitymui į tarpinį buferį, vaizdo persiuntimui naudoju specialias funkcijų bibliotekas. Programavimo įrankių paketai turi galimybę skaityti šiais bibliotekas ir panaudoti jų funkcijas. Jos yra įtraukiamos į programos pagrindinių resursų banką ir aprašomos bendrojoje dalyje. Skaitmeninių kamerų gamintojai stengiasi paruošti kuo platesnę funkcijų biblioteką ir išsamų jos aprašymą, kad privilioti kuo įvairesnių sistemų integratorius. Bibliotekos funkcijų aprašyme yra paaiškinti funkcijų naudojimo ypatumai, dažnai su pavyzdžiais, labiausiai paplitusiomis programavimo kalbomis.

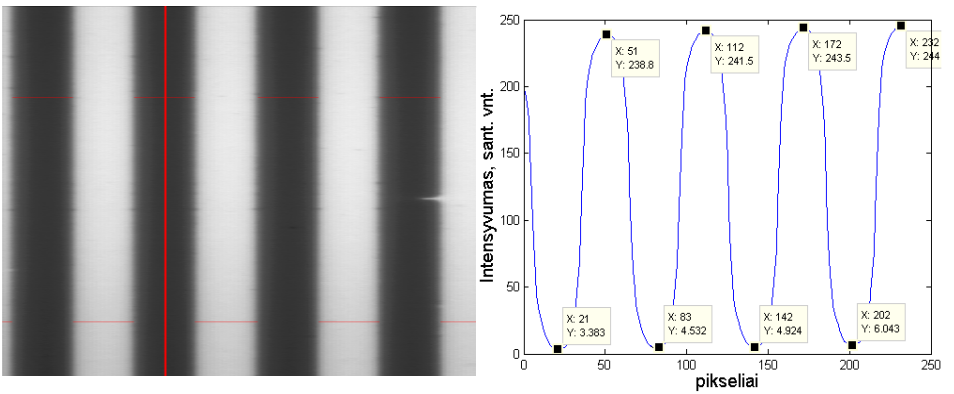
Vaizdo nuskaitymui iš kameros naudojamos funkcijos ir jos iškviečiamos pagal nustatytą eiliškumą. Kompiuteryje esančioje programoje paruošiama vieta talpinamai informacijai, išskiriama buferinės atminties zona paveikslui, sukuriamas objektas, kuris atitiktų kameros palaikomo paveikslo formatą, atidaroma sąsają, užmezgamas atitinkamu protokolu ryšys su kamera, atlikami reikalingų parametrų nustatymai, nuskaitymas, prašomas leidimas perkelti kameros jutiklio vaizdą į buferinę kameros atmintį, nuskaitoma iš kameros atminties į kompiuterio tarpinę atmintį. Kai įvyks vaizdo perkėlimas, programoje priskiriama nuskaityta informacija sukurtam objektui, išsaugomas objektas kaip byla, atlaisvinama tarpinė atmintis, ištrinamas objektas.

Tokia supaprastinta veiksmų seka yra perkeliamas vaizdas iš kameros į PK. Netgi įvertinant didelį kameros gamintojų įdirbį ruošiant funkcijų bibliotekas ir jų aprašymus, vaizdo išsaugojimas yra pakankamai sudėtingas programavimo uždavinys. Yra vaizdo apdorojimo programų paketai, leidžiantys išsaugoti kameros vaizdus automatiškai, tik kelių mygtukų paspaudimų, tačiau jų funkcijos ribotos ir sunkiai pritaikomos brūkšninių matų kalibravimo procesui. Šie programų paketai mokami ir skirti tik populiariausių skaitmeninių kamerų modeliams, kurių galimybės nėra tinkamos dinaminiam kalibravimo metodui.

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 2.14 paveiksle. Šiam brūkšnio profiliui reikia rasti ribinį lygį.

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 2.14 a) paveiksle.

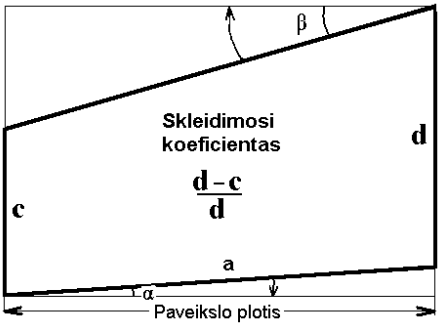


a) b)

2.14 pav. Linijinės skalės fragmento nuotrauka su detektuoto brūkšnio vidurio linija (a) bei brūkšnių profilio kreivė su pūpsnių reikšmėmis (b)
Fig. 2.14 Linear scale image of the detected line middle position (a) and the profile curve with peak values (b)

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 2.14 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 2.15 paveiksle.



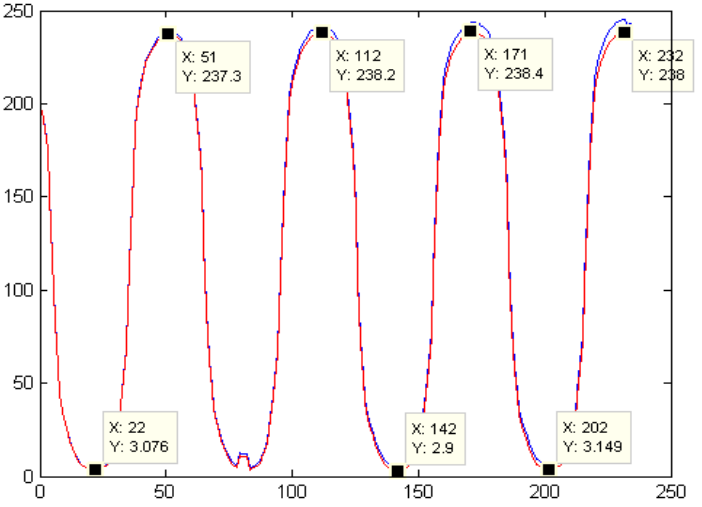
2.15 pav. Paveikslo intensyvumo profilio transformavimo schema
Fig. 2.15. Transformation scheme of image intensity profile

Iš viršūnes aproksimuojančių tiesių apskaičiuojamas normavimo koeficientas, skleidimosi koeficientas ir iš jų padauginamas gautas vaizdas pagal formulę:

$$A_{pProIe}(i_{pro}) = ProIe(i_{pro}) - bi_{pro} - \frac{(d-c)}{d} ProIe(i_{pro}) i_{pro}, \qquad (2.36)$$

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, $(d-c)/d$ – skleidimosi koeficientas.

Išlyginus 2.15 paveikslo intensyvumo profilio kreivę, gautas 2.16 paveikslas yra paruoštas brūkšnio krašto radimui.



2.16 pav. Paveikslo intensyvumo profilis prieš išlyginimą ir po išlyginimo
Fig. 2.16. Image intensity profile before transformation and after

Šiame darbe 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.

Statiniu matavimo metodu yra gaunamos geros kokybės, sufokusuotos, ilgo išlaikymo, mažai triukšmingos skalės fragmentų nuotraukos. 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 tui 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).

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

$$f(x)=\begin{cases}-1, & kai \quad -\pi \le x \le 0\\ 1, & kai \quad 0 \le x \le \pi\end{cases}. \tag{2.37}$$

Matematinėje analizėje dažniau naudojama Furjė eilute paskleista išraiška:

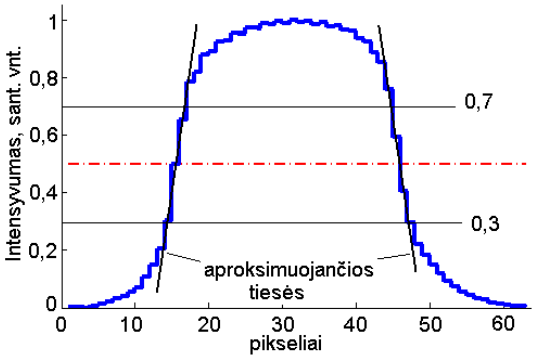
$$x_{square}(t)=\frac{4}{\pi}\sum_{k=1}^{\infty}\frac{sin\left((2k-1)2\pi ft\right)}{(2-1)}. \tag{2.38}$$

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

$$f(x)=\frac{a_o}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n\,cos(x)+b_n\,sin(nx)\right]=2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{n}sin(nx). \tag{2.39}$$

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.

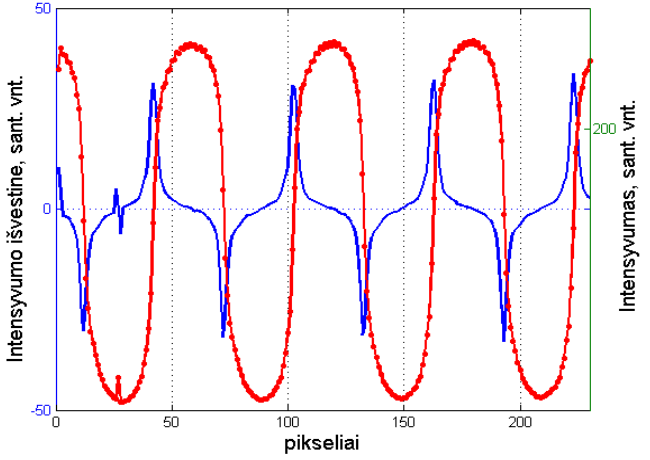
Išlyginus pagal 2.36 formulę ir sunormavus paveikslo intensyvumo profilio reikšmes gauta varpo formos kreivė. Jos reikšmės kinta nuo nulio iki vieneto. Tada komparavimo linija bus 0,5 santykinio intensyvumo lygyje, kaip parodyta 2.17 paveiksle. Toks algoritmas taikomas daugelyje tirtų komparatorių. Varpo 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).



2.17 pav. Brūkšnio profilio reikšmių grafikas ir vidurio komparavimo linija
Fig. 2.17. 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.

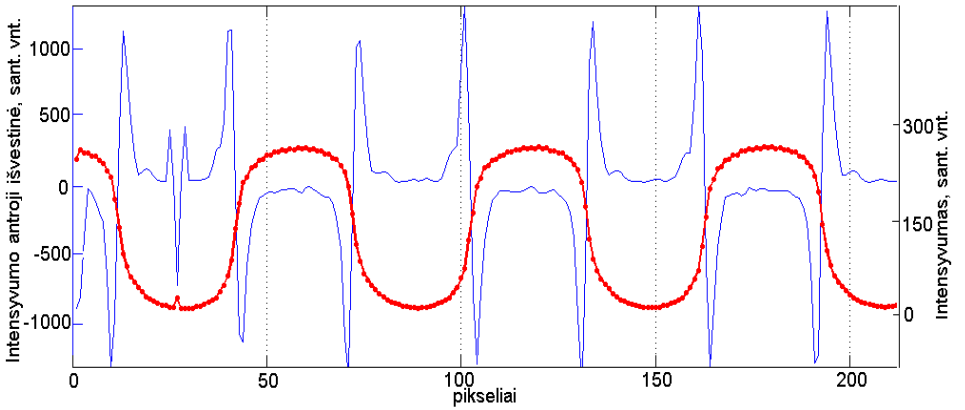
Gradiento būdas remiasi pirmąją profilio funkcijos išvestine (2.18 pav.) ir yra ieškomas lokalus ekstremumas. Kai brūkšnio vaizdas yra ryškus, tai išvestinės funkcijos viršūnės reikšmė didelė. Kai vaizdas išfokusuotas ir yra mažas signalo triukšmo santykis, tai gradiento viršūnės išplaukusios ir viršūnėje gali būti keli ekstremumai. Tai sumažina krašto radimo tikslumą.



2.18 pav. Brūkšnio profilio reikšmės ir profilio funkcijos išvestinė
Fig. 2.18. 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

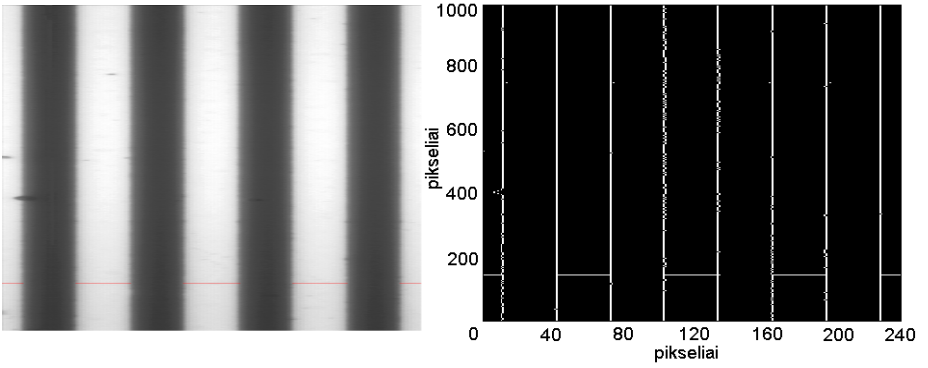
netolygumas, profilio linijoje yra ties 30 pikselio eilute. Jis ryškiai yra matomas 2.19 paveiksle antrosios išvestinės linijoje. Jei paveikslas yra triukšmingas, o taip būna su brūkšniniais matais arba kaip matavimui iškerpamas nedidelis paveikslo fragmentas, antroji išvestinė gali pateikti klaidingą rezultatą. Prieš diferencijuojant, galima papildomai filtruoti paveikslą, tačiau tai gali sumažinti tikslumą.



2.19 pav. Brūkšnio profilio reikšmės ir profilio funkcijos antroji išvestinė
Fig. 2.19. Graph of line profile values and second derivate of profile

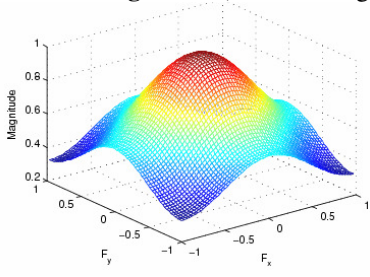
Tiriamo brūkšnio kontūrų metodo pirmo etapo tikslas yra nustatyti brūkšnio kraštus paveiksle vieno pikselio tikslumu. Kontūrų radimui yra naudojami skaitmeniniai filtai, paremti gradiento (Canny, Roberts, Prewitt) arbar antrosios išvestinės (Zerocross, LoG, Marr-Hildreth) metodais (Allebach 2000). Šiuos skaitmeninius filtrus įmanoma naudoti tik suglotninus tiriamo vaizdo reikšmes Wiener filtru, (Stauton 1998). 2.20 paveikslas 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, žiūrint į 2.21 paveikslą. Jo reikšmės būna sveiki skaičiai, sudarytos matricos kraštinės lygios, reikšmės simetriškos. Filtro dydį lemia filtruojamo paveikslo kokybė, ieškomo kontūro skyros ir proceso greitaeigiškumo parametrai. Brūkšnio profilio kreivei sąsūką galima taikyti iškart ir tokia matematinė operacija būtų labai greita, tačiau tada bus neįmanoma įvertinti defektų, esančių brūkšnio kontūro zonoje.



a) b)

2.20 pav. a) Rastro nuotrauka, b) brūkšnio kontūrai filtruojant Canny filtru
Fig. 2.20. 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)

2.21 pav. a) 3D Gauso funkcija b) 5x5 sąsūkos branduolys c) 11x11 sąsūkos branduolys
Fig. 2.21. a) 3D Gaussian mesh b) 5x5 convoliution kernel c) 11x11 convoliution kernel

Nustačius brūkšnio kontūrą įmanoma rasti ir „iškirpti“ vietas su defektais (Družovec *et al.* 2009). Tada iš naujo formuojamas brūkšnio profilis ir „tikslus“ krašto detektavimas. Tiksliam detektavimui reikia subpikselinės skyros paveikslų. Tam yra du keliai: 1) didinti paveikslo pikselių skaičių, tai yra skiriamąją gebą, 2) alternatyvūs metodai, aproksimuojantys paveikslo detales funkcijomis (Trimeche 2006, Truchetet *et al.* 2001).

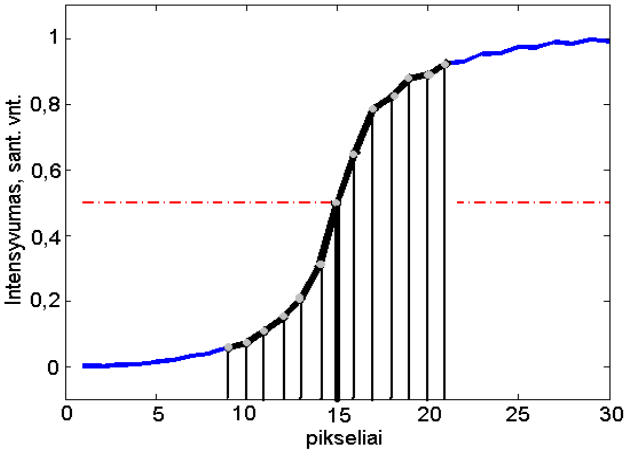
Metodas didinti skiriamąją geba dažnai naudojamas mikroskopijoje, tačiau ne matavimų srityje. Didinant gebą yra naudojama interpoliacija ir taip tarp gretimų pikselių atsiranda dar vienas, naujas pikselis. Paveikslo informacijos kiekis priklausomai nuo metodo padidėja nuo dviejų iki šešiolikos kartų. Interpoliuojant kelis kartus labai išauga interpoliavimo paklaida.

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).

2.22 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 siūlomas 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.



2.22 pav. Brūkšnio kairiojo krašto profilis ir profilio aproksimavimui naudojamos reikšmės

Fig. 2.22. Line left edge profile and profile values used for approximation

Dinaminiame kalibravimo režime skalės nuotraukos fotografuojamos judant kamerai atžvilgiu skalės, todėl susiduriama su vaizdo suliejimo dėl judesio reiškiniu (Cho *et al.* 2010). Yra nemažai metodų kaip apskaičiuoti judesio parametrus (greitį ir kryptį), tačiau naudojantis gauta informacija sudėtinga gerai rekonstruoti pirminį vaizdo. 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).

Vaizdą taip pat sulieja objektyvas. Kadangi 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 yra objektyvų gamintojai pateikia objektyvo lęšių moduliacijos perdavimo funkcija (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):

$$B = VTIF \otimes I + n\,, \tag{2.40}$$

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

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

$$VTIF = VTIF_{opt} * VTIF_{mot} * VTIF_{det} * VTIF_{el}\,, \tag{2.41}$$

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

Optinės sistemos vaizdo išliejimas yra didžiausias, nes jį sudaro daugiausiai komponentės (lęšių aberacijos), iš kurių kintanti ir sunkiausiai randama vaizdo suliejimo komponentė dėl defokusavimo. Tiriamos sistemos vaizdo suliejimo komponentė dėl defokusavimo yra didesnė nei vaizdo suliejimo dėl judesio ir žymiai didesnė nei kitos komponentės. Todėl, net ir atmetus detektoriaus ir kvantavimo taško išplitimo funkcijas, rekonstruoti vaizdo suliejimą dėl judesio yra labai sudėtinga.

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 $s_{x,y} = [s_x, s_y]$. Vaizdo suliejimas dėl judesio yra suliejimo branduolio ir pirminio paveikslo sąsūka (Favaro and Soatto 2006):

$$B = \phi_{s_{x,y}} \otimes I + n\,, \tag{2.42}$$

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:

$$\hat{B}(\omega_{x,y}) = \hat{\phi}_{s_{x,y}}(\omega_{x,y})\hat{I}(\omega_{x,y}) + \hat{n}(\omega_{x,y}), \tag{2.43}$$

čia $\omega_{x,y} = [\omega_x \omega_y]$ yra 2D dažninė charakteristika, o ženklas ˆ 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:

$$\left\|\tilde{\phi}_{s_{x,y}}(\omega_{x,y})\right\|^2 = \sum\left\|\hat{\phi}_{s_{x,y}}(\omega_{x,y})\right\|^2. \tag{2.44}$$

Rekonstrukcijos uždavinys yra rasti visus judesius, kurie didina galios spektro sumą $\left\|\tilde{\phi}_{s_{x,y}}(\omega_{x,y})\right\|^2$ 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 :

$$B(x, y) = \int_{-T/2}^{T/2} L(x, y, t)dt + n. \tag{2.45}$$

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

$$B(x, y) = \int_{-T/2}^{T/2} L(x + f(t), y, t)dt + n. \tag{2.46}$$

Integravimo kreivė parodo, kuria kryptimi juda paveikslo plokštuma laiko ir erdvės ašyje. Tai yra 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:

$$k(x,t) = \delta(x - f_x(t)). \tag{2.47}$$

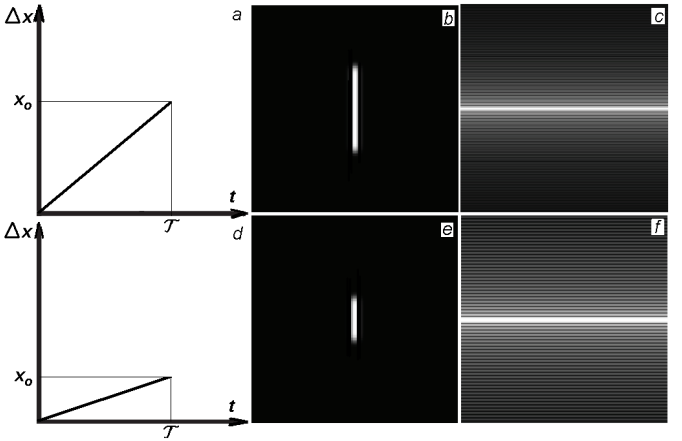
Kai judesio greitis yra ekspozicijos laiko intervale pastovus, galima supaprastinti formulę, tai yra, gautasis paveikslas būtų pirminio paveikslo ir vaizdo taško išplitimo funkcijos $\phi_{s_{x,y}} \to \phi_{s_x}$ tame intervale sąsūka. Tokiu atveju vaizdo taško išplitimo funkcija ir VTIF ϕ_{s_x} Furjė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

$$\phi_{s_x}(x) = \int_t k(x - s_x t, t)dt, \tag{2.48}$$

$$\hat{\phi}_{s_x}(\omega_x) = k(\omega_x, s_x\omega_x). \tag{2.49}$$

Esant didesniam nei vaizdo elementas poslinkiui, Furjė tranformacijos linijos persikloja ir prarandama informacija reikalinga sėkmingai rekonstrukcijai. Esant mažam subpikseliniam poslinkiui, integravimo kreivės Furjė transformacijos paveikslas yra neinformatyvus, dažnio spektro amplitudžių dedamosios labai mažos.

Tiriamos sistemos integravimo kreivės bus kaip pavaizduota 2.23 paveiksle.



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

Fig. 2.23. Integration line, a, d) for image move at constant speed against camera sensor, b, e) view in image plane, c, f) 2D Fourier transform

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

$$\phi_o(x) = \int_t \delta_{f(t)=x} dt. \tag{2.50}$$

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

$$f_s(t) = f(t) - st. \tag{2.51}$$

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

$$I(x) = \frac{1}{\Delta T} \int_{-\Delta T/2}^{\Delta T/2} r(x + \upsilon(x,t))dt \,. \tag{2.52}$$

Priimamos prielaidos, kad paveikslas per ekspozicijos laiką neįsisotina, atiderintas ekspozicijos laikas paveikslo apšvietimo intensyvumui bei apšvietimo intensyvumas nykstamai mažai kinta per ekspozicijos laiką.

Dauguma metodų yra paremti dvimate vaizdo Furjė transformacija. Iš Furjė transformacijos profilogramos galima suskaičiuoti, kiek joje ekstremumų, skaičiuojant vidurinį ekstremumą kaip du, ir taip gauti vaizdo suliejimo poslinkį. Tegul atvaizdą b formuoja nesulieto paveikslo funkcijos f sąsūka su funkcija h, kuri yra vaizdo *VTIF*. *VTIF* galima išreikšti kaip dviejų stačiakampių langų filtrą:

$$h = u(0) - u(a) = \sum_{k=0}^{a} \delta(k), \tag{2.53}$$

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:

$$b = h * f = \sum_{k=0}^{a} \delta(k) * f = f(x,y) + \ldots + f(x+a,y) = \sum_{k=0}^{a} f(x+k,y). \tag{2.54}$$

Skaičiuojant pagal 2.54 formulę, reikia padalinti gautą rezultatą iš koeficiento $c = \frac{1}{a+1}$. Furjė transformacija, pasinaudojant tiesiškumo savybe, bus lygi

$$F\{b\} = F\left\{\sum_{k=0}^{a} f(x+k,y)\right\} = \sum_{k=0}^{a} F\{f(x+k,y)\} = \sum_{k=0}^{a} e^{-j\frac{2\pi k}{N}} F\{f(x,y)\}. \tag{2.55}$$

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

$$L = \frac{2N}{r}, \tag{2.56}$$

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. Norint gauti tiksliau reikia didinti paveikslo rezoliucija naudojant interpo-

liacijos metodus, tačiau vieniems reikia specialios įrangos, kiti imlūs skaičiavimo technikos resursams.

2.4. Brūkšninių matų kalibravimo eksperimentiniai tyrimai

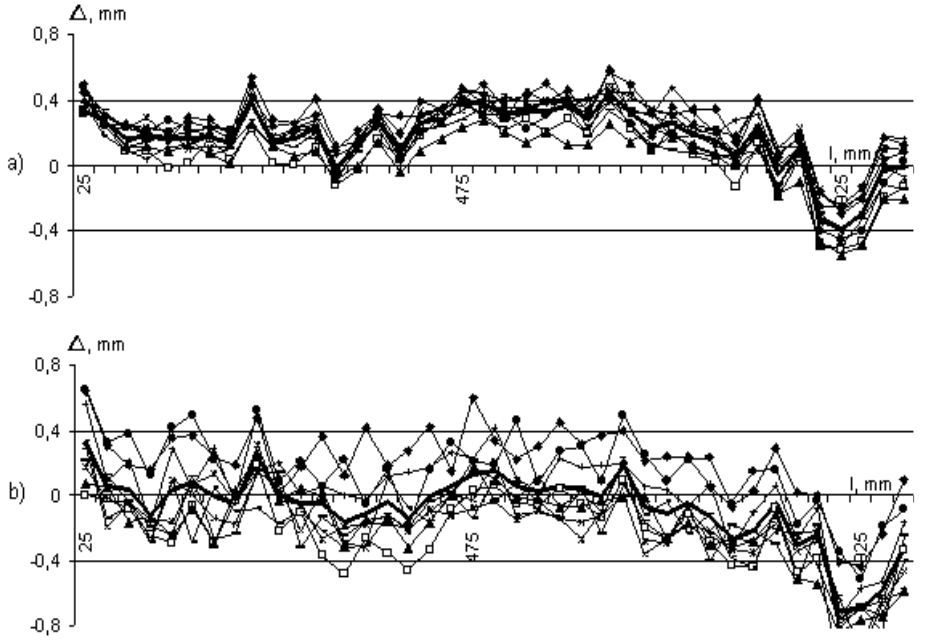
Tyrimai buvo atlikti UAB „Precizika Metrology“ termokonstantinėje laboratorijoje ant kuriamo brūkšninių ilgio matų komparatoriaus prototipo. Ištirti ir optimizuoti karietėlės judėjimo greičio ir kameros fotografavimo parametrai, esant frikcinės pavaros 2007 metais ir traukimo lynu mechanizmams 2008 metais.

Kalibravimo tikslumo priklausomybės nuo judesio greičio įvertinimui 1 m serijinės gamybos rastrinė skalė buvo kalibruojama skirtingais, didesniais ir mažesniais už skaičiuotąjį ir priimtą optimaliu 3 mm/s greitį. Kadangi matavimo greitis didžiausią įtaką daro atsitiktinei kalibravimo paklaidos komponentei, tai šio tyrimo kriterijumi priimta 10 matavimų vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis šių matavimų vidurkio reikšmių atžvilgiu.

Tyrimai atlikti esant šiems matavimo greičiams: 2 mm/s, 3 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s, 8 mm/s, 10 mm/s. Karietėlė vedama frikcinės pavaros, kurios veikimas aprašytas (Kilikevičius 2009).

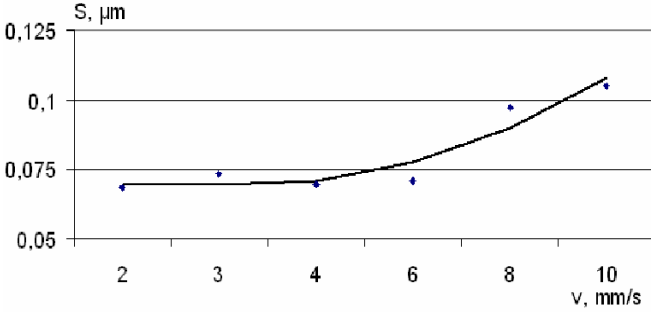
Kiekvienam greičiui buvo atlikta po 10 rastrinės skalės paklaidos matavimų, iš jų rastos vidurinės paklaidos reikšmės, suskaičiuotas vidutinių kvadratinių nuokrypių įvertis šių vidurinių kreivių atžvilgiu. Paklaidų kalibravimo Δ ir vidurkių reikšmių grafikai skirtingiems greičiams pateikti 2.24 a, b, paveiksluose.

2.25 paveiksle kalibravimo paklaidų vidutinių kvadratinių įverčiai aproksimuoti antro laipsnio algebriniu polinomu. Nagrinėjamai matavimo sistemai brūkšnių padėties nuskaitymo tikslumo požiūriu optimaliu yra 2 mm/s greitis. Tačiau įvertinant išorinių faktorių (visų pirma temperatūros) poveikio didėjimą, didėjant matavimo laikui, optimaliu laikytinas 4 mm/s greitis. Abiem atvejais atsitiktinė kalibravimo paklaidos komponentė yra mažesnė už jos reikšmę, kuri yra esant skaičiuotajam ir priimtam darbiniu 3 mm/s greičiui. Taip gali būti dėl sistemos rezonansinių dažnių, kurie pasireiškia padidėjusiais virpesiais (Kilikevičius 2009). Esant 10 mm/s kalibravimo greičiui, rezultatų sklaida yra apie 1,5 karto didesnė nei 4 mm/s greičiui.



2.24 pav. Skalės brūkšnių paklaidų kreivės esant greičiui a) 4 mm/s, b) 10 mm/s

Fig. 2.24 Scale lines error graphs at different speeds a) 4 mm/s, b) 10 mm/s



2.25 pav. Kalibravimo paklaidų vidutinių kvadratinių įverčių priklausomybė nuo matavimo greičio

Fig. 2.25. Measuring rate v – mean square deviation *S* relationship of the detection scatter

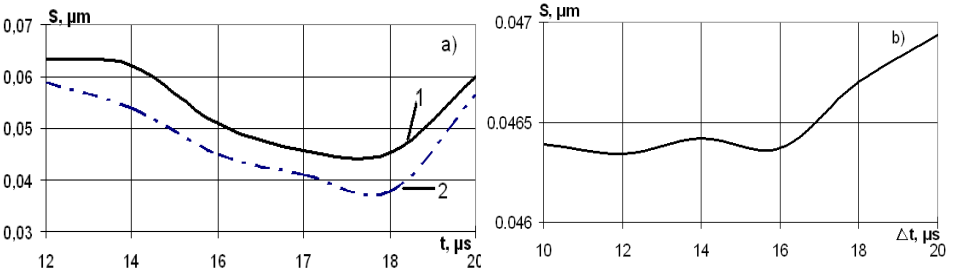
Taip pat buvo tiriama kameros ekspozicijos ir ekspozicijos užlaikymo įtaka kalibravimo paklaidai. Mikroskopo blykstės šviesos srauto energiją lemia užkrautas elektrolitinis kondensatorius, esantis jos paleidimo schemoje. Todėl energijos kiekis mažai kinta, jei leidžiame pilnai užkrauti kondensatorių, tai yra, kai tarp blyksnių yra pakankamas laiko tarpas. Blykstė užsidega po paleidimo

signalo po nevienodo laiko tarpo. Šis laiko tarpas blykstei svyruoja nuo 1 iki kelių mikrosekundžių, o blyksnio didžiausia galia – dar vėliau. Todėl reikia atlikti kameros ekspozicijos pradžios užvėlinimą nuo blykstės paleidimo signalo.

Pradžioje buvo tiriama kameros ekspozicijos įtaka kalibravimo paklaidai, kai ekspozicijos užlaikymo nėra. Skalė kalibruota esant 2 mm/s ir 4 mm/s greičiams, kurie nustatyti ankstesniu tyrimu. Pradžioje yra padaryta po vieną preliminarią skalės nuotrauką, keičiant ekspozicijos trukmę nuo 10 iki 30 µs kas 2µs. Pagal šių nuotraukų histogramų pločius nuspręsta, kad prasminga atlikti eksperimentus ekspozicijos 12–20 µs intervale. Esant ilgesniam ekspozicijos laikui paveikslas yra persotinamas ir yra neįmanoma gerai atpažinti paveikslo.

Blykstės uždegimo laiko kompensavimui, yra programiniu būdu pavėlinama kameros ekspozicija. Deja kameros aparatūrinės galimybės leidžia pavėlinimą tik nuo 10 µs, todėl parenkamas vėlinimo intervalas nuo 10 iki 20 µs.

Pirmas yra atliekamas eksperimentas, kad optimizuoti ekspozicijos laiką. Jo rezultatą matome 2.26 a) paveiksle. Aproksimavus splainais rezultatą, iš grafiko gaunama optimali ekspozicijos trukmė 17–18 µs. Tada atliekame eksperimentą su ekspozicijos užvėlinimu, keičiant vėlinimo laiką nuo 10 µs iki 20 µs. Gautas rezultatas atvaizduotas 2.26 b) paveiksle. Δt vėlinimas mažai įtakoja kalibravimo paklaidą.



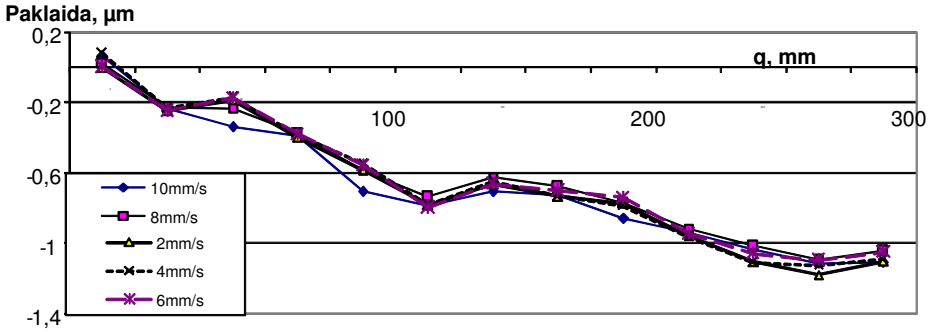
a) b)

2.26 pav. Kalibravimo paklaidų vidutinių kvadratinių įverčių priklausomybė
a) nuo kameros ekspozicijos laiko *t*, kai greitis: 1) 4 mm/s, 2) 2 mm/s
b) nuo kameros ekspozicijos vėlinimo laiko Δt

Fig. 2.26. a) Detection time *t* – mean square deviation *S* relationship of the detection scatter at various measuring rates *v*: 1) 4 mm/s; 2) 2 mm/s
b) Detection delay Δt – mean square deviation *S* relationship of the detection scatter

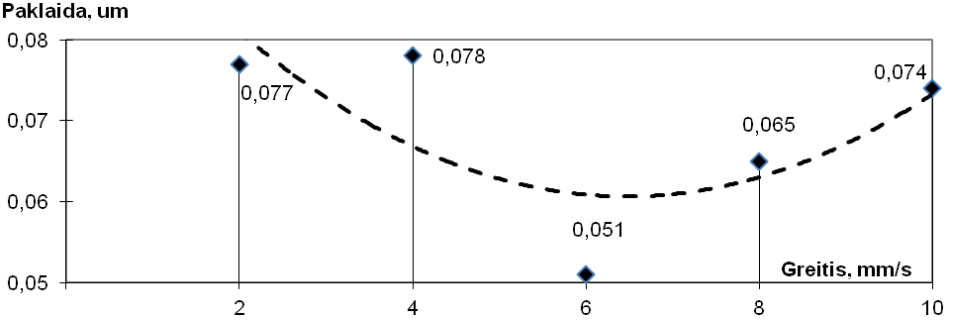
Atlikus komparatoriaus prototipo konstrukcijos tobulinimo darbus 2008 metais, paremtus tyrimais (Kilikevičius et al. 2006), buvo suprojektuotas dar vienas karietėlės traukimo mechanizmas (Kilikevičius et al. 2008). Pasikeitus karietėlės konstrukcijai ir traukimo pavarai, buvo kartojami eksperimentai, kad iš naujo įvertinti kalibravimo paklaidų vidutinių kvadratinių įverčių priklausomybę nuo matavimo greičio.

Eksperimentui buvo parinkta 2000 mm serijiniu būdu pagaminta rastrinė skalė ir kalibravimo metu buvo nuskaitomi brūkšniai kas 25 mm 300 mm ruože (2.27 pav.). Kalibravimas vyko po 10 kartų keičiant greičius nuo 2 iki 10 mm. Tyrimo kriterijumi priimta 10 matavimų vidutinio kvadratinio nuokrypio įvertis šių matavimų vidurkio reikšmių atžvilgiu. Kameros ekspozicijos laikas yra nustatytas ankstesniais bandymais ir lygus 17 µs.



2.27 pav. Kalibravimo paklaidų vidutinių kvadratinių įverčių priklausomybė nuo ilgio

Fig. 2.27. Measuring rate lenght – mean square deviation S relationship of the detection scatter



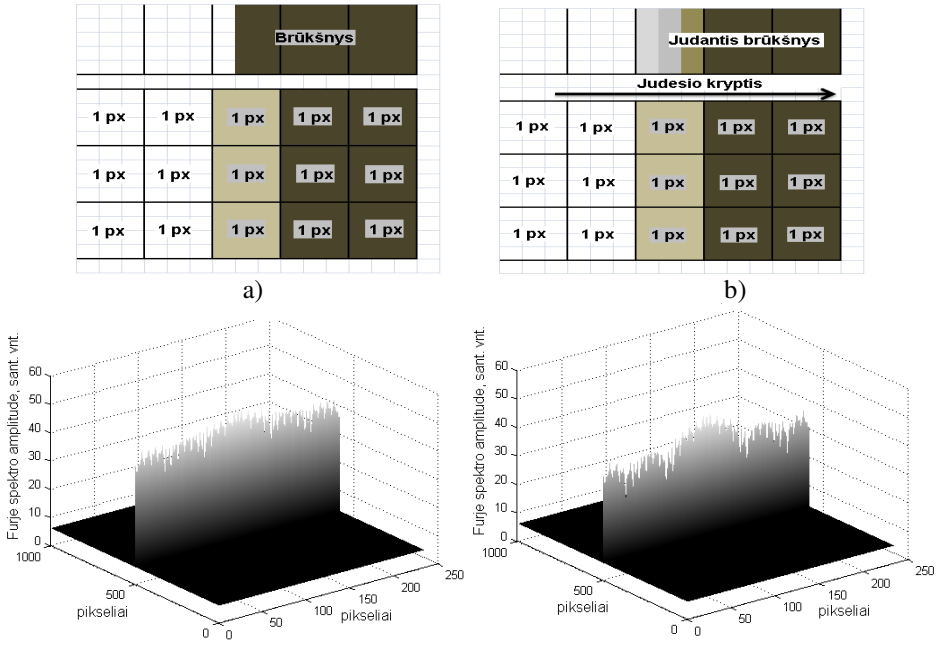
2.28 pav. Kalibravimo paklaidų vidutinių kvadratinių įverčių vidurkių priklausomybė nuo greičio

Fig. 2.28. Measuring rate *v* – mean square deviation *S* relationship of the detection scatter

2.28 paveiksle vidutinių kvadratinių kalibravimo paklaidų įverčiai aproksimuoti antro laipsnio algebriniu polinomu.Jie pažymėti brūkšnine linija. Nagrinėjamai matavimo sistemai brūkšnių padėties nuskaitymo tikslumo požiūriu optimalus yra 6 mm/s greitis. Toks greitis yra du kartus didesnis nei buvo planuotas projektuojant įrenginį. Lyginant frikcinės pavaros rezultatus pateiktus 2.25 paveiksle su lynu traukiamos karietėlės rezultatais 2.28 paveiksle, nustatyta, kad įdiegti patobulinimai nesumažino kalibravimo paklaidos sklaidą. Rezultatų blo-

gėjimą kalibruojant 4 mm/s ar 2 mm/s greičiu galima paaiškinti, kaip žemesnių nuosavųjų dažnių atsiradimą. Kalibravimo paklaidos sklaidos rezultatą labiau veikia aukštesnių dažnių virpesiai (Kilikevičius 2008).

Brūkšninės skalės nuotraukos daromos judant kamerai virš nepaslankiai padėtos skalės. Šis judesys laikomas kaip kameros jutiklio paslinkimas. Reikia pažymėti, kad ekspozicijos laikas yra labai trumpas, tai yra siekia 17–18 µs, todėl per šį laiką vaizdo jutiklis paslenka tik per dalį savo pikselio arba diskretizavimo periodo. Todėl diskrečioje erdvėje negalima gauti poslinkio reikšmės, iš Furjė transformacijos (FT).



2.29 pav. a) Nejudantis vaizdas, kai brūkšnys nesutampa su jutiklio pikselio kraštu, b) judantis vaizdas, kai brūkšnys sutampa su jutiklio pikselio kraštu, c) nejudančio vaizdo FT, d) judančio vaizdo FT

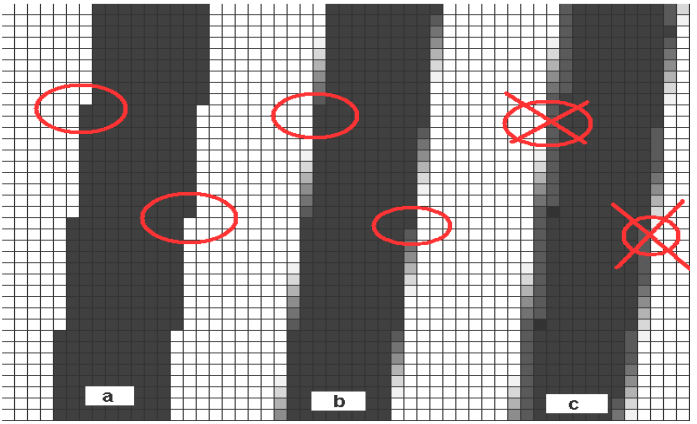
Fig. 2.29. Still image, the dash does not coincide with the edge of the pixel sensor, b) the moving image, the stroke coincides with the edge of the pixel sensor, c) Fourier transform of a still image d) FT of a motion picture

Esant dirbtiniam paveikslui be triukšmo Furjė transformacijos (FT) paveiksle, galima rasti nedidelį spektro pikus, pagal kuriuos galima atskirti, kuris paveikslas buvo užfiksuotas judant. Tačiau esant net mažam triukšmui ir iki 0,3 pikselio dydžio poslinkiui, šie artifaktai išnyksta.

Eksperimente dirbtinai sukurtų paveikslų, kurių brūkšniai nėra pasvirę judesio krypties ašies atžvilgiu, erdviniai dažniniai spektrai nieko neparodo (2.29

pav.). Neįmanoma atskirti, ar paveikslas juda pikselio dalį, ar tiesiog jo brūkšnių kraštas nesutampa su pikselio ląstelės kraštu (Levin 2008).

Kad galima būtų padidinti diskretizavimo dažnį brūkšnio krašto linijai, teigiant, kad ši linija yra pakankamai tiesi, reikia fotografuoti pasvirusį brūkšnį. Gaunamas stroboskopinį efektas, kai kiekvienoje vaizdo jutiklio eilutėje pasvirusio brūkšnio kraštas vis arčiau artėja prie jutiklio pikselio krašto. Atskirose paveikslo eilutėse gauname atvejį, kai paveikslo brūkšnio kraštas sutampa su jutiklio pikselio kraštu. Kai jutiklio matricos dydis yra keli šimtai pikselių, tokiu būdu galima padidinti skyra bent keletą kartų, nes reikia būti tikram, kad brūkšnys bus pasviręs ir per paveikslo aukštį pasikartotų bent kelios tokios vietos, kur maksimaliai pasikeičia intensyvumas brūkšnio krašto zonoje. Tokiu atveju, kamerai nejudant paveikslo atžvilgiu, gautume kelias eilutes, iš kurių reikšmių suformuota funkcija būtų beveik idealus stačiakampis signalas. Tokios eilutės pavaizduotos 2.30 paveiksle a), b) apibrėžtos zonos.

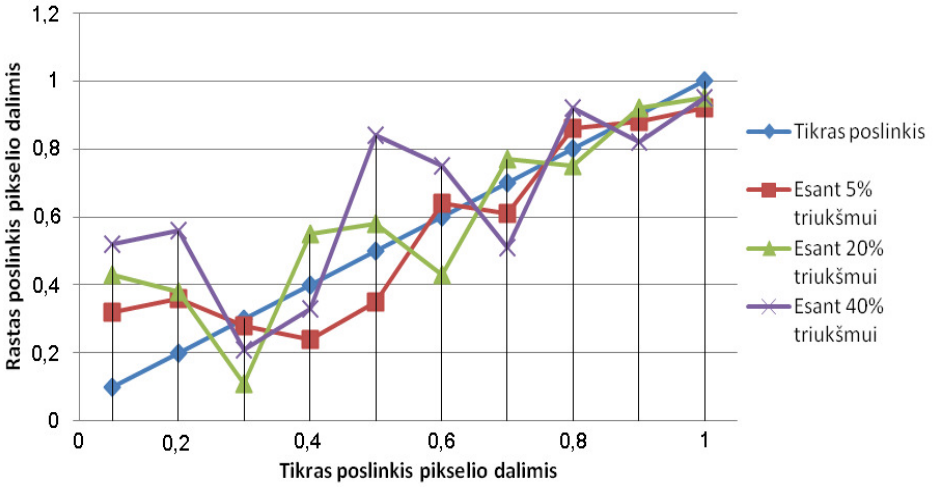


2.30 pav. Pasvirusio brūkšnio suliejimo vaizdai: a) binarinis b) 8 bitų intensyvumo gylio stovinčio c) sulietas dėl judesio 8 bitų intensyvumo gylio
Fig. 2.30. Backslash-line blur images: a) the binary b) 8-bit intensity depth of standing c) the fusion of motion 8-bit intensity depth

Judant kamerai, paveikslo atžvilgiu yra gaunamas gretimų pikselio reikšmių išsiliejimas, todėl brūkšnio krašto zonoje intensyvumo skirtumas tarp dviejų gretimų eilučių ima mažėti proporcingai judesio poslinkiui. Iš aukščiau padarytų išvadų, formuluojame kriterijų, kuriuo bus ieškomas vaizdo poslinkio dydis. Kadangi žinoma poslinkio kryptis, tai keičiant atbulinio postūmio branduolio dydį ir reikšmes, ir rekonstravus paveikslą, tikrinama iš jo kelių eilučių reikšmių sudarytos brūkšnio profilių funkcijų statumas sekant brūkšnio kontūru. Keičiama sąsūkos branduolio reikšmė taip, kad šis statumas didėtų kiekvienoje eilutėje. Brūkšnio kontūro linija randama naudojant Canny detektorių. Sąsūkos branduolis esant didesniam defokusavimui naudojamas didesnis.

Šiam metodui palyginti su kitais metodais reikia nedaug skaičiavimų, be to pagrindinis trukdis yra tai, kad vaizdas prieš judesio suliejimą jau yra paveiktas optinės sistemos defokusavimo, kuris iškraipo vaizdą panašiu dydžiu negu judesio suliejimas. Metodas neįvertina ir pačių brūkšnių defektus, aprašytus straipsniuose (Favaro and Soatto 2006, Cho *et al.* 2010). Nepaisant to, įmanoma vaizde aukščiau aprašytu metodu rasti poslinkio dydį.

Tyrimui Matlab aplinkoje sukurti trys dirbtiniai paveikslai su paverstais rastro brūkšniais su skirtingais suliejimais dėl judesio. Tai pat kiekvienam paveikslui keičiamas adytivaus Gauso triukšmo lygis. Daroma rekonstrukcija, naudojant žinomą sąsūkos branduolį dėl judesio, ir nusprendžiama kokiu dydžiu keisti sąsūkos branduolį. Taip procesas kartojamas kelis kartus. Eksperimentas parodė, kad daugumoje atveju subpikselinio poslinkio dydis nustatomas iš penkių iteracijų. Toliau didinant iteracijų skaičių rezultatas ženkliai nepagerėja. Vieno iš bandymo rezultatai pavaizduoti 2.31 paveiksle.



2.31 pav. Rasto poslinkio kreivių grafikas esant įvairiems triukšmo lygiams bei mažam defokusavimui

Fig. 2.31. Find the displacement curves of the graph at different noise levels and low focus

Apibendrinimas. 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 ilgio kalibravimo sistemos konstrukcijos sprendimų.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Išnagrinėjus komparatoriaus konstrukciją, nustatyta, kad brūkšninių ilgio matų dinaminio kalibravimo rezultatų neapibrėžties komponentės susijusios su skaitmeninio vaizdo iškraipymais dėl judesio. Minimali brūkšninių matų paklaidos reikšmė gaunama optimizavus karietėlės greičio, skalės apšvietimo, kameros ekspozicijos ir jos vėlinimo parametrus.

2. Optimizavus kalibravimo greičio, kameros parametrus gautas rekomenduojamas kalibravimo greitis 3 mm/s frikcinei pavarai ir 6 mm/s lynu traukimo mechanizmui, kai kameros ekspozicija 17 μs. Kalibruojant rastrinę skalę pasiekiamas 0,046–0,051 μm duomenų sklaidos įvertis. Didžiausią įtaką daro karietėlės greitis ir vibracijos.

3. Gauti eksperimentiniai rezultatai parodė, kad rasti pasiūlytu metodu subpikselinį poslinkį dėl judesio įmanoma, tačiau tik apytiksliai, nes:

a) reikia iš anksto žinoti VTIF dėl defokusavimo bei vaizdas negali būti defokusuotas daugiau nei pusė Reilėjaus atstumo;
b) triukšmas įtakoja poslinkio nustatymą. Jei triukšmo energija yra viršija 50 % paveikslo energijos, rasti poslinkį šiuo metodu nepavyksta;
c) poslinkis mažesnis nei 0,3 pikselio pasiūlytu algoritmu nenustatomas, o poslinkiui didėjant, jo įvertinimo tikslumas didėja.
d) Poslinkiui nustatyti užtenka 5 įteracijų. Didesnis skaičius iteracijų nepagerina rezultato.

3

Tyrimas kalibravimo paklaidų, kylančių dėl išorinių trikdžių

Brūkšninių matų dinaminiam kalibravimui ne idealiomis aplinkos sąlygomis būtina užtikrinti tikslius aplinkos sąlygų matavimus (temperatūros, slėgio, drėgmės, vibracijų). Skyriuje tiriami kalibravimo paklaidas įtakojantys pagrindiniai trikdžiai: temperatūros gradientų ir tiesaus judesio nuokrypių. Žinant šių dydžių įtaką kalibravimo paklaidai, jų pobūdį ir vertes, galima imtis priemonių šiuos nuokrypius sumažinti arba juos kompensuoti.
Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Barakauskas 2009, 2011; Barauskas 2011).

3.1. Temperatūriniai kalibravimo proceso faktoriai

Precizinėse matavimo mašinose svarbu identifikuoti ir įvertinti paklaidas, kurios gali įtakoti mašinos matavimo tikslumą. Tam reikalingos ne tik žinios ir praktinė patirtis, bet ir teorinis modelis ir praktiniai eksperimentai. Matavimo sistemos komponentų geometrinių matmenų pokytis sukelia matavimo paklaidas. Konstruojant mašinas siekiama, kad matavimo grandinė būtų kuo trumpesnė ir kad ją

sudarytų kuo mažiau narių, vengiama komponentų, kurių poveikis iš anksto negali būti prognozuojamas.

Precizinėse mašinose temperatūrinės paklaidos, kurios sąlygoja mašinos elementų deformacijas ir kito pobūdžio paklaidas, sudaro apie 40–70 % viso palaidų biudžeto. Šio tipo paklaidos yra sunkiai prognozuojamos lyginant su kitomis paklaidomis, nes temperatūriniai laukai nuolat keičiasi priklausomai nuo mašinos darbo režimo ir aplinkos sąlygų.

Temperatūrinės paklaidos atsiranda dėl termoelastinių struktūrinių mašinos elementų deformacijų ir interferometrinės sistemos lazerio spindulio kelyje oro lūžio rodiklio kitimo veikiant vidiniams ir išoriniams šilumos šaltiniams. Šie šaltiniai tai elektroninių elementų darbo metu išskiriama šiluma, mašinos energijos nuostoliai, aplinkos šiluminė talpa, žmonės, aušinimo sistemų elementai.

Temperatūros šaltinių įtakos sumažinimui precizinių mašinų darbo tikslumui yra naudojamos dvi skirtingos koncepcijos: temperatūrinių paklaidų eliminavimo ir kompensavimo metodai. Temperatūrinių paklaidų eliminavimo tikslas išvengti paklaidų mažinant išskiriamą šilumos kiekį arba perkeliant šilumos šaltinius, kurie neįtakotų matavimo sistemos, arba naudojant medžiagas, kurios turi mažą temperatūrinio plėtimosi koeficientą. Paklaidų kompensacija yra efektyviausias metodas užtikrinti mašinos tikslumą darbo metu. Paklaidų kompensavimo metodikoje svarbiau yra paklaidų tarpusavio ryšiai nei individualių paklaidų dydis, todėl nesistengiama sumažinti absoliučiąsias paklaidų vertes, bet kompensuoti jų įtaką galutiniam matavimo rezultatui.

Temperatūrinių paklaidų kompensavimui reikia tiksliai matuoti laike kintančią temperatūrą, parinkti jutiklių skaičių, jų vietą bei paklaidų įvertinimo modelius. Galimi du paklaidų identifikavimo metodai: parametrų matavimo metodas ir paklaidų sintezės metodas. Parametrų matavimo metodu yra tiesiogiai matuojamos temperatūros reikšmės, sudarant temperatūros laukų žemėlapius skirtingoms darbo fazėms.

Pirmasis metodas yra efektyvus, kai temperatūra laiko atžvilgiu kinta nežymiai, tada temperatūros jutiklių inercija esminės įtakos neturi. Mūsų tyrimas remiasi pirmuoju. Autoriai, nagrinėjantys temperatūrinių deformacijų įtaką mašinų struktūroms, naudoja ir kitus modeliavimo metodus: regresinės analizės, dirbtinių neuroninių tinklų, identifikavimo metodus. Minėti metodai yra empiriniai ir dažniausiai taikomi patvirtinti specifinės mašinų struktūros koncepcijos efektyvumą.

Precizinėje inžinerijoje siekiant sumažinti ilgio kalibravimo neapibrėžtį dėl medžiagų šiluminio plėtimosi bei temperatūrinių deformacijų, o taip pat dėl lazerinio interferometro matavimo jautrumo temperatūros pokyčiams, reikalinga efektyvi aplinkos sąlygų, ypač temperatūros, kontrolė. Aukščiausio tikslumo ilgio matavimams laboratorijų patalpų temperatūros stabilumas turi neviršyti kelių milikelvinų per valandą, todėl projektuojant tokias sistemas turi būti mini-

mizuojamas šilumos šaltinių, galinčių įtakoti kalibravimo tikslumą, skaičius arba jų poveikis galimai mažinamas bei kompensuojamas, matuojant tų komponentų vidutinę tūrio temperatūrą. Nors naujausių medžiagų, naudojamų brūkšninių matų gamyboje, tokių kaip stiklo keramika Zerodur ar kvarcas (Suprasil) šiluminio plėtimosi koeficientas yra labai mažas siekia atitinkamai $1{,}83\times10^{-8}$ K^{-1} ir $5{,}39\times10^{-7}$ K^{-1}, tačiau mechanikos inžinerijoje didžiąją dalį konstrukcinių medžiagų sudaro plienas, aliuminis ir kitos medžiagos turinčios pakankamai didelius šiluminio plėtimosi koeficientus 10×10^{-6} K^{-1}. Komparatoriaus dalių, pagamintų iš šių medžiagų, geometriniai matmenys yra ženkliai įtakojami temperatūros svyravimų, todėl tiksliam brūkšninių matų kalibravimui turi būti užtikrinamos šios pagrindinės sąlygos:

- aplinkos temperatūra galimai artima norminei temperatūrai 20 °C,
- tikslus brūkšninių matų bei aplinkos temperatūros matavimas,
- temperatūros stabilumas kalibravimo proceso metu,
- nežymių aplinkos temperatūros pokyčių kompensavimas, laikant, kad temperatūros svyravimai vyksta pagal linijinį dėsnį.

Tikslus ilgio matavimas yra nulemiamas paveikiųjų dydžių, tarp jų ir aplinkos temperatūros. Priklausomai nuo ilgio matavimo tikslumo, temperatūros matavimo procedūra yra viena iš svarbiausiųjų. Interferenciniuose ilgio matavimo prietaisuose, kuriuose naudojami mechaniniai komparatoriai, labai svarbu tiksliai išmatuoti jų kai kurių dalių ir etaloninio mato vidutinę tūrio temperatūrą.

Llinijinio mato plėtimasis nuo temperatūros yra aprašomas formule (Yang 2002):

$$\frac{dl_t}{l_{20}} = \alpha \cdot dt\,, \tag{3.1}$$

čia l ir α yra atitinkamai mato ilgis ir šiluminio plėtimosi koeficientas, t – tūrio vidutinė temperatūra.

Šiuo atveju brūkšninių ilgio matai yra pranašesni už lazerines interferometrines sistemas, tačiau projektuojant sistemas, ypač pramonines, kur galimi didesni temperatūriniai svyravimai, reikalinga, kad brūkšninio mato medžiagos bei darbinės medžiagos šiluminiai plėtimosi koeficientų reikšmės būtų artimos viena kitai, tuo būdu kompensuojant temperatūros poveikį. Kai matavimo sistemos ir matuojamo objekto šiluminio plėtimosi koeficientai ir temperatūros yra skirtingi, matavimo paklaida apskaičiuojama:

$$\Delta = L_m\left(\alpha_D \Delta t_D - \alpha_m \Delta t_m\right) + \alpha_D \Delta L \Delta t_D\,, \tag{3.2}$$

čia L_m – mato ilgis, esant 20 °C temperatūrai, α_D ir α_m – detales ir mato šiluminio plėtimosi koeficientai, Δt_D ir Δt_m – detales ir mato temperatūros nuokrypis nuo normines 20 °C temperatūros.

Dėl temperatūrinės inercijos pasikeičiant aplinkos temperatūrai, kalibratoriaus bazinių detalių temperatūra visame jų tūryje nevienoda ir skiriasi nuo aplinkos temperatūros. Norint įvertinti ir kompensuoti temperatūrinės paklaidas, reikia nustatyti tokius komparatoriaus bazinius taškus, kurių temperatūra labiausiai atspindėtų temperatūrinės deformacijas.

Bazinių elementų temperatūra keičiasi dėl komparatoriaus bazinės dalies šilumos įtakos, konvencinės šilumokaitos su aplinka, šilumokaitos dėl spinduliavimo, o taip pat šilumokaitos tarp kontaktuojančių detalių.

Nustatyti kaip keičiasi komparatoriaus detalių temperatūra, keičiantis aplinkos temperatūrai, ir kokie susidaro detalių temperatūriniai laukai, pagal temperatūrą tam tikruose taškuose ant jų paviršių, atliktas eksperimentinis kiekybinis bandymas. Jame yra fizikinės užduoties matematinis modeliavimas, sprendimų kiekybiniai metodai, rezultatų analizė.

Temperatūros pasiskirstymas kietuose izotopiniuose kūnuose nustatomas pagal formulę (Nakazawa 1994):

$$-\frac{\vartheta T}{\upsilon^{+}} = a\left(\frac{\vartheta^2 T}{\vartheta x^2} + \frac{\vartheta^2 T}{\vartheta y^2} + \frac{\vartheta^2 T}{\vartheta z^2}\right) + \frac{W}{c\gamma}, \tag{3.3}$$

čia $P \in \Omega$, $T = T(P,t)$ – kūno temperatūra taške $P = (x,y,z)$ laike t, $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – šiluminio laidumo koeficientas, W – santykinis vidinių šilumos šaltinių galingumas, c – santykinė šiluminė talpa, γ – tankis, λ – šilumokaitos koeficientas, Ω – temperatūros pasiskirstymo kūne sritis.

Pradine sąlyga užduodama temperatūros pasiskirstymo kūne Ω funkcija $T_o(P)$ pradiniu laiko momentu:

$$T(P,O) = (P),\ P \in \Omega. \tag{3.4}$$

Kraštine sąlyga nustatomas konvencinės šilumokaitos dėsnis su aplinka per kūno paviršių G:

$$\frac{\vartheta T(P,t)}{\vartheta n} = H(T_A - T(P,t)),\ P \in G, \tag{3.5}$$

čia n – kūno paviršiaus normalė, $H = \frac{\xi}{\lambda}$ – santykinis šilumokaitos koeficientas, $T_A = T_A(P,t)$ – aplinkos temperatūros keitimosi funkcija.

Kai nagrinėjamas elementas susidaro iš dviejų kūnų, turinčių bendrą kontaktinį paviršių (pavyzdžiui, stiklas ant granito plokštės) (Li *et al.* 2004), tuomet užrašomos papildomos sąlygos:

$$\lambda_1 - \frac{\partial T_1}{\partial_1} = -\frac{1}{R}(T_2 - T_1), \tag{3.6}$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_1} = \lambda_2 \frac{\delta T_2}{\partial n_1}, \tag{3.7}$$

čia R – kontaktinė šilumos varža, n_1 – pirmo kūno išorinė normalė.

Minėtas uždavinys sprendžiamas baigtinių elementų metodu taikant lokaliai vienmates skirtumines schemas (Barauskas *et al.* 2004).

Nagrinėjant temperatūrinio lauko priklausomybės nuo aplinkos temperatūros pasikeitimo matematinį modelį, atsiranda dvi problemos – kaip parinkti šilumokaitos koeficientą ξ, kuris nusakytų kūno paviršiaus ir aplinkos šilumokaitos intensyvumą, ir kokią paimti pradinę sąlygą – funkciją $T_o(P)$ – temperatūros pasiskirstymą kūne pradiniu laiko momentu. Reikšmės ($\xi \approx 3$kcal/m^3 val. laip.), gautos iš rekomendacijų ir formulių, neatitinka reikšmių, gautų lyginant bandymo rezultatus su kiekybinio sprendimo rezultatais $\xi \approx 8$ kcal/m^3 val. laip. Kadangi vienareikšmiškai atsakyti į klausimą – kokį priimti T_o ir reikšmę ξ nepavyko, tai buvo atlikti skaičiavimai skirtingoms ξ reikšmėms, esant $T_o = const$. Aplinkos temperatūros keitimosi funkcija priimta linijinė – tai atitinka bandymo duomenims.

Iš bandymo rezultatų gauta, kad temperatūrinio gradiento kiekybinės charakteristikos priklauso nuo pasirinktų pradinių sąlygų, bet temperatūrinio lauko kokybinis vaizdas praktiškai lieka nepakitęs.

Simetriškiems kūnams, kai temperatūra pasiskirsčiusi nevienodai, bet simetriškai, temperatūrinės paklaidos nustatomos pagal šių kūnų vidutinę temperatūrą. Kadangi komparatoriaus bazinių elementų temperatūrą fiksuotu laiko momentu galima laikyti pastovia, su leistinu priartėjimu, priimama, kad bazinių detalių temperatūrinis laukas simetriškas ir argumentu, nustatančiu jų temperatūrinį gradientą, priimama vidutinė temperatūra:

$$T_0 = \int_{\Omega} T(dP)/v, \tag{3.8}$$

čia v – kūno tūris.

Gaunami gana tikslūs skaičiavimo rezultatai, kai temperatūra yra tolygiai pasiskirsčiusi matuojamo objekto tūryje. Tačiau dėl nevienodo matuojamų objektų įšilimo, kintamos aplinkos temperatūros, oro srautų bei šilumos šaltinių matuojamo objekto aplinkoje gaunamos paklaidos.

Skaičiavimai rodo, kad naudojant komparatoriaus konstrukcijoje ir mate geležies lydinius, kurių $\alpha = 1{,}21 \times 10^{-5}\ ^{o}C^{-1}$ ir norint matuoti ilgį su neapibrėžtimi

(10^{-8}–10^{-7}) m, temperatūros matavimo neapibrėžtis turi būti ne didesnė intervale (10^{-3}–$0{,}5\times10^{-2}$) °C.

Toks temperatūros matavimo tikslumas yra pasiekiamas naudojant etalonines termometrus ir labai didelio tikslumo elektros varžos matavimo tiltus ir nanovoltmetrus.

3.2. Precizinis temperatūros matavimas

Mažiausi temperatūros matavimo neapibrėžties įverčiai pasiekiami su etaloniniais platinos varžos termometrais, atliekant etalonines kalibravimo procedūras ir įvertinant sandus, susijusius su paveikiaisiais dydžiais. Platinos varžos termometrai dėl jų stabilumo ir tiesinės priklausomybės tarp jų varžos ir temperatūros dažniausiai naudojami tiksliojoje inžinerijoje, be to jų kalibravimui naudojami tik keli būdingieji taškai.

Temperatūros jutikliai, kurių metrologiniai parametrai yra tinkami matuoti su neapibrėžtimi mažesne nei 10 mK, yra prijungiami prie elektros varžos matavimo tiltų arba nanovoltmetrų, skirtų pirminiams ir antriniams temperatūros vieneto etalonams.

Temperatūros matuoklis PP2 yra aukšto tikslumo temperatūros bei kitų aplinkos parametrų (drėgmės, slėgio, dujų koncentracijos ir kt.) matavimo sistema. Prietaisas pritaikytas aukšto tikslumo ilgio matų matavimo reikmėms. Tokius prietaisus naudoja metrologijos laboratorijos Vokietijoje, Austrijoje bei kitose Europos šalyse.

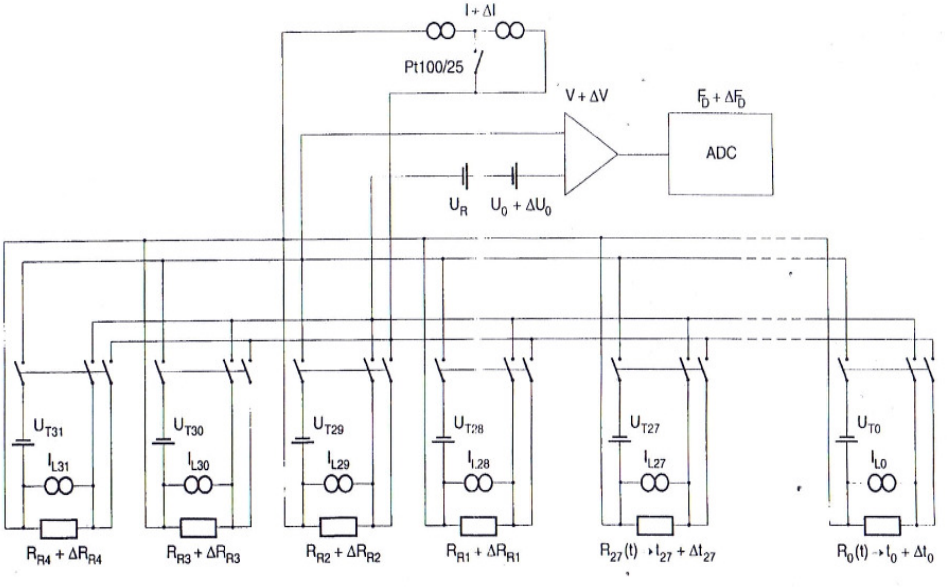
Prietaise yra daug įėjimų temperatūros jutiklių prijungimui ir keli analoginiams įtampos signalams. Įėjimų skaičius temperatūros jutikliams gali būti nuo 8 iki 92; jutikliai gali būti Pt100 arba Pt25 tipo. Prietaisas surinktas 19 colių pagrindinėje šynoje prijungiant procesoriaus, multipleksorių ir analogas kodas keitiklių plokštes. Tiksliam matavimui visada naudojami du didelio tikslumo atraminiai rezistoriai su mažu varžos dreifu. Jutiklio varža matuojama keturlaidžiu PT jutiklių prijungimo metodu, kurio funkcinė schema pavaizduota 3.1 paveiksle. Matavimo metu per jutiklį teka žinomo dydžio srovė, o matuojama ant jutiklio krentanti įtampa, kompensuojamoji laidų varža bei kiti dydžiai.

Temperatūra yra matuojama A klasės Pt100 matavimo jutikliais. Matavimo jutikliai yra sujungti 4 porų kabeliu keturlaide platininių jutiklių prijungimo schema. Vienu kabeliu gaunami dviejų jutiklių signalai. 10 jutiklių skirti matuoti oro temperatūrai, 10 – kalibruojamo objekto. Temperatūros jutikliai gali būti išdėstyti kas 30 cm priklausomai nuo kalibruojamos skalės ilgio. Vieno keitiklio nuskaitymo laikas 6 sekundės. Ilgio mato kalibravimui reikalingi oro temperatūros, slėgio ir drėgmės duomenys. Norint tiksliai nustatyti oro temperatūros matuojama vertę išilgai lazerio spinduliui, reikia suskaičiuoti visų temperatūros

jutiklių oro matavimo rezultatų vidurkį. Todėl Pt100 keitikliams reikia ne mažiau 6 sekundžių, kad užtikrinti apie 1 mK tikslumą. Visų keitiklių parodymai atnaujinami kas 120 sekundžių.

Temperatūros reikšmei įvertinti, matuojami PT jutiklio bei abiejų atraminių rezistorių signalai. Juos interpoliuojant apskaičiuojama jutiklio varža. Funkcinė temperatūros matuoklio schema parodyta 3.1 paveiksle. Varžos reikšmė apskaičiuojama iš varžos temperatūros 7 laipsnio algebrinio polinomo, kuris suskaičiuotas, aproksimuojant PT jutiklių varžos temperatūros reikšmes iš lentelių pagal EN 60 751 (ITS-90) standartą. Norint pakeisti matavimams naudojamų PT jutiklių tipą, reikia pakeisti ir atraminius rezistorius bei įrašyti į programą naujas šių rezistorių kalibravimo reikšmes.

Norint prijungti kitus aplinkos parametrų matuoklius, prietaisas turi 14 arba 20 bitų analoginius įtampos (0–1 V, 0–5 V) arba srovės (4–20 mA, 0–20 mA) įėjimus. Šiems matuokliams reikalingas atskiras maitinimas, o PP2 ir papildomas maitinimo šaltinis prijungiami prie bendros „žemės“. Duomenys iš PP2 prietaiso perduodami per RS232 arba Ethernet protokolą. Galima siųsti tik reikiamo kanalo duomenų užklausimą, atsakyme yra užklausto kanalo varžos reikšmė omais. PK perskaičiuoja varžos reikšmę į temperatūros.



3.1 pav. Precizinio temperatūros matuoklio PP2 funkcinė schema
Fig. 3.1 Functional diagram of precise temperature measurement device PP2

Matavimo tikslumas priklauso nuo šių pagrindinių paklaidų grupių:

Matavimo kanalo paklaidos *ΔI, ΔU ir ΔV*. Jas apsprendžia pastovios srovės svyravimas ilgame matavimo laikotarpyje. Paklaidos mažinamos matuojant tiltelio schema su atraminiais reziztoriais, o vėliau interpoliuojant.

Jutiklio kanalo paklaidos U_{Ti} , I_{li} atsiranda dėl termo-įtampos U_{Ti} ir srovės nuotėkių I_{Li} elektroniniuose raktuose. Atliekama šių paklaidų korekcija, matuojant prie nulinės srovės. Matuojamas įtampos kritimas ant jutiklio prie srovės *I* ir prie nulinės srovės.

Triukšmo įtampa U_R. Paklaida sumažinama, naudojant mažatriukšmius stiprintuvus įėjimo grandinėje ir mažą įėjimo varžą.

Analogas/kodas keitimo paklaida ΔF_D. Sumažinama naudojant gerą analogas/kodas 20 bitų keitiklį.

Platininio jutiklio Δt charakteristikos temperatūra-varža neatitikimas sumažinamas, naudojant aukštos kokybės jutiklius (ne žemesnės nei A klasės).

Temperatūrai matuoti buvo naudojami platininiai – foliniai jutikliai EN 60 751 ir platininiai – lustiniai jutikliai PCA 1.2010.1H.

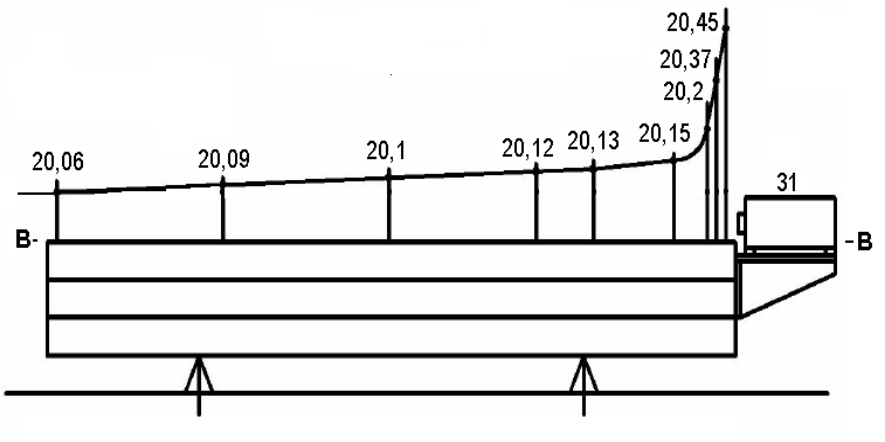
3.3. Patalpos temperatūros gradientų tyrimas

Temperatūros gradientas erdvėje buvo matuojamas trijuose A, B ir C lygiuose visame patalpos tūryje. A lygyje matavimai atlikti prie grindų, B lygyje, kuris atitinka darbinę kalibravimo plokštumą, ir C lygyje, kurio plokštuma eina virš skaičiavimo – valdymo komplekso. Papildomai ištirta temperatūros trikdžių aplinka.

Tyrimai parodė, kad visoje termokonstantinėje patalpoje temperatūra kinta nuo +19,75 °C (prie grindų) iki +20,54 °C (virš skaičiavimo – valdymo komplekso). Didžiausias temperatūros kitimas komparatoriaus zonoje buvo stebimas erdvėje virš lazerio – iki +20,25 °C.

Atmetus intensyvių temperatūros trikdžių zonas, temperatūra visoje termokonstantinėje patalpoje kinta tarp +19,95 °C ir +20,03 °C. A pjūvyje esminių temperatūros pokyčių nebuvo pastebėta. B pjūvyje temperatūra daugiausia pakitusi virš lazerio. C pjūvyje tokia padidėjusios temperatūros zona – virš skaičiavimo valdymo komplekso.

Tačiau, atlikus papildomus tyrimus šaltu metų laiku, kai temperatūra lauke buvo apie -10 °C, buvo stebimas esminis grindų ir oro virš jų viename komparatoriaus gale temperatūros kritimas iki +19,75 °C. 3.2 paveiksle pateikti apibendrinti temperatūros gradiento tyrimų rezultatai B (darbinėje) plokštumoje esant šioms sąlygoms. Jame taip pat akivaizdžiai matomas temperatūros padidėjimas lazerio zonoje.



3.2 pav. Komparatoriaus pagrindo temperatūrinis gradientas matavimo plokštumoje *B*

Fig. 3.2 Temperature gradient of comparator base in measurement plane *B*

Siekiant nustatyti temperatūros pasiskirstymą komparatoriaus patalpoje, buvo atlikti temperatūros pasiskirstymo matavimai erdvėje, kurios auštis yra lygus dvigubam komparatoriaus aukščiui. Kiekviename taške atlikta po 6 matavimus, esant nusistovėjusiam temperatūriniam režimui. Rezultatas prilygintas šių matavimų vidurkiui. Rezultatų sklaida įvertinta vidutinio kvadratinio nuokrypio įverčio dydžiu ± 2,1 S.

Temperatūrinis gradientas laike įvertintas temperatūros kitimu būdingajame taške. Jis yra tirtas vienos savaitės laikotarpyje ir įvertintas vidutiniu kvadratiniu įverčiu S bei didžiausiais nuokrypiais M vidurkio atžvilgiu. Gauti šie rezultatai:

S = 0,04 K, M = 0,40 K – per visą tyrimo laikotarpį;

S = 0,06 K, M = 0,35 K – aktyvios veiklos periodu;

S = 0,015 K, M = 0,17 K – kai nevyko veikla patalpoje.

Taip pat buvo ištirtas šiose sąlygose komparatoriaus pagrindo temperatūrinis gradientas matavimo plokštumoje.

Atlikti matavimai parodė, kad dėl temperatūrinių trikdžių kinta temperatūrinis gradientas erdvėje ir laike. Pagrindiniai šį pokytį sukeliantys faktoriai (įtakos didėjimo tvarka) yra:

- skaičiavimo valdymo kompleksas;
- lazerinės spinduliuotės šaltinis;
- termiškai neizoliuotas grindų plotas.

Tyrimais nustatyta, kad skalės fiksavimas prie granitinės bazės vakuumu mažai įtakoja jos temperatūros gradientą ir temperatūros matavimo jutikliai reaguoja į patalpos šviestuvų skleidžiamus šviesos spindulius.

Kartu su temperatūros kitimo tyrimais, buvo tiriamas skalės paklaidos kalibravimo duomenų kitimas. Buvo pastebėtas esminis skalės kalibravimo paklaidų

pasikeitimas, ją skirtingai bazuojant. Kalibravimo rezultatų sklaidos vidutinio kvadratinio nuokrypis įvertis lygus S = 0,4 μm.

Kadangi prisiurbimo vakuumu metu nevyksta esminių jos temperatūros gradiento pokyčių, tai skalės paklaidos kalibravimo rodmenų pokytį reiktų sieti su skalės geometrinių parametrų pokyčiais, vykstančiais prisiurbimo vakuumu metu.

3.4. Komparatoriaus mikroskopo temperatūriniai laukai ir deformacijos

Kalibruojamos skalės brūkšnio padėties nustatymo tikslumas labai priklauso nuo mikroskopo stabilumo. Precizinių ilgio komparatorių mikroskopų optinės schemos ir konstrukcijos nuolat tobulinamos, siekiant padidinti mikroskopų skiriamąją gebą ir jautrį, minimizuojant išorinių trikdžių poveikį matavimų pasikartojamumui ir paties mikroskopo dreifus, sąlygojamus temperatūros kaitumo.

Šiluminis plėtimasis yra svarbus paklaidų šaltinis matavimo sistemose, naudojančiose lazerines matavimo sistemas. Temperatūriniai gradientai optiniuose ir mechaniniuose komponentuose atsiranda dėl aplinkos temperatūros nepastovumo, mikroskopo judėjimo iš vienos temperatūrinės aplinkos į kitą, kintamo aplink ir viduje esančių šilumos šaltinių spinduliuotės intensyvumo. Prietaiso temperatūrai stabilizuoti pastovios temperatūros aplinkoje gali prireikti kelių valandų. Kalibruojant skales dinaminiame režime, ypač dirbant kintančios temperatūros aplinkoje, prietaiso ir aplinkos temperatūra niekada nepasiekia pusiausvyros. Temperatūrinių deformacijų nehomogeniškumas dažnai yra pagrindinė matavimų nestabilumo priežastis.

Precizinių mikroskopų konstrukcijose temperatūrinėms paklaidoms sumažinti dažnai naudojama segmentinė struktūra bei medžiagos, kurių šiluminio plėtimosi koeficientas yra mažas. Atliktas 2D ir 3D modeliavimas ir eksperimentinis prototipinių struktūrų tyrimas parodė, kad tokios struktūros jautris temperatūros poveikiui yra daug mažesnis, nei vienalytės struktūros, kadangi tarpeliai tarp segmentų padidina šiluminę varžą, o konstrukcijos standumas beveik nemažėja.

Precizinis ilgio komparatorius (PIK) yra sudėtinga mechaninė sistema, kurios teisingam funkcionavimui būtinas geometrinių matmenų tikslumas. Reikalavimai PIK geometrinių matmenų tikslumui yra tokie aukšti, kad svarbios yra laipsnio dalių eilės temperatūros svyravimų sukeltos temperatūrinės deformacijos. Netgi maksimaliai eliminavus mechaninių trikdžių įtaką bei užtikrinus pastovią aplinkos temperatūrą, tam tikri temperatūriniai trikdžiai ir juos lydinčios temperatūrinės deformacijos neišvengiamos dėl paties PIK elektrinės įrangos skleidžiamų šilumos srautų.

Tobulinant tiriamo komparatoriaus konstrukciją, sukurtas naujas precizinis segmentinis mikroskopas su CCD kamera ir keičiamais objektyvais, sudarytas BE modelis ir atliktas mikroskopo temperatūrinių deformacijų, modeliavimas, eksperimentiškai ištirtas temperatūrinių nuokrypių kitimas laike mikroskopo kameros aplinkoje.

Esant žinomai darbo režime nusistovėjusiai temperatūrai, procesą galima apskaičiuoti baigtinių elementų metodu ir rasti temperatūrų reikšmes visuose mikroskopo konstrukcijos taškuose. Žinant šias temperatūrų reikšmes galima apskaičiuoti jų sąlygotus poslinkius visuose konstrukcijos taškuose.

Skaičiavimų schema: apskaičiuojant statinį arba pereinamąjį temperatūrinį lauką pagal užduotas temperatūrų reikšmes kai kuriuose konstrukcijos taškuose (pvz.; CCD kameros paviršiuje) bei žinomas konvencinių šilumos mainų tarp konstrukcijos ir ją supančio oro sąlygas, sprendžiama konstrukcijos šilumos balanso lygtis pavidale

$$[C]\{\dot{T}\}+[K_{Th}]\{T\}=\{S_{\infty}\}, \tag{3.9}$$

čia C – šiluminės talpos matrica, K_t – šiluminio laidumo matrica, S_∞ – elemento mazgų šilumos šaltinių galių vektorius, sąlygotas šilumos mainų su aplinka per kūno paviršių.

Šilumos mainų procesas ANSYS sistemoje aprašomas elementu SOLID70. Tokio uždavinio sprendimo rezultate gaunamos temperatūrų reikšmės elemento mazguose, kurios toliau panaudojamos kaip apkrovos konstrukcijos deformacijų apskaičiavimo uždavinyje pavidalo.

$$[K]\{U\}=\{Q\}, \tag{3.10}$$

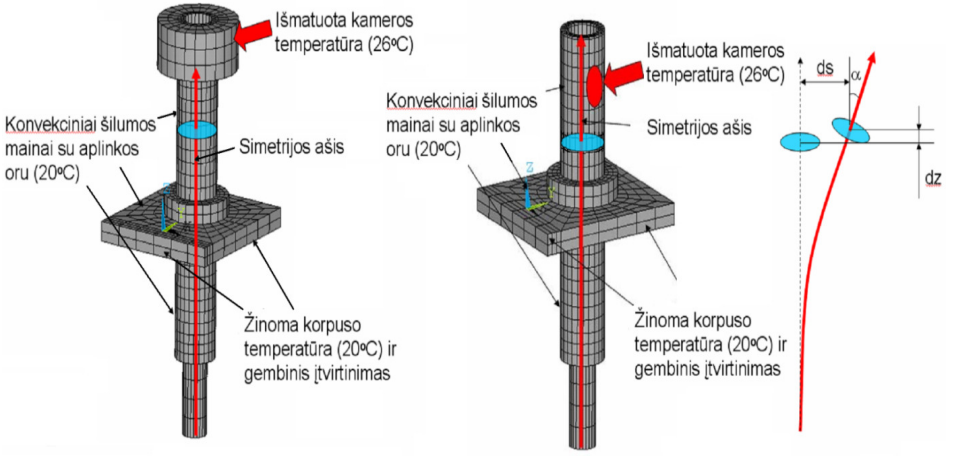
čia *[K]* – elemento standumo matrica; *{Q}* – temperatūrinių apkrovų sąlygotas mazgų jėgų vektorius.

Šią skaičiavimo schemą galima taikyti tiriant aplinkos temperatūros svyravimų įtaką kitų PIK elementų, pvz.; skalės, geometrijos pokyčiams tirti. Tam baigtinių elementų metodu reikia sudaryti konstrukcijos matematinį modelį, kuriame būtų apskaičiuojamos temperatūros tiek konstrukcijoje, tiek ir ją supančiame ore. Toks modelis paremtas šių svarbiausių fizikinių reiškinių sąsaja:

1. Šilumos perdavimo aplinkos oru dėl jo šilumos laidumo;
2. Advekciniu būdu (t. y. dėl oro judėjimo) vykstančio šilumos perdavimo;
3. Šilumos mainų tarp oro ir PIK konstrukcijos;
4. Šilumos perdavimo PIK konstrukcija dėl jos šiluminio laidumo;
5. Deformacijų PIK konstrukcijoje susidarymo dėl joje susidariusi nehomogeninio šilumos lauko.

PIK mikroskopo temperatūrinėms deformacijoms apskaičiuoti modelis pavaizduotas 3.3 paveiksle. Jį naudojame dviejų skirtingų konstrukcijų analizei – kai CCD kamera tvirtinama mikroskopo šone ir CCD kamera tvirtinama mikros-

kopo simetrijos ašyje, atitinkamai pavaizduota 3.3 paveiksle a) ir b). Abiem atvejais priimame prielaidą, kad kameros tvirtinimo zonoje temperatūros yra išmatuotos ir žinomos.



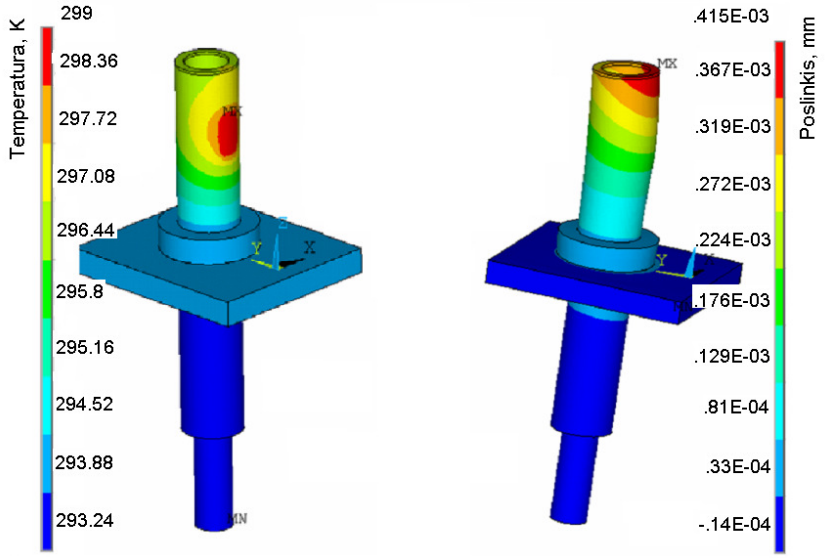
a) b) c)

3.3 pav. Mikroskopo modelis: a) kai CCD yra tvirtinama iš viršaus, b) kai tvirtinama iš šono, c) ieškomo pjūvio poslinkis veikiant temperatūrinėms deformacijoms

Fig. 3.3 Model of microscope structure: a) when camera is fixed in the symmetry axis, b) when it is fixed on the microscope side, c) typical cross-section displacements under temperature deformations

Mikroskopas įtvirtintas laikiklyje, kuriuo reguliuojama jo padėtis erdvėje. Laikoma, kad tam tikrame atstume nuo mikroskopo laikiklio temperatūra yra lygi konstrukcijos temperatūrai. Visuose likusiuose konstrukcijos paviršiuose logiška priimti, kad vyksta konvenciniai šilumos mainai su aplinkos oru. Mikroskopo vamzdžio medžiagos šilumos laidumo koeficiento reikšmę priimame $\lambda = 54$ *W/mK*, o kameros ir objektyvo tarpinių – $\lambda = 27$ *W/mK*. Konvekcijos per paviršių koeficientą visur laikome lygiu $\alpha = 20$ W/m^2 *K*, o šilumos plėtimosi koeficientas $\alpha = 65\times10^{-5}$.

Skaičiavimų rezultatai, kai CCD kamera tvirtinama mikroskopo šone, pateikti 3.4 paveiksle a ir b. Čia matomos nusistovėjusios temperatūros konstrukcijoje izotermės bei temperatūrų lauko sukelti poslinkiai konstrukcijoje. Svarbu pastebėti, kad arčiau mikroskopo tvirtinimo laikiklio temperatūra pakyla neženkliai, tačiau tam būtinas geras šiluminis kontaktas tarp mikroskopo ir laikiklio.



a b

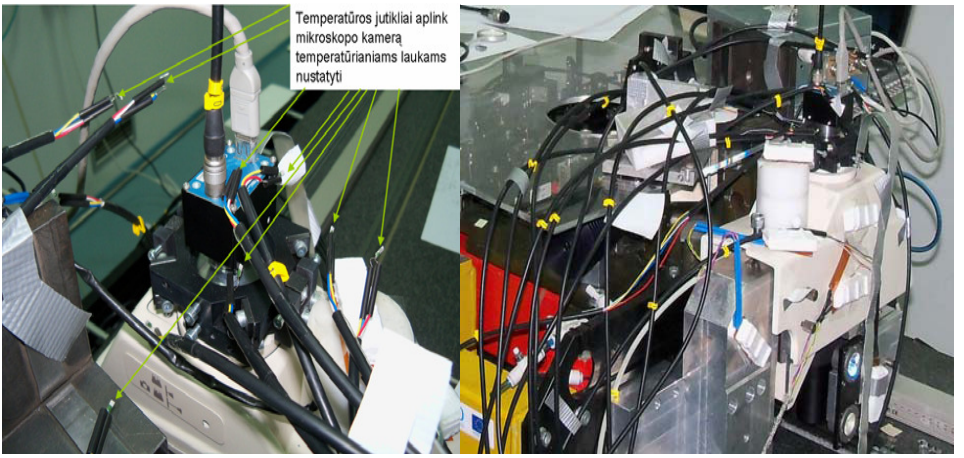
3.4 pav. Apskaičiuotas mikroskopo korpuso poslinkis dėl temperatūros lauko: a) korpuso izotermių vaizdas b) poslinkio dėl šilumos vaizdas

Fig. 3.4 Displacements in the structure caused by the calculated temperatures field: a) steady-state temperature in the structure, b) distribution of heat flux

Deviacijomis suprantame dydžius, paaiškintus 3.3 paveiksle c. Tai deformuotos ašies kampas β su vertikale bei skerspjūvio centro pasislinkimas *dz* išilgai ašies bei šoninis pasislinkimas *ds*. Stebimos visos trys deviacijų rūšys – ašies orientacijos paklaidos β , defokusuojanti deviacija *dz* ir ekscentrinė deviacija *ds*. Konstrukcijoje, kai CCD kamera tvirtinama mikroskopo simetrijos ašyje, dominuoja ašinės deviacijos, kurios galėtų įtakoti CCD kameros fokusavimo gylį ir jo projekciją skalėje. Ašies kryptis praktiškai nepakinta.

Kai kamera yra tvirtinama iš viršaus ant mikroskopo korpuso, tai apskaičiuoti simetrijos ašies palinkimo kampo bei poslinkiai yra labai maži. Komparatoriui rekomenduojama mikroskopo konstrukcija su kameros tvirtinimu iš viršaus.

Temperatūrinių laukų matavimui aplink mikroskopo kamerą, temperatūros jutikliai buvo išdėstyti taip, kad galima būtų atvaizduoti pastovios temperatūros kreives (izotermes) tam tikruose erdvės pjūviuose. Temperatūrai aplink mikroskopo kamerą pamatuoti buvo naudojama 21 jutiklis – keturi jutikliai buvo priklijuoti prie mikroskopo korpuso, vienas prie blykstės, po vieną – prie kameros ir prie kameros pastatymo mechanizmo, likusieji išdėstyti ore, žiūrint į 3.5 paveikslą. Korpuso jutiklių izoliacijai nuo aplinkos temperatūros poveikio buvo naudojamas polistirolas.



3.5 pav. Temperatūros jutiklių išdėstymas aplink mikroskopą
Fig. 3.5 The placement of temperature sensors around microscope

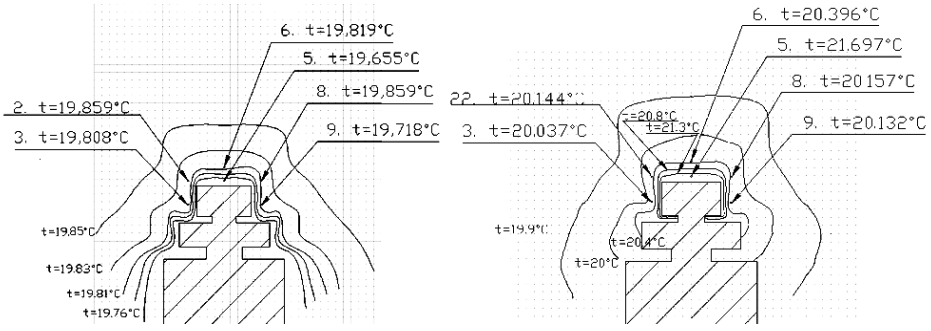
Matavimas buvo padalintas į tris fazes:

- ramybės, kai visi įrenginiai yra ilgą laiką išjungti ir yra mikroskopas įgavęs patalpos oro temperatūrą;
- įšilimo, kai kamera įjungta ir šyla, bet blykstė nedirba;
- darbinę, kai tarp kameros ir patapos oro srauto nusistovi šiluminė pusiausvyra.

Pirmos fazės tyrimo rezultatai, vertinami pagal trijų matavimų vidurkius, rodo, kad mikroskopo temperatūra yra apie 0,15 ^{o}C žemesnė, nei jį supančio oro temperatūra. Toks temperatūrų skirtumas susidarė dėl to, kad parą prieš kameros temperatūrinių laukų matavimo eksperimentą patalpos kondicionierius buvo išjungtas. Temperatūros aplink mikroskopą pasiskirsčiusios tolygiai.

Antrosios fazės atvaizduoti izotermėmis nepavyko, nes jutiklių apklausimo greitis yra mažesnis, nei kameros įšilimo greitis. 3.6 paveiksluose pateikti darbinės fazės jutiklio temperatūrų vidurkiai apskaičiuoti iš pusės valandos laiko atkarpos.

Prieš šiuos matavimus bandyta nustatyti, ar kameros korpuso šonai ir viršus įšyla vienodai. Kadangi kameros matmenys nedideli, o matuojant kontaktiniu termometru uždengiamas nemažas plotas, tai nepavyko tiksliai įvertinti patalpoje esančių oro srautų nupūtimo nuo kameros paviršiaus įtakos. Remiantis preliminariais duomenimis priimta prielaida, kad kameros korpuso viršus ir šonai įšyla vienodai, todėl pasirinktas tik vienas jutiklis kameros temperatūrai įvertinti. Matavimai pakartoti tris kartus panašiomis sąlygomis.



a b

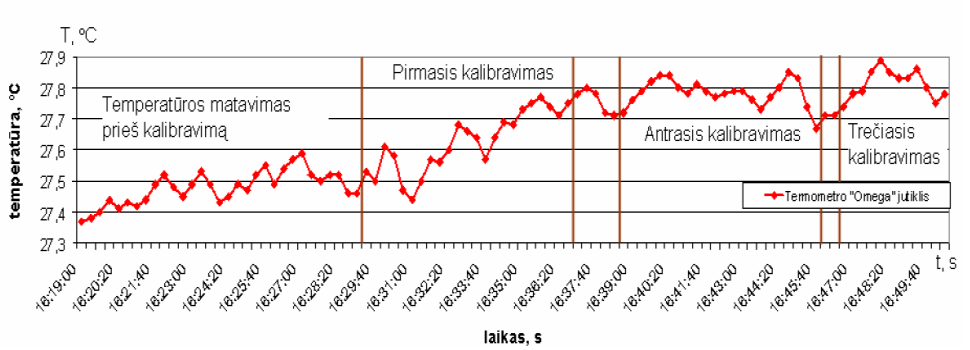
3.6 pav. Temperatūros lauko apie kamerą pjūvis iš šono: a) prieš įjungimą, b) po įjungimo

Fig. 3.6 Side slice of temperature field around camera: a) camera is switched off, b) camera switched on

Įjungus kamerą jutikliai registruoja šilimą. Didėja oro temperatūros matavimo sklaida. Prie mikroskopo ir kameros korpusų pritvirtintų jutiklių temperatūros parodymai kyla tolygiai. Mažiausiai kinta ant mikroskopo korpuso toliau nuo kameros pritvirtintų jutiklių temperatūros parodymai. Greičiausis kyla jutiklių temperatūros parodymai, kurie yra virš kameros. Jutiklio, pritvirtinto prie blykstės, temperatūros parodymų pokytis nežymus. Jutiklio, pritvirtinto prie kameros įtvaro, temperatūros parodymai didėja sparčiausiai.

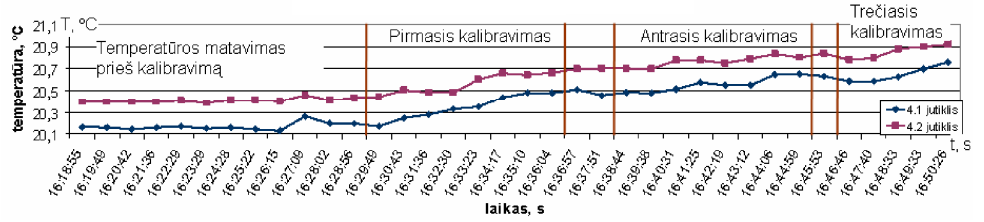
Darbinėje fazėje, iš kameros šilumą atima tiek patalpoje esantis oro srautas, tiek mikroskopo korpusas. Ypač gerai šilumą išsklaido kameros įtvaras, nes jo paviršiaus ploto ir masės santykis didelis. Kamera šilumą atiduoda daugiausia per jungtis su kabeliais, esančias kameros viršuje, skirtais duomenų nuskaitymo kontrolei ir siuntimui. Kameros korpusas viršuje po putų polistirolu įšyla iki 27,5 °C. Ties ta vieta, kur kamera jungiasi su įtvaru, temperatūra yra tik 24,7 °C, o kameros šonų temperatūra yra keliomis dešimtosiomis laipsnio mažesnė nei viršuje. Įtvaro briauna įšyla tik iki 23,5 °C, o ant mikroskopo korpuso pritvirtinti jutikliai nerodo jokio temperatūros skirtumo po pusės valandos darbinėje fazėje.

Siekiant nustatyti temperatūrinių paklaidų kitimą laike atlikti kontaktiniai temperatūros matavimai mikroskopo kameros viršuje, ant kameros pastatymo mechanizmo, ant kameros blykstės ir oro temperatūros matavimas prie kalibruojamos skalės. Temperatūros matavimai atlikti tam tikrą laiko tarpą prieš skalės kalibravimą ir trijų iš eilės kalibravimų metu, visą matavimo laiką esant įjungtai mikroskopo kamerai. Iš atvaizduotų rezultatų 3.7 paveiksle matyti, kad temperatūra ant kameros viršaus prieš kalibravimą svyravo 0,2 ºC ribose tarp 27,4 ^{o}C ir 27,6 ºC. Per pirmąjį kalibravimą temperatūra pakilo iki 27,8 ºC ir per kitus du kalibravimus svyravo tarp 27,7 ^{o}C ir 27,9 ^{o}C. Tokį temperatūros svyravimą įtakoja intensyvus kameros darbas ir mikroskopo kameroje esančio „Peltje“ elemento veikimo algoritmas, kuris užtikrina kameros vaizdo jutiklio aušinimą.



3.7 pav. Kameros temperatūros kitimas kalibravimo metu
Fig. 3.7 Camera temperature during calibration

3.8 paveiksle parodytas kameros blykstės korpuso temperatūros pokytis. Prieš kalibravimą blykstės korpuso temperatūra buvo stabili ir artima aplinkinio oro temperatūrai. Nuo pirmojo kalibravimo pradžios blykstės korpuso temperatūra nuolatos augo ir trečiojo kalibravimo pabaigoje temperatūros pokytis nuo pradinės reikšmės siekė +0,6 ºC. Ketvirto ir penkto kalibravimo metu kameros ir blykstės temperatūra nebekilo, o tik svyravo atitinkamai apie 27,9 °C ir 20,9 ºC.



3.8 pav. Mikroskopo blykstės temperatūros kitimas kalibravimo metu
Fig. 3.8 Microscope flashlight temperature during calibration

Temperatūros pokytis ant kameros pastatymo mechanizmo nebuvo toks ženklus kaip kameros viršuje ar ant blykstės korpuso, tačiau minėti faktoriai įtakojo temperatūros dreifavimą iki 0,2 ºC. Šis temperatūros dreifavimas įtakoja kameros pastatymo mechanizmo temperatūrines deformacijas ir turi įtakos bendram neapibrėžties biudžetui.

3.5. Komparatoriaus lazerinio interferometro temperatūriniai laukai ir deformacijos

Brūkšninių matų kalibravimo tikslumą iš esmės nusako dvi matavimo procedūros: tikslus poslinkio matavimas lazeriniu interferometru bei tikslus brūkšnio

centro padėties nustatymas – atskaitos taško suradimas per mikroskopą su skaitmenine kamera.

Vienas pagrindinių veiksnių didinantis lazerinio interferometro matavimo neapibrėžtį yra aplinkos sąlygų įtaka. Tai seka iš lazerinio interferometro matavimo principo. Matuojamas bangos fazės pokytis yra proporcingas optinio kelio poslinkiui. Kadangi lazerinio interferometro bangos ilgis žinomas ir yra pakankamai stabilus, tai poslinkio matavimo neapibrėžtį iš esmės lemia oro lūžio rodiklio matavimo paklaida:

$$|\Delta L| = L\left(\frac{\Delta n}{n}\right). \tag{3.11}$$

Norint tiksliai įvertinti poslinkį, oro lūžio rodiklis yra matuojamas išilgai lazerio spindulio ašies. Tam yra matuojami santykinai iš lėto kintantys oro slėgis, santykinis drėgnumas bei greičiau besikeičianti temperatūra. Besikeičianti oro lūžio rodiklį skaičiuojame iš modifikuotos Edleno formulės 1.3 ir paskaičiuojame optinio kelio ilgio kompensaciją, tai koreguodami interferometro nulinės padėties poslinkį.

Kitas svarbus dydis yra nejautros atstumo paklaida, kuri atsiranda dėl lazerio optinių komponentų išdėstymo, ji yra tiesiogiai proporcinga oro lūžio rodiklio pokyčiui tame atstume. Kuo sistema turi didesnį nejautros atstumą, tuo didesnė dėl jo paklaida. Šis atstumas yra arčiausiai lazerinio interferometro, todėl interferometro skleidžiama šiluma stipriai veikia šios paklaidos dydį.

Lazerinis interferometras yra tvirtinamas ant atskiros metalinės konstrukcijos. Temperatūrinės deformacijos gali paveikti konstrukciją taip, kad lazerio spindulys taps nelygiagretus matavimo judesiui, dėl to turėsime kosinuso paklaidą.

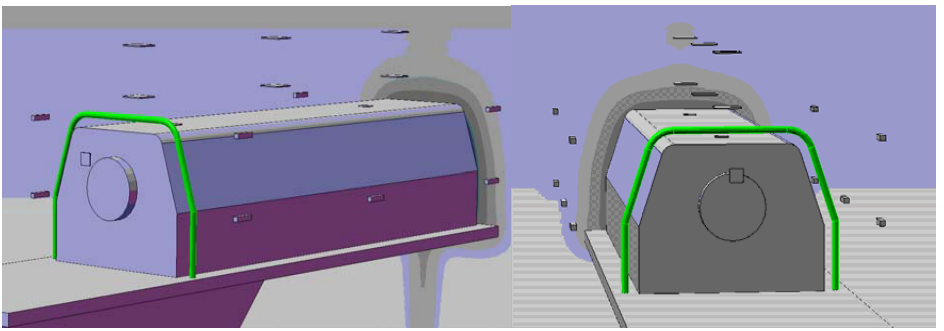
Antroji procedūra yra brūkšnio padėties nustatymas naudojant mikroskopą su skaitmenine kamera. Kalibravimo sistema turi užtikrinti standų sujungimą tarp matavimo mikroskopo ir interferometro retroreflektorinių veidrodėlių. Atstumo kitimas tarp šių komponentų didina matavimo paklaidą. Jis priklauso nuo struktūrinių jungimo narių išdėstymo bei jų plėtimosi koeficientų. Kitas svarbus veiksnys optinės mikroskopo ašies kampiniai svyravimai. Jie gaunami kai dėl netolygaus temperatūrų pasiskirstymo mikroskopo korpuse.

Lazerinis interferometras ir skaitmeninė kamera yra elektroniniai įrenginiai, kurie turi šiluminius nuostolius. Lazerinio interferometro spinduolio bangos ilgio stabilizacijai yra naudojamas precizinis šildytuvas. Jis pastoviai kaitina spinduolio vamzdelį, o šilumos perteklius išspinduliuojamas per korpusą šildo aplink esantį orą. Kamera turi CCD jutiklį, kuris darbo metu turi šiluminių nuostolių, dėl to šyla kameros korpusas

Pagrindinis šio skyriaus tikslas yra kalibravimo sistemos temperatūros šaltinių sukeliamų temperatūrinių laukų tyrimas ir šių faktorių įtakos mažinimas matavimo neapibrėžčiai.

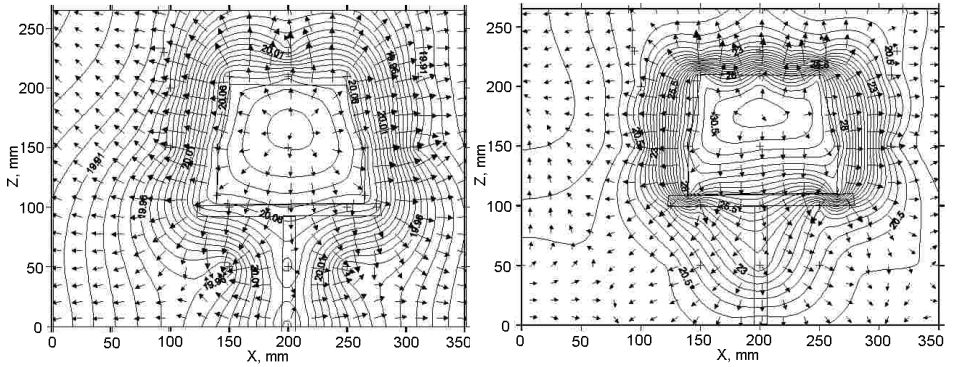
Jutiklių kalibravimas atliktas Fizinių ir technologijos mokslų centre (buvęs Puslaidininkių fizikos institutas) temperatūros vieneto etalono laboratorijoje. Kalibravimo neapibrėžtį sudarė šie sandai: etaloninės varžos temperatūros nestabilumo įtaka, celės įtaka, hidrostatinio slėgio pataisa, šiluminių gradientų įtaka, termometro savaiminio kaitinimo įtaka, tilto netiesiškumas. Gauta suminė kalibravimo neapibrėžtis 0,0105 K. Sukalibravus jutiklius yra gautos jų pataisos.

Temperatūrinio lauko apie lazerinio interferometro spinduliuotės šaltinį matavimui į PP2 buvo prijungti 21 PT100 jutikliai. Jų išdėstymo schema pateikta 3.9 paveiksle. Oro temperatūra buvo matuojama 17 jutiklių, du jutikliai buvo priklijuoti prie lazerio korpuso, du – prie lazerio stalo.



3.9 pav. Temperatūros jutiklių išdėstymas aplink lazerinį interferometrą
Fig. 3.9. The placement of temperature sensors around laser interferometer

Temperatūros jutikliai buvo išdėstyti apie lazerį taip, kad galima būtų atvaizduoti pastovios temperatūros kreives (izotermas) tam tikruose pjūviuose. Matavimas padalintas į tris fazes: ramybės, kai lazeris yra ilgą laiką išjungtas ir yra įgavęs patalpos oro temperatūrą, įšilimo, kai lazeris įjungiamas ir šyla, apipūtimo, kai lazeris yra darbo režime ir per vamzdelį su daug skylučių pučia oro srautas (3.9 pav.). Prieš šiuos matavimus nustatyta, kad lazerio korpuso šonai ir viršus įšyla beveik vienodai, todėl lazerio korpusui matuoti pajungti tik du jutikliai. Matavimai pakartoti trys kartus panašiomis sąlygomis. Kadangi matavimo rezultatai labai panašūs, paveikslai pateikti tik iš vieno matavimo duomenų. Atlikta temperatūrinių laukų simuliacija XZ erdvinėse koordinatėse su programa Surfer8 pagal surinktus eksperimento metu duomenys (3.10 pav.).



3.10 pav. Interferometro temperatūros lauko vertikalus pjūvis su vektoriniu žemėlapiu per vidurį korpuso a) kai lazeris išjungtas, b) darbo režime su įjungtu apipūtimu

Fig. 3.10. The middle vertical section on laser interferometer body with temperature field vector map a) when the laser is turned off, b) in operation mode with air blasting

Neįjungto lazerio temperatūros aplink jį pasiskirsčiusios simetriškai vertikaliam pjūviui. Oro srautas esantis patalpoje (apie 800 litrų per minutę) vienodai veikia matavimo taškus. Du jutikliai ant lazerį laikančio stovo rodė vidutiniškai 0,06 °C aukštesnę temperatūrą. Šių jutiklių surinktų duomenų sklaida buvo apie 5 kartus mažesnė nei oro temperatūrą matuojančių jutiklių.

Įjungus lazerį temperatūra sparčiai kyla iki 43 °C. Jutikliai virš šylančio korpuso, rodo kylančią temperatūrą, tačiau ji kyla labai lėtai. Jutikliai esantys dar aukščiau ir esantys korpuso šonuose rodo labai mažą pokytį. Jutikliai pritvirtinti prie lazerio laikiklio nerodo temperatūros pokyčio įšilimo fazės metu. Jutiklis esantis virš lazerio spindulio parodė beveik tokį patį temperatūros kilimą, kaip ir artimiausi jutikliai virš korpuso. Galima daryti išvadą, kad temperatūra staigiai kinta tik ant lazerio korpuso, o oras aplink lazerio korpusą šyla iš lėto. Be to, sušilęs oras kyla aukštyn, ir patalpoje esantis srautas išneša mažą dalį šilumos iš matavimo zonos.

Įjungus lazerio korpuso apipūtimą silpna oro srove, lazerio korpuso temperatūra per tris minutes krenta ir stabilizuojasi ties 30,16 °C. Lazerio korpuso šonuose esatys jutikliai paveikiami mažiausiai. Lyginant su pradine temperatūra, jų matuojamos temperatūros pakyla nuo 0,3 °C iki 0,6 °C. Virš lazerio korpuso ir iš priekio esatys jutikliai rodo šiltesnį orą nuo 1–2,4 °C. Jutikliai, pritvirtinti prie lazerio laikiklio, po valandos pradeda rodyti 0,02°C temperatūros pokytį. Vėliau, kas tris valandas, ji dar kyla po 0,01 °C, o po septynių valandų stabilizuojasi ir nebekyla. Temperatūros, tolstant nuo korpuso, mažėja beveik eksponentiniu dėsniu, todėl izotermes teko brėžti tik prie tam tikrų sveikų temperatūros reikšmių.

3.6. Tiesaus judesio nuokrypių įtaka kalibravimo paklaidai

Viena iš pagrindinių tiesaus judesio mazgų funkcinių charakteristikų yra tikslumas, ypač aktualus metrologiniams ir preciziniams technologiniams įrenginiams.

Prie svarbiausių tiesaus judesio paklaidų priskiriami maži judančio mazgo kampiniai svyravimai apie pagrindiniam judesiui statmenas ašis. Šios paklaidos vertinamos kaip vieno argumento – poslinkio pagrindinio judesio kryptimi funkcijos. Jų dydis priklauso nuo tiesaus judesio mazgų konstrukcijos ypatumų ir gamybos tikslumo, visų pirma kreipiamųjų tikslumo, guolių tipo ir jų pastatymo sistemos, pavaros parametrų, o taip pat kintančių aplinkos parametrų poveikio.

Perspektyviais yra skaičiuojamieji paklaidų kompensavimo (metrologiniuose įrenginiuose) arba mazgų judesių korekcijos (technologiniuose įrenginiuose) metodai, nereikalaujantys esminio įrenginio sudėtingumo ir gamybos tikslumo didinimo. Šių metodų įgyvendinimui sudaromi matematiniai modeliai, priklausantys nuo minėtųjų judesių paklaidų, nustatomos ir įvertinamos tiesaus judesio paklaidos komponentės (Kasparaitis 1991).

Šiame poskyryje išnagrinėti du pagrindiniai kampinių svyravimų skaičiuojamieji paklaidų įvertinimo metodai – statistinis ir aktyvusis, jų taikymo ypatumai ir sritys. Eksperimentiniai tyrimai atlikti panaudojant precizinių brūkšninių ilgio matų kalibratorių ir specialiai sukurtus stendus.

Pirmuoju atveju judesio paklaidos matuojamos, aproksimuojamos parametrinėmis funkcijomis, sudaromi matavimų paklaidų priklausomybės nuo judesio paklaidų modeliai ir pagal juos realiame laiko mastelyje atliekama paklaidų kompensacija. Liekamųjų paklaidų dydis priklauso nuo judesio paklaidų stabilumo bei jų sisteminguųjų komponenčių aproksimacijos parametrinėmis funkcijomis tikslumo.

Aktyviosios paklaidų kompensacijos atveju kampinių karietėlės svyravimų kompensaciniai dydžiai nustatomi pagal dviejų skirtingų karietėlės taškų, esančių kompensacijos plokštumoje, poslinkių skirtumą. Aktyviosios kampinių svyravimų kompensacijos paklaidos susijusios su aplinkos parametrų pokyčio įtaka lazerio spindulio bangos ilgiui. Tokiems aplinkos parametrų pokyčiams ypač jautrios ilgos matavimo sistemos, kurių lazerio spindulys ore sklinda keletą metrų. Būtent tokia yra nagrinėjamoji ilgų linijinių skalių kalibravimo sistema.

Statistinis paklaidų įvertinimas. Precizinių brūkšninių ilgio matų kalibratorių ir precizinių koordinačių matavimo mašinų tikslumo nustatymui plačiai yra naudojamas statistinis paklaidų įvertinimas. Šio metodo esmę sudaro paklaidų matavimas, statistinis apdorojimas, įsiminimas ir jų poveikio eliminavimas įrenginio darbo metu.

Tai daroma tokia tvarka:

1. Išrenkamos paklaidos, kurių sistemingoji dalis bus įsimenama ir kompensuojama arba koreguojamas jos poveikis.

2. Parenkamos paprastos, nuo nedidelio skaičiaus parametrų priklausančios funkcijos, kuriomis aproksimuojamos įsimenamosios paklaidos. Paklaidos, priklausančios nuo vieno argumento, pvz.; matavimo mazgo poslinkio, aproksimuojamos vienamatėmis parametrinėmis funkcijomis. Paklaidos, priklausančios nuo kelių argumentų – sudėtingesnėmis daugiamatėmis funkcijomis.

3. Matuojant nustatomos paklaidos ir suskaičiuojami jas aproksimuojančių funkcijų parametrai.

4. Sudaromos ir į matavimo priemonės procesoriaus atmintį įvedamos programos, pagal kurias kiekvieno matavimo metu apskaičiuojami kompensaciniai ar korekciniai dydžiai, pagal kuriuos kompensuojami matavimo rezultatai arba atliekama programinio įrenginio korekcija.

Paklaida Δ_Q susideda iš sistemingosios dedamosios, kuri yra nusakoma šią paklaidą aproksimuojančią funkcija F_Q, ir atsitiktinės aproksimacijos paklaidos E_Q (Bentkus 2001):

$$\Delta_Q = F_Q(\xi,\theta) + E_Q , \tag{3.12}$$

čia $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_k)$ – argumentai (koordinatės, temperatūra ir t.t.), registruojami kiekvieno matavimo metu; $\theta = (\theta_1, \theta_2, ..., \theta_n)$ – funkcijos F_Q parametrai.

Paklaidai Δ_Q aproksimuoti parenkama: pagrindiniai argumentai ξ_j, apskaičiuota aproksimacijos funkcija F_Q, jos parametrų θ vertės.

Pirmiausia yra nustatomas paklaidų reikšmingumas, t.y. ar yra tikslinga šių paklaidų poveikį kompensuoti arba koreguoti. Tai įvertinama maksimalių δ_{imax} ir minimalių δ_{imin} paklaidų reikšmių skirtumą

$$\Delta_{max} = \delta_{imax} - \delta_{imin} , \tag{3.13}$$

su paklaidų verčių δ_{ij} vidutiniu kvadratiniu nuokrypiu S_{pv} nuo paklaidų vidurkių δ_i,

$$S_{PV} = \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{M} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \left| \delta_i - \delta_{ij} \right|^2 \right\}^{\frac{1}{2}} , \tag{3.14}$$

čia δ_{ij} – paklaidos j-ios realizacijos reikšmė *i*-e taške *i = 1,2,...;M; j = 1,2,...;N*; δ_i – paklaidos vidurkių reikšmė *i*-e taške, $\delta_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \delta_{ij}$.

Praktikoje kompensacija prasminga, kai $\Delta_{max} \geq \pm 1\ S_{pv}$.

Aproksimuojančios funkcijos argumentų ξ skaičius, atitinkantis didžiausią įtaką paklaidai turinčių veiksnių skaičiumi, nustatomas paklaidų empirinio pasiskirstymo analize pagal histogramas, nustatomos lygtimi

$$H_{\delta}(x)=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}1(x_j,x_{j+1})(\delta_j),\ x_j\langle x\le x_{j+1},\qquad(3.15)$$

čia δ – nagrinėjama paklaida; $\delta_1,\delta_2,...,\delta_N$ – stebimos jos vertės; $1_A(x)$ – indikatorinė aibės A funkcija $1_A(x)=\begin{cases}1, x\in A,\\ 0, x\notin A;\end{cases}$ $-\infty\langle x_1\langle x_2\langle...\langle x_m\langle\infty$ – operatoriaus parenkamas paklaidos δ verčių intervalo suskaidymas.

Jei histograma turi daugiau, nei vieną viršūnę, tai rodo, kad paklaidos reikšmė priklauso ne tik nuo poslinkio, bet ir kitų faktorių įtakos. Tokią įtaką gali turėti ir būti aproksimuojančių funkcijų argumentai ir įrenginių eksploatavimo aplinkos temperatūros kitimas paklaidų kalibravimo metu, judesio trajektorijos priklausomybė nuo jo krypties, atsirandanti, pavyzdžiui, dėl mechaninės histerezės.

Siekiant maksimalaus paklaidų įvertinimo tikslumo, aproksimuojanti funkcija ir jos parametrai turi minimizuoti paklaidų verčių vidutinį kvadratinį nuokrypį nuo aproksimuojančiosios funkcijos.

Sistemintųjų paklaidų aproksimacijos parametrinės funkcijos parenkamos pagal jų kitimo pobūdį, jų koreliuotumo vertę, nagrinėjamą pasinaudojant empirine koreliacijos funkcija:

$$\hat{c}(k)=\frac{1}{N\cdot S_{p0}^2}\sum_{i=1}^{N-k}\delta(q_1)\delta(q_{i+k}),\ k=0,1,...;,\qquad(3.16)$$

kuri apskaičiuojama pagal matavimo rezultatus $\delta(q)$, arba pagal jų spektrinį tankį, kurio įverčiu priimama periodograma:

$$I(v)=\frac{1}{2\pi M}\left|\sum_{k=1}^{M}(\delta_k-\mu)e^{-ik2\pi v}\right|^2,\ 0\le v\le\frac{1}{2},\qquad(3.17)$$

čia $\mu=\frac{1}{M}\sum_{k=1}^{M}\overline{\delta}_k$, $k=1,2,...;$ M – paklaidos vidurkis, δ_k – eksperimentų rezultatai, v – dažnis.

Ankstesniais tyrimais nustatyta (Bentkus 2001), kad precizinių judesių mazgų su aerostatiniais guoliais paklaidų periodograma maksimumus turi žemų dažnių srityje.Pagal tai parenkamas aproksimuojančių funkcijų tipas, jų parametrai. Kampinės tiesaus judesio paklaidos pakankamai tiksliai aproksimuojamos

algebriniais polinomais, algebrinių polinomų splainais, trigonometriniais polinomais.

Aproksimacijos tikslumas paprasčiausiu būdu įvertinamas ekspertiniu būdu pagal paklaidų verčių vidutinį kvadratinį nuokrypį nuo aproksimuojančios funkcijos lyginant jį su paklaidų verčių vidutiniu kvadratiniu nuokrypiu nuo paklaidų vidurkių S_{pv}.

$$S_{PF} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{n} \left| \Delta_Q(\xi(j)) - F_Q(\xi(j), \hat{\theta}) \right|^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \tag{3.18}$$

Paklaidų aproksimacijos optimalumas objektyviau gali būti įvertintas, nustačius ar liekamosios paklaidos yra pasiskirsčiusios pagal Gauso dėsnį. Tai tikrinama pasinaudojant Kolmogorovo ir Smirnovo kriterijumi. Esant reikalui, taip pat skaičiuojamas standartinės asimetrijos $\hat{\theta}$ ir eksceso $\hat{C}$ koeficientų reikšmes.

Paklaidos δ empirinę pasiskirstymo funkciją pažymėjus

$$F_N(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} 1_{(-\infty, x)}(\delta_i), \tag{3.19}$$

o jos tikrąją pasiskirstymo funkciją

$$F(x) = P\{\delta, x\}. \tag{3.20}$$

Kolmogorovo ir Smirnovo statistika apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$D_N = \max_{-\infty \langle x \langle \infty} \sqrt{N} \left| F_N(x) - F(x) \right|. \tag{3.21}$$

Jei $F(x) \equiv \Phi(x; a; \sigma^2)$ kur $\Phi(x; a; \sigma^2)$ yra Gauso skirstinys, kurio vidurkis a ir dispersija σ^2, tai atsitiktinio dydžio D_N skirstinys yra žinomas ir nepriklauso nuo dydžių a ir σ^2. Taip pasiskirsčiusį atsitiktinį dydį pažymime ξ_N. Tikrinant pagal Kolmogorovo ir Smirnovo kriterijų, ar skirstinys yra Gauso, skaičiuojama tikimybės $P\{\xi_N \rangle D_N\}$ vertė, kuri vadinama Kolmogorovo ir Smirnovo kriterijaus verte.

Jei ši vertė mažesnė už 0,05, tai hipotezė, kad liekamoji paklaida yra pasiskirsčiusį pagal Gauso skirstinį.

Esant vidutinėms Kolmogorovo ir Smirnovo kriterijaus vertėms (nuo 0,05 iki 0,75), papildomai apskaičiuojami standartiniai asimetrijos $\hat{a}$ ir eksceso $\hat{c}$ koeficientai:

$$\hat{a} = \frac{\gamma_1}{\sqrt{D\gamma_1}}, \tag{3.22}$$

$$\hat{c} = \frac{\gamma_2 - E\gamma_2}{\sqrt{D\gamma_2}}, \tag{3.23}$$

čia $\gamma_1 = \frac{\hat{m}_3}{s^3}$ $\gamma_2 = \frac{\hat{m}_4}{s^4}$; $\hat{m}_k = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\delta_i^k$ i-osios eilės statistinis įvertis, kai $k = 1,2,...;$ $s = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\delta_i - m_1)^2}$ – vidutinio kvadratinio nuokrypio σ statistinis įvertis; $E\xi$, $D\xi = E(\xi - E\xi)^2$ – atitinkamai atsitiktinio dydžio vidurkis ir dispersija.

Jeigu liekamoji paklaida pasiskirsčiusį pagal skirstinį $\Phi(x, a, \sigma^2)$, tai

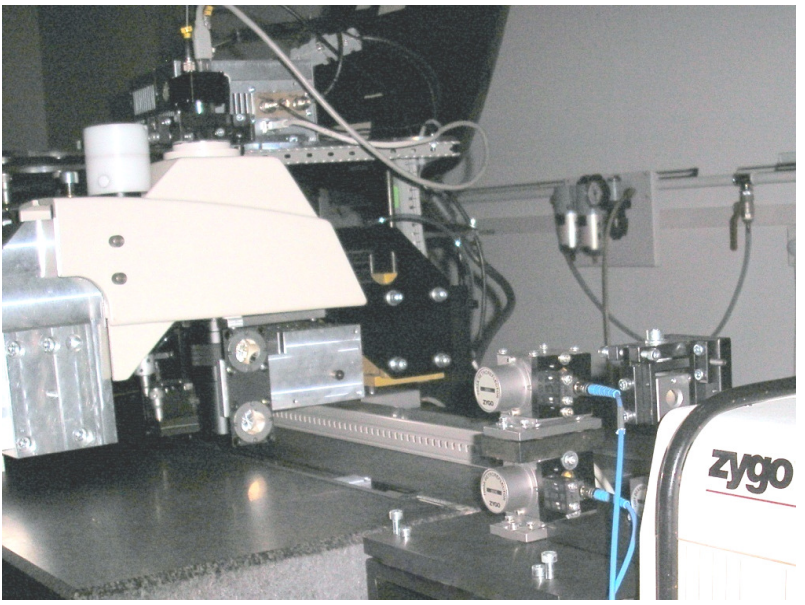
$$E\gamma_1 = 0,\ D\gamma_1 = \frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}, \tag{3.24}$$

$$E\gamma_2 = -\frac{6}{n+1},\ D\gamma_2 = \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \tag{3.25}$$

Atsitiktinių dydžių $\hat{a}$ ir $\hat{c}$ skirstiniai, esant dideliems N, artimi skirstiniui $\Phi(x;0,1)$. Todėl, jei $\hat{a}$ ir $\hat{c}$ vertės nepatenka į intervalą [-2,2], tai hipotezė, kad liekamoji paklaida δ pasiskirsčiusi pagal normalųjį dėsnį, atmetama.

Aktyvusis paklaidų įvertinimo metodas.

Jo esmę sudaro tai, kad įrenginio darbo metu yra matuojami kampiniai judančio mazgo svyravimai apie dvi pagrindinio judesio krypčiai statmenas ašis, skaičiuojamos ir kompensuojamos arba koreguojamos dėl šių svyravimų atsirandančios taip vadinamos Abbe arba komparavimo paklaidos. Jų išvengti neįmanoma, nes fiziškai negalima įvykdyti Abbe principo reikalavimus (Barakauskas 2008). Tokio paklaidų kompensacijos metodo tyrimams komparatoriaus konstrukcijoje įvesta papildoma interferometro koordinatė, įgalinanti matuoti kampinius karietėlės svyravimus kalibruojamosios skalės darbinėje plokštumoje realiame laike. Jos vaizdas yra 3.11 paveiksle.



3.11 pav. Optinė kampinių paklaidų matavimo sistema
Fig. 3.11. Optical angular error measuring system

Abbe paklaidos pataisos dydis k_v vertikalioje plokštumoje nustatomas formule:

$$k_v = a_v x l_v \,, \tag{3.26}$$

čia a_v – maži kampiniai judančio mazgo svyravimai apie y ašį, l_v – atstumas tarp poslinkio matavimo linijos ir matavimo ar kitos paskirties funkcijos linijos.

Abbe paklaidos pataisos k_h dydis horizontalioje plokštumoje nustatomas analogiškai. Šio metodo kompensacijos ar korekcijos paklaida susijusi su abiejų lygties komponenčių įvertinimo tikslumu. Preciziniuose įrenginiuose maži kampiniai judančių mazgų svyravimai matuojami lazeriniais interferometrais su specialiais optiniais įtaisais.

Maži kampiniai judančio mazgo svyravimai yra skaičiuojami pagal jo dviejų taškų poslinkių skirtumą dalinant jį atstumo tarp lazerio spindulių. Todėl šių taškų poslinkių matavimo paklaidos tiesiogiai įtakos minėtų mažų mazgo svyravimų rodmenis. Svarbiausiomis iš jų yra:

- oro temperatūros nuokrypio visame matavimo ilgyje įvertinimo ir kompensacijos paklaida;
- oro slėgio nuokrypio įvertinimo ir kompensacijos paklaida;
- oro drėgmės įvertinimo ir kompensacijos paklaida;
- Edleno formulės neapibrėžtis;

- lazerio bangos ilgio stabilumas vakuume.

Pagrindiniais kampinio svyravimo matavimo paklaidų šaltiniais yra:

- poslinkio matavimo paklaida ir jos dydžio kitimas veikiant kintamiems aplinkos faktoriams;
- atstumo tarp lazerio spindulių nustatymo paklaida;
- paklaida, atsirandanti dėl paslankaus mazgo tampriųjų deformacijų.

Statistinio paklaidų įvertinimo metodo tikslumo analizė. Pirmiausia buvo nustatytas šių paklaidų kompensacijos tikslingumas lyginant paklaidų vidurkį, maksimalių δ_{imax} ir minimalių δ_{imin} reikšmių skirtumą su paklaidų verčių δ_{ij} vidutiniu kvadratiniu nuokrypiu S_{pv} nuo paklaidų vidurkių δ_i. Įvertinus periodogramą, paklaidų vidurkio reikšmes aproksimuojančia funkcija priimtas algebrinių polinomų splainas

$$F(x)=\sum_{i=0}^{m} a_i x^i + \sum_{j=1}^{v}\sum_{k=1}^{d} b_{jk}(x-u_j)^{m+l-k}, \qquad (3.27)$$

$$X_+=\begin{cases} x, x>0 \\ \frac{}{0, x\le 0}\end{cases},\ \theta=(a_0,.....,a_n;u_1.....,u_v;b_{11},....b_{vd}),\ n_F=m+1+(d+1)V, \qquad (3.28)$$

čia m– splino eilė, m = 1,2…; v– mazgų skaičius $u_1,u_2,.....u_v$; d – splaino defektiškumas, d = 1,2,…,m+1.

Gautų matavimo duomenų analizės išdavoje gauti 3.12 paveiksle pavaizduoti rezultatai. Aproksimacija taip pat atlikta algebriniais pirmos ir trečios eilės polinomais. Šešių realizacijų vidutinių reikšmių (1) ir aproksimacijos pirmos (2) ir trečios (3) eilių polinomais bei antros eilės splainu (4) pateikti grafikuose.

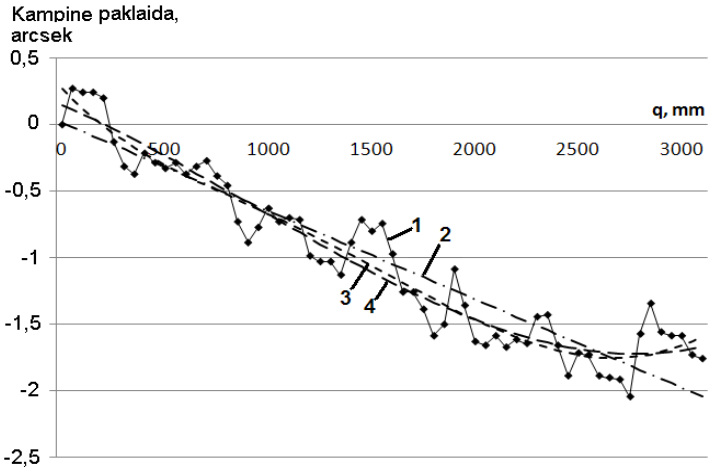
Sistemingoji paklaidos dalis, nustatoma minimalių ir maksimalių vidutinių reikšmių skirtumu, yra 2,1″.

Suskaičiuotos tokios vidutinių kvadratinių nuokrypių reikšmės:

- paklaidų reikšmių vidurkio reikšmių atžvilgiu S_{pv} = 0,12″;
- paklaidų reikšmių aproksimuojančiosios funkcijos reikšmių atžvilgiu S_{pf} = 0,14″;
- aproksimuojančiosios funkcijos reikšmių vidurkio reikšmių atžvilgiu S_{fv} = 0,18″.

Matavimo rezultatų sklaida, nusakoma vidutiniu kvadratiniu nuokrypiu S_{pv} atsiranda dėl šių dviejų priežasčių:

- matuojamo taško tiesaus judesio nestabilumo,
- kampinių svyravimų matavimo neapibrėžties (šie abu dydžiai tiksliai nėra nežinomi).



3.12 pav. Kampinių svyravimų vidurkio ir jo aproksimacijos skirtingomis funkcijomis grafikai

Fig. 3.12 Diagrams of mean angular fluctuation and its approximation by various functions

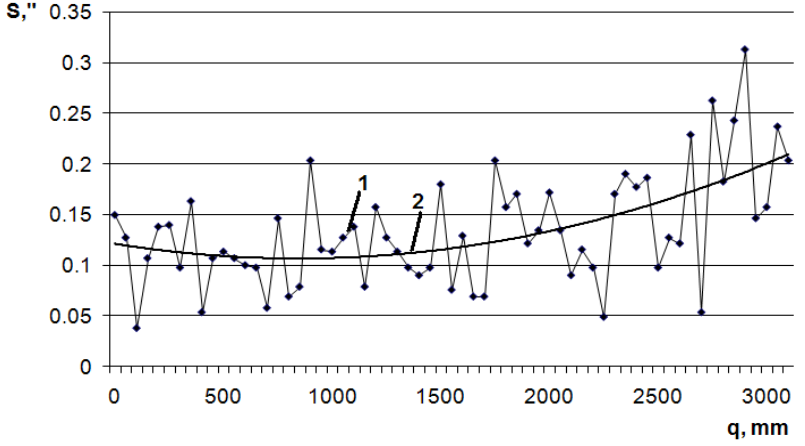
Tiesaus judesio mazgų su aerostatiniais guoliais matuojamo taško tiesaus judesio nestabilumą apytikriai galima įvertinti tarpelio aerostatiniuose guoliuose kitimu. Eksperimentiškai nustatyta, kad, mazgui judant, jis kinta 0,4 μm ribose. Dėl to atsirandančių atsitiktinių kampinių mazgo svyravimų vidutinis kvadratinis nuokrypis yra S_a = 0,069″. Tuomet standartinė kampinių svyravimų matavimo neapibrėžtis siekia S_m = 0,098″.

Eksperimentiškai nustatyta, kad kampinių svyravimų sklaida yra skirtinga karietėlei esant skirtingame atstume nuo ją matuojančio lazerinio interferometro. Šiam atstumui didėjant, matavimo rezultatų sklaida didėja.

Persislenkant karietėlei nuo minimalaus iki maksimalaus 3500 mm atstumo iki lazerinio interferometro matavimo rezultatų sklaidos vidutinio kvadratinio nuokrypio S_{pv} vidutinė reikšmė pasikeičia nuo 0,113″ iki 0,215″. Pagrindine matavimo rezultatų sklaidos priežastimi yra minėtos lazerinio interferometro ilgio matavimo paklaidos komponentės, priklausančios nuo matavimo ilgio. Atsitiktiniai judančio mazgo kampiniai svyravimai, įvertinami tarpelio aerostatiniuose guoliuose kitimu, yra identiški abiejose padėtyse. Eliminavus atsitiktiniai judančio mazgo kampinių svyravimų įtaką matavimo rezultatams, gaunama, kad matavimo rezultatų sklaidos vidutinis kvadratinis nuokrypis S_m, priklausantis nuo lazerinio interferometro rodmenų kitimo, keičiantis matavimo atstumui, kinta kinta nuo 0,082″ iki 0,198″.

3.13 paveiksle parodyta karietėlės kampinių svyravimų vertikalioje plokštumoje matavimo rezultatų sklaidos vidutinio kvadratinio nuokrypio įverčio S

priklausomybė nuo karietėlės atstumo iki lazerinio interferometro q, suskaičiuota iš šešių realizacijų rezultatų.



3.13 pav. Kampinių svyravimų sklaidos įverčio duomenys*(1)* ir aproksimacija kvadratine funkcija (*2)*

Fig. 3.13 Diagrams of dependence of the spread of results on the distance of measurement *(1)* and approximation by parametric function (*2)*

Statistinio ir aktyviojo paklaidų įvertinimo metodų palyginimas. Metodų palyginimui, kiekvieno jų suminė paklaida nustatyta atskirų paklaidos komponenčių sumavimu. Kadangi atskiros atsitiktinės paklaidos yra pasiskirsčiusios pagal Gauso dėsnį, tai jos sumuojamos geometriškai pagal formulę

$$S = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2 \,. \qquad (3.28)$$

Taikant statistinį kampinių svyravimų įvertinimo metodą atskiromis metodo suminės paklaidos komponentėmis bus:

- judesio nepasikartojamumo vidutinis kvadratinis nuokrypis (S_a = 0,069″),
- aproksimuojančiosios funkcijos reikšmių vidutinis kvadratinis nuokrypis vidurkio reikšmių atžvilgiu (S_{fv} = 0,165″).

Aktyviojo metodo atveju tai bus:

- santykinių virpesių poveikio, perskaičiuoto į kampinį karietėlės svyravimą, vidutinis kvadratinis nuokrypis (S_v = 0,092″),
- kampinių svyravimų matavimo paklaidos vidutinis kvadratinis nuokrypis (S_m kinta nuo 0,082″ iki 0,198″)

Tuomet statistinio paklaidų įvertinimo metodo paklaidos vidutinis kvadratinis nuokrypis yra pastovus, lygus S = 0,2″. Aktyviojo paklaidų įvertinimo meto-

do paklaidos vidutinis kvadratinis nuokrypis matavimo ribose kinta nuo 0,123″ iki 0,22″.

Atskirai tirtų precizinių tiesaus judesio mazgų su riedėjimo guoliais judesio nepasikartojamumo vidutinis kvadratinis nuokrypis yra S_a = 0,262″. Tuomet statistinio paklaidų įvertinimo metodo paklaidos vidutinis kvadratinis nuokrypis yra lygus S = 0,322″. Aktyviojo paklaidų įvertinimo metodo paklaidos vidutinis kvadratinis nuokrypis išlieka tas pats kaip mazgų su aerostatiniais guoliais, t.y. kinta nuo 0,125″ iki 0,22″.

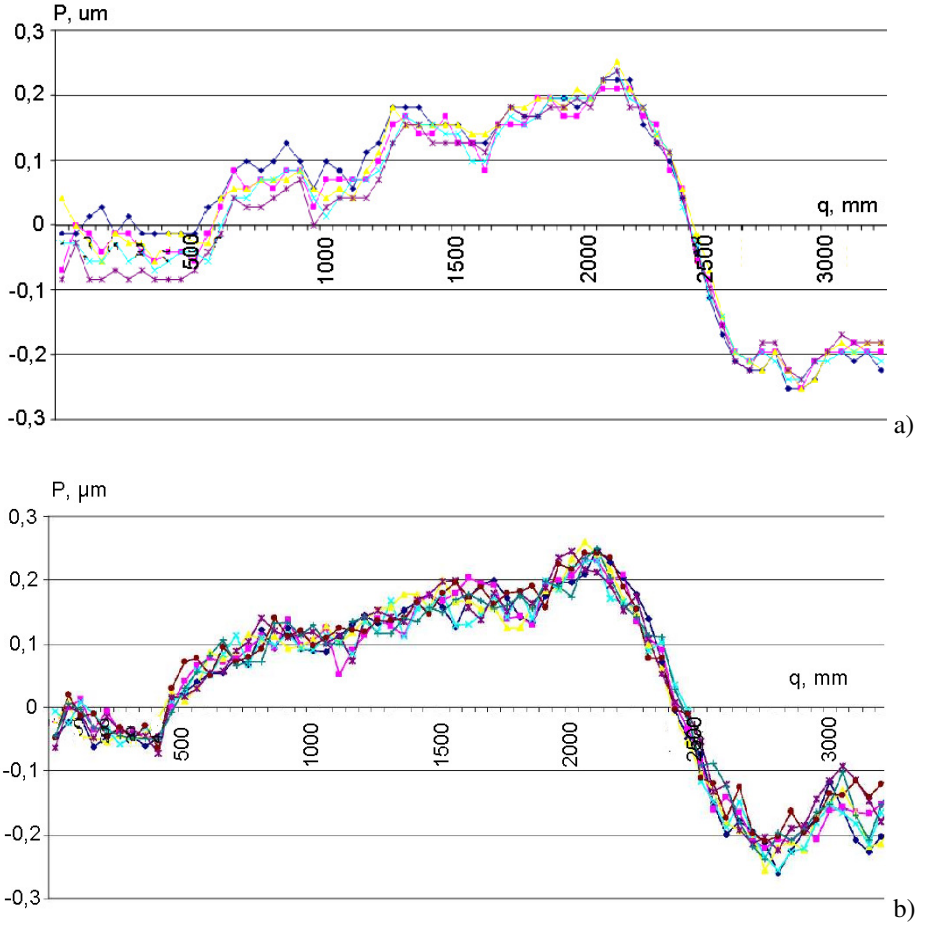
Stovo kreipiančiųjų ir atraminių paviršių kokybė ir tikslumas nulemia linijos detektavimo sistemos ir interferometro matavimo veidrodį nešančios karietėlės judesio tikslumą bei matuojamojo brūkšninio mato nustatymo patikimumą, todėl precizinėms ilgio kalibravimo sistemoms keliami ypač aukšti reikalavimai konstrukcinių elementų paviršių plokštumui ir atitinkamų paviršių lygiagretumui. Kalibravimo sistemai dirbant dinaminiu režimu ypač svarbus tiesiaeigio linijinio judesio užtikrinimas.

Siekiant nustatyti kampines tiesaus judesio paklaidas HP 5528A lazeriniu interferometru, panaudojant HP kampinio matavimo komplektą buvo pamatuoti karietėlės, judančios ant aerostatinių atramų, kampiniai svyravimai tiek horizontaliojoje, tiek ir vertikaliojoje plokštumose. Karietėlės atramos išdėstytos trikampiu. Tolygų išilginį karietėlės matavimo judesį suteikė pavara. Duomenims skaičiuojamąjai aproksimacijai gauti, kampiniai karietėlės svyravimai pastoviam karietėlės greičiui, lygiam skalės kalibravimo greičiui 4 mm/s. Tyrimai atlikti termokonstantinėje laboratorijoje. Jų metu laboratorijoje buvo palaikoma +20±0,15 °C temperatūra, 40±0,10 % drėgmė; oro slėgis kito 1000±10 hPa ribose. Oras į patalpą buvo paduodamas ir iš jos išsiurbiamas daugelyje vietų taip, kad patalpoje nesusidarytų intensyvūs oro srautai ir sūkuriai.

Kampinis karietėlės svyravimas matuojamas kelis kartus karietėlei judant skirtingomis kryptimis. Skalės brūkšnio padėties matavimo rezultatų pataisų reikšmės surandamos kampinių svyravimų reikšmes padauginus iš atstumo tarp karietėlės poslinkio matavimo linijos ir matuojamosios liniuotės brūkšnių plokštumos. Iš kelių matavimų gautų pataisų surandamas reikšmių vidurkis skirtingoms jos poslinkio reikšmėms. Ši vidutinių reikšmių linija yra aproksimuojama splainu.Gauti šie karietėlės judesio nuokrypos matavimų rezultatai: didžiausia nuokrypos reikšmė vertikalioje plokštumoje sudaro 2,7″, o horizontalioje – 2,2″.

Aktyviosios kompensacijos atveju skalės brūkšnių kalibravimo metu ZygoLOT firmos ZMI 2000 modelio heterodininiu lazeriniu interferometru matuojamas dviejų karietėlės taškų, esančių vertikalioje plokštumoje, poslinkių matavimo kryptimi skirtumas. Brūkšnio padėties nuskaitymo paklaidos pataisa suskaičiuojama minėtą poslinkių skirtumą dauginant iš atstumo tarp minėtų taškų ir atstumo tarp karietėlės poslinkio matavimo linijos ir matuojamosios liniuotės brūkšnių plokštumos.

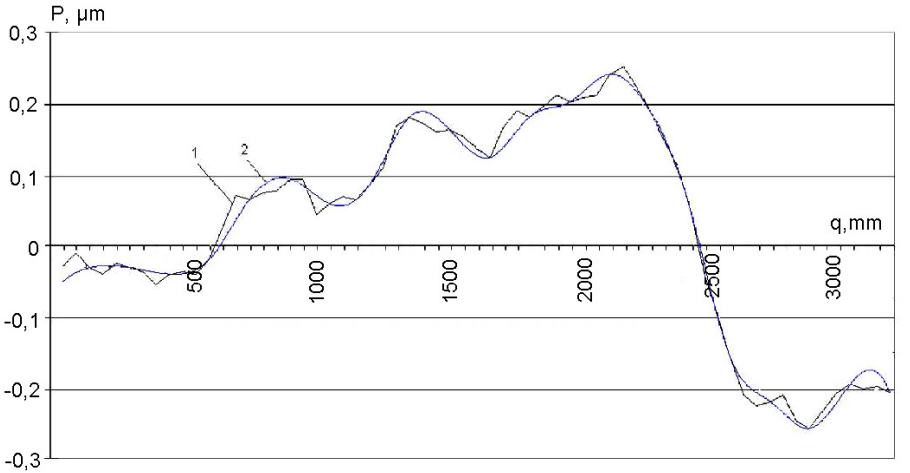
Karietėlės kampinių svyravimų apie horizontalią skersinę ašį matavimų pataisų grafikai gauti abiem metodais pateikti 3.14 paveiksle.



3.14 pav. Kampinių svyravimų apie horizontalią ašį pataisų grafikai naudojant metodus a) statistinį b) aktyvųjį

Fig. 3.14. Diagrams of angular error on horizontal axis using compesation method a) statistical b) active

Zygo lazeriniu interferometru išmatuotų kampinių svyravimų vidutinių reikšmių linija 1 ir ją aproksimuojančio splaino grafikas 2 parodyti 3.15 paveiksle.



3.15 pav. Kampinių svyravimų apie horizontalią ašį pataisų vidurkių linija 1 ir jos aproksimacija 2

Fig. 3.15. Diagrams of angular error on horizontal axis compensation line

Kiekvieno matavimo lazeriniais interferometrais metu yra matuojama aplinkos oro temperatūra, oro drėgmė, oro slėgis ir realiame laiko mastelyje atliekama minėtų faktorių įtakos lazerio bangos ilgiui korekcija.

Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad kompensuojamų sistemingųjų pataisų, nusakomų aproksimuojamu splainu, didžiausias dydis yra 0,475 µm, nekompensuojamų pataisų, atsirandančių dėl atsitiktinės kampinių karietėlės svyravimų komponentės, vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo aproksimuojančios funkcijos yra S_{pF} = 0,022 µm, o didžiausias nuokrypis nuo aproksimuojančios funkcijos M_{pF} = 0,076 µm. Aproksimacijos tikslumas įvertinamas aproksimuojančios funkcijos reikšmių vidutiniu kvadratiniu nuokrypiu vidurkių atžvilgiu. Jis yra S_{fv}= 0,028 µm. Tai iliustruoja pakankamai didelį aproksimacijos tikslumą. Idealios kompensacijos atveju, t. y. kompensacijos reikšmes skaičiuojant pagal atskirų matavimų pataisų vidurkius, didžiausia kompensuojamų pataisų reikšmė yra 0,488 µm, o nekompensuojamų pataisų vidutinis kvadratinis nuokrypis yra S_{pv}=0,018 µm.

Šiuo atveju kompensuojamosios paklaidos dydį reikėtų vertinti vidurkių teigiamų ir neigiamų reikšmių absoliučių dydžių suma. Ji yra lygi 0,498 µm. Nekompensuojamų pataisų dydis nustatomas jų reikšmių vidutiniu kvadratiniu nuokrypiu vidurkių atžvilgiu S_{pv} = 0,0196 µm.

Tiriamajam komparatoriui kompensuojamoji sistemingoji karietėlės svyravimų apie vertikaliąją ašį pataisų komponentė yra 0,085 µm. Nekompensuojamųjų pataisų vidutinis kvadratinis nuokrypis nuo vidurkių siekia 0,0067 µm.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus lazerinės spinduliuotės šaltinio ir mikroskopo kamerą supančių temperatūrinių laukų tyrimus, nustatyti jų gradientai ir poveikis kalibravimo tikslumui. Įdiegus originalią lazerio skleidžiamos šilumos pašalinimo sistemą, sumažėjo intensyvios šiluminės spinduliuotės šaltinių poveikis, temperatūriniai gradientai erdvėje ir laike įgavo monotoninį pobūdį.

2. Sudarius kameros mikroskopo modelį baigtinių elementų metodu ir jį ištyrus, rasta, kad dėl kameros tiesioginio temperatūrinio poveikio termiškai deformuojasi mikroskopo korpusas, mikroskopą ir lazerinį interferometrą jungiantys elementai bei atsiranda mikroskope suformuoto skalės vaizdo poslinkiai, pasireiškiantys kaip kalibravimo paklaidos sandai. Dėl terminio CCD kameros poveikio atsirandanti kalibravimo paklaida turi atsitiktinį pobūdį. Tyrinėtai konstrukcijai šios paklaidos sklaidos lauko įvertis yra +/-0,23µm, esant 95% pasikliovimo intervalui.

3. Aproksimacijos tikslumas ekspertiniu būdu įvertinamas pagal paklaidų verčių vidutinį kvadratinį nuokrypį nuo aproksimuojančios funkcijos, jį lyginant su paklaidų verčių vidutiniu kvadratiniu nuokrypiu nuo paklaidų vidurkių S_{pv}.

4. Didėjant poslinkiams, dėl išorinių faktorių poveikio didėja kampinių tiesaus judesio matavimo atsitiktinės paklaidos komponentė, t.y. šių matavimų rezultatų sklaida.

5. Statistinės paklaidų kompensacijos taikymo prasmingumą siūloma vertinti pagal sistemintosios ir atsitiktinės suminės paklaidos dedamųjų santykį. Šis metodas pasitvirtino, kai sistemingoji paklaida yra ne mažesnė už paklaidų verčių vidutinį kvadratinį nuokrypį nuo paklaidų vidurkio.

6. Tikslumo ir ekonominiu požiūriais optimaliu kampinių tiesaus judesio paklaidų įvertinimo ir kompensavimo skaičiuojamuoju metodu laikytinas statistinis, kai judesys yra stabilus, matuojamas ir kompensuojamas didelėse eigose. Tai būdinga, pavyzdžiui, kreipiamosioms su aerostatiniais guoliais, kai eigos yra didesnės už 1–1,5 m.

7. Kai judesiui būdingas trajektorijos nepastovumas ir, kai eigos yra iki 1000 mm, didesnis kampinių tiesaus judesio paklaidų įvertinimo ir kompensavimo tikslumas pasiekiamas taikant aktyvųjį metodą.

4

Kalibravimo sistemos kompleksinio tikslumo tyrimas

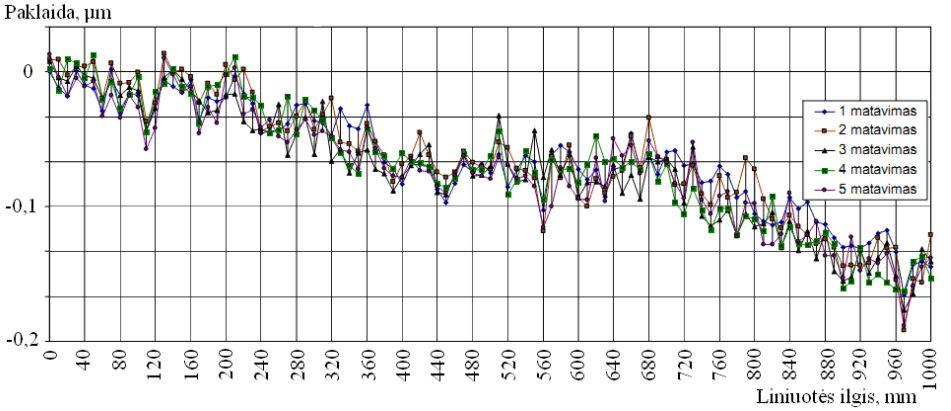
Kalibravimo sistemos galimybėms įvertinti buvo atlikti etaloninių linijinių skalių matavimai, o matavimo rezultatai palyginti su kitų laboratorijų gautais kalibravimo duomenimis.

Kalibravimui buvo pasirinkta H profilio etaloninė skalė Nr. 87-0226. Ši skalė pagaminta iš Invar-stabil lydinio, kuriame yra 58 % nikelio. Skalės plėtimosi koeficientas – $11{,}8\times10^{-6}$ K^{-1}. Ant skalės paviršiaus iš abiejų pusių netoli Beselio taškų priklijuojami keturi PT100 plėveliniai „Jumo“ įmonės jutikliai. Skalė pastatoma ant dviejų pusiau perpjautų cilindrų Beselio taškuose ir išstatoma matavimo kryptimi pagal įbrėžtą ant skalės išilginę liniją. Vertikali mikroskopo padėtis derinama pagal vaizdo ryškumą visame skalės ilgyje. Kadangi skalės uždėjimo ant granito ir išstatymo metu ji liečiama rankomis (su pirštinėmis), todėl, skalę pastačius, dar kuri laiką yra matuojama jos temperatūra. Nustačius, kad skalės temperatūra susilygino su oro temperatūra ir daugiau nebekinta, pradedamas matavimas. Ant skalės paviršiaus kas 10 mm įrėžti brūkšniai. Iš viso matuojama 101 brūkšnio padėtis. Brūkšnio ilgis yra didesnis nei kameros fotografuojamo vaizdo aukštis.

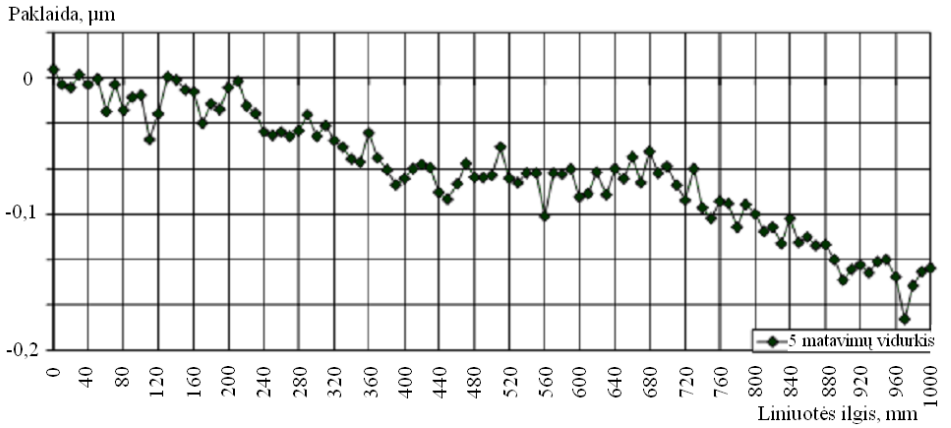
Lazerinio interferometro spindulio bangos ilgio kompensacijai buvo matuojama oro temperatūra 4 jutikliais, vienu slėgis ir vienu drėgmė. Jei kalibravimo metu registruojamas temperatūros, patalpos oro slėgio ar drėgmės pokytis, tai

pagal Edlen‘o formulę yra perskaičiuojamas oro lūžio koeficientas, o vėliau patikslinamas interferometro lazerio bangos ilgis kalibravimo erdvėje. Kalibravimo metu oro temperatūra svyravo nuo 19,879 iki 20,026 °C, slėgis nuo 751,6 iki 753,3 Hg/mm, santykinė oro drėgmė nuo 52,4 % iki 54,7 %. Kalibravimo darbinis greitis buvo 3 mm/s, kameros ekspozicijos laikas 17 µs. Vieno skalės matavimo trukmė 5 minutės 32 sekundės. Mikroskopo objektyvo didinimas 50×.

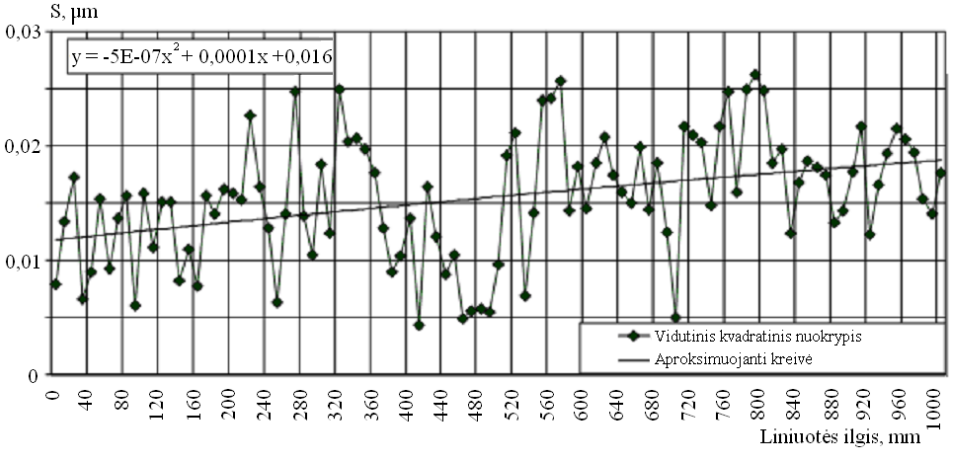
Skalė buvo matuojama septynis kartus, du, blogiausias ir geriausias rezultatai, yra atmesti. 4.1–4.3 paveiksluose matome visų penkių matavimų vidurkio kreivę bei standartinių vidutinių nuokrypių kreivę. Nuokrypių vidurkis yra 0,0152 µm. Paskutiniame paveiksle vidutinis kvadratinis nuokrypis yra aproksimuotas antro laipsnio algebriniu polinomu.



4.1 pav. Etaloninės skalės Nr. 87-0226 5 matavimų paklaidų kreivės
Fig. 4.1. Values of five calibrations of standart scale Nr. 87-0226



4.2 pav. Etaloninės skalės Nr. 87-0226 5 matavimų vidurkio paklaidų kreivė
Fig. 4.2. Average value of five calibrations of standart scale Nr. 87-0226



4.3 pav. Etaloninės skalės Nr. 87–0226 5 matavimų vidutinio kvadratinio nuokrypio paklaidų kreivė
Fig. 4.3. Standart deviation value of five calibrations of standart scale Nr. 87–0226

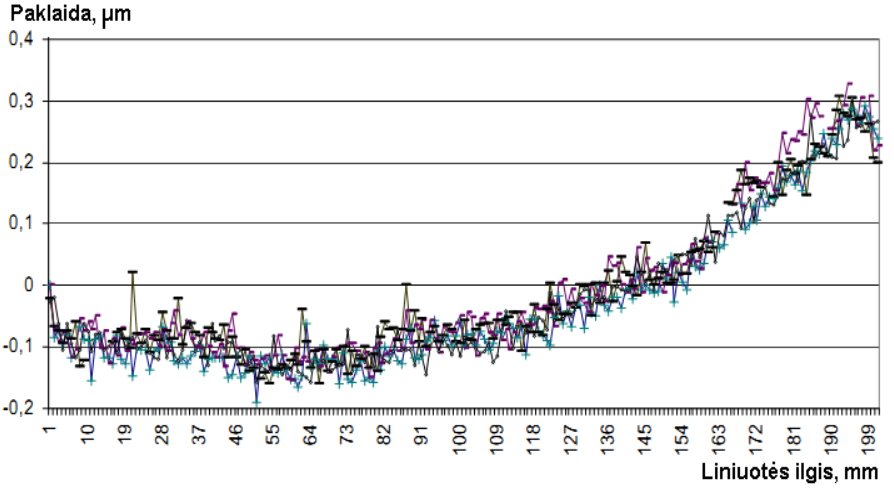
Kalibruota taip pat PTB etaloninė skalė Nr. 6-330-457. Skalė pagaminta iš Zerodur stiklo keramikos 1996 metais. Skalės geometriniai matmenys: ilgis – 200 mm, plotis – 20 mm, aukštis – 14 mm. Skalės temperatūrinio plėtimosi koeficientas yra $\pm 0{,}1\times10^{-6}$ K^{-1}. Ant skaidraus skalės paviršiaus kas milimetrą suformuoti siauri (apie 2,5 µm) chromo brūkšniai su dviem ištisinėmis centravimo linijomis.

Ant skalės temperatūros jutikliai neklijuojami. Prieš atliekant matavimus skalė paguldoma ant granito plokštumos. Jos padėtis matavimo kryptimi tiksliai nustatoma naudojantis ant skalės esančiomis centravimo linijomis. Mikroskopo aukštis derinamas pagal vaizdo ryškumą. Skalės brūkšnelio ilgis yra didesnis nei kameros fiksuojamas vaizdo aukštis. Tyrimo metu skalė buvo matuojama 200 mm ribose, 1 mm žingsniu. Atlikus matavimą gauname 201 matavimo reikšmę.

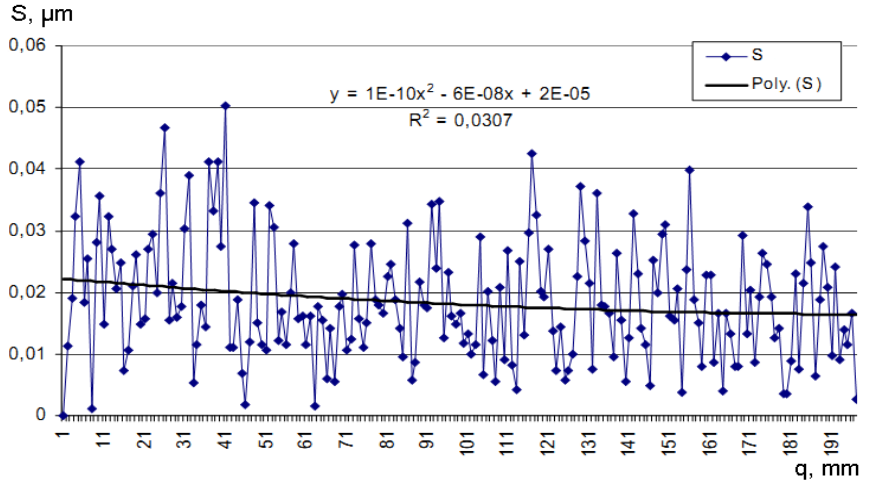
Lazerinio inteferometro spindulio bangos ilgio kompensacijai naudojami 4 jutikliai oro temperatūrai matuoti. Kalibravimo metu fiksuojamas temperatūros, slėgio ar drėgmės pokytis ir pagal Edleno formulę perskaičiuojamas oro lūžio koeficientas, o vėliau interferometro lazerio bangos ilgis kalibravimo erdvėje. Šio kalibravimo metu oro temperatūra svyravo nuo 19,859 °C iki 19,926 °C, slėgis nuo 748,9 iki 751,6 Hg/mm, santykinė oro drėgmė nuo 55,7 % iki 57,2%. Kalibravimo darbinis greitis buvo 0,8 mm/s, kameros ekspozicijos laikas 17 µs. Vieno matavimo trukmė 8 minutės 52 sekundės. Skalė buvo matuojama paguldžius ant atramėlių Beselio taškuose. Mikroskopo objektyvo didinimas 50×.

Buvo matuojama septynis kartus. Du, blogiausias ir geriausias vidurkio atžvilgiu, rezultatai yra atmesti. 4.4 paveiksluose matome penkių matavimų reikšmes (a), standartinių vidutinių nuokrypių kreivę (b). Nuokrypių vidutinė reikšmė lygi 0,018 µm.

Paskutiniame paveiksle vidutinis kvadratinis nuokrypis yra aproksimuotas antro laipsnio algebriniu polinomu.



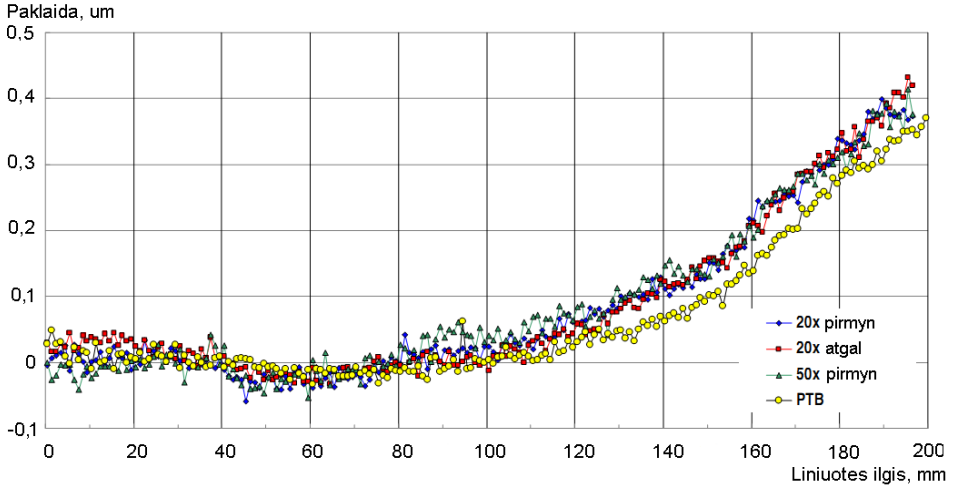
a)



b)

4.4 pav. a) PTB etaloninės skalės penkių matavimų paklaidų kreivės
b) šių matavimų vidutinis kvadratinis nuokrypis
Fig. 4.4. a) value of five calibrations of standart scale PTB
b) standart deviation value of five calibrations

4.5 paveiksle pateikti kalibravimų skirtingais objektyvais ir kryptimis rezultatai. Šios kreivės, tai penkių matavimų vidurkio kreivės, kalibruojant su 20× objektyvu skalės brūkšnių žymėjimo didėjimo ir mažėjimo tvarka bei 50× objektyvu – didėjimo tvarka. Tai pat pateikti šios skalės kalibravimo duomenys PTB komparatoriumi.



4.5 pav. Etaloninės skalės Nr. 6–330–457 tarplaboratorinio palyginimo rezultatai
Fig. 4.5. Intercomparison values of standard scale Nr. 6–330–457

Atlikti palyginamieji precizinės PTB skalės matavimai leido nustatyti skalės kokybės įtaką pasikartojamumo paklaidai ir pasiekti 30 nm eilės vidutinio standartinio linijos detektavimo nuokrypio reikšmes, naudojant 20× objektyvą ir 18 nm, naudojant 50× objektyvą. PTB skalės kalibravimo naujuoju komparatoriumi ir PTB nanokomparatoriumi duomenų palyginimas leidžia pagrįstai teigti, kad tarplaboratorinio palyginimo rezultatų skirtumas neviršija 50 nm.

Naudojant aukštos kokybės skales, sumažėja skalės įnešama dedamoji į pasikartojamumo paklaidą, ir tai palengvina kitų dedamųjų įtakos ir sumažinimo galimybių tyrimą. Šio tyrimo metu buvo atskleista linijos detektavimo programos algoritmo įtaka detektavimo paklaidai.

Bendrosios išvados

1. Atlikus literatūros apie brūkšnių krašto radimo būdus analizę ir atsižvelgus į įrangos technines galimybes, sukurtas originalus brūkšnių krašto radimo metodas. Parinkti sprendimai ir sukurta programinė įranga įgalina pasiekti dinaminio precizinių matų kalibravimo išplėstosios neapibrėžties įvertį 0,04+0,25 L µm, esant aprėpties koeficientui 2,1.

2. Išnagrinėjus komparatoriaus konstrukciją ir ištyrus brūkšnio detektavimo procesą, nustatyta, kad brūkšninių ilgio matų dinaminio kalibravimo rezultatų neapibrėžties komponentės susijusios su skaitmeninio vaizdo iškraipymais dėl judesio. Minimali brūkšninių matų paklaidos reikšmė gaunama optimizavus karietėlės greičio, skalės apšvietimo, kameros ekspozicijos ir jos vėlinimo parametrus.

3. Sukurto subpikselinio vaizdo poslinkio įvertinimo metodo tyrimo rezultatai parodė, kad triukšmo energijai viršijus daugiau nei 50% vaizdo energijos, įvertinti detektavimo paklaidą įtakojantį poslinkį šiuo metodu neįmanoma. Poslinkis taip pat nenustatomas, jei jo dydis mažesnis nei 0,3 pikselio. Poslinkiui didėjant, jo įvertinimo tikslumas didėja.

4. Atlikus lazerinės spinduliuotės šaltinio ir mikroskopo kamerą supančių temperatūrinių laukų tyrimus, nustatyti jų gradientai ir poveikis kalibravimo tikslumui. Įdiegus originalią lazerio skleidžiamos šilumos pašalinimo sistemą,

sumažėjo intensyvios šiluminės spinduliuotės šaltinių poveikis kalibravimo tikslumui, temperatūriniai gradientai erdvėje ir laike įgavo monotoninį pobūdį.

5. Sudarius kameros mikroskopo modelį baigtinių elementų metodu ir jį ištyrus, rasta, kad dėl kameros tiesioginio temperatūrinio poveikio termiškai deformuojasi mikroskopo korpusas, mikroskopą ir lazerinį interferometrą jungiantys elementai bei atsiranda mikroskope suformuoto skalės vaizdo poslinkiai, pasireiškiantys kaip kalibravimo paklaidos sandai. Dėl terminio CCD kameros poveikio atsirandanti kalibravimo paklaida turi atsitiktinį pobūdį. Tyrinėtai konstrukcijai šios paklaidos įverčio lauko sklaida +/-0,23 μm, esant aprėpties koeficientui 2,1.

6. Tiesaus judesio geometrinių paklaidų tyrimo rezultatai leidžia teigti, kad didžiausią paklaidą lemia kampiniai svyravimai plokštumoje, lygiagrečioje kalibruojamajai skalei apie ašį, statmeną pagrindinio judesio ašiai. Ilgesnių nei 1 m poslinkių kampinių paklaidų kompensacijai rekomenduojama statistinė šių paklaidų įvertinimo metodika, trumpesnių – aktyvioji.

7. Palyginamieji tarplaboratoriniai precizinės brūkšninės skalės matavimai, atlikti PTB (Physikalisch-technische Bundesanstalt) ir sukurtu UAB „Precizika Metrology“ komparatoriais, parodė, kad rezultatų skirtumas neviršija 50 nm.

Literatūra ir šaltiniai

Acton, S. T.; Bovik, A. C. 2005. Basic linear filtering with application image enhancement, in *The Handbook of Image and Video Processing*, Second Edition, 99–108.

Agilent Technologies. 2002. Accuracy and Repeatability, *Laser User's Manual*. 1:1–58 p. p/n 05517-9014.

Allebach, J. P. 2000. *Image Scanning, Sampling, and Interpolation*, Handbook of Image and Video Processing, 2nd edition, A. Bovik, editor, Academic Press, 629–643 p. 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,* 33–38 p. ISSN 1822-2591.

Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Kojelavičius, P.; Šukys, A. 2008. Compensating Accuracy of ABBE Errors of Linear Laser Calibrator, in *Proceedings of 13th International Conference. Mechanika, 2008.* 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. 23–35 p.

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, in *The Handbook of Image and Video Processing*, Second Edition, New York: Academic Press, 57–72 p.

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. ISBN 978-952-214-412-6, ISSN 1456-4491.

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

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, KTU, Kaunas.

Cho, T. S.; Levin, A.; Durand, F.; Freeman, W. T. 2010. Motion blur removal with orthogonal parabolic exposures, *IEEE International Conf. on Computational Photography (ICCP).*

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. 2–79 p.

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, im *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.

Flügge, J.; Köning, R. Bosse, H. 2005. Characterising the performance of the PTB line scale interferometer measuring photoelectric encoders, in *Proc. SPIE, Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements,* 5879: 08-1 – 08-9

Flügge, J.; Schuster, H. J. 1993. A high precision temperature measurement system with Pt 100 for precision engineering, in *PTB Bericht F–17: Temperature Measurements in Dimensional Metrology*.

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

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 edition, 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, KTU, Kaunas.

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, *Mechanika 2009: Proceedings of the 14th International Conference*. 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 p..

Kaiser, G.; Schneide, W. 2006. Estimation of sensor point spread functions by spatial subpixel analysis*, ISPRS Commission VII Mid-term Symposium „Remote Sensing: From Pixels to Processes"*.

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 Optics*, 36: 8909-8918.

Kasparaitis, A.; Skirmantas, R. 1991. Estimation of Temperature Variations during Definition of CMM Errors, *Machine Building,* 22–53 p. (in Lithuanian)

Kasparaitis, A.; Vekteris, V.; Kilikevichius, A. 2006. A Vibration Source in Comparator, *Seventh International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques*, *Proc. of SPIE*, 6345, 6345O-1.

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

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, 195–199 p. 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, 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, VGTU, Vilnius.

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. *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. *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*, 2007, Article ID 68985, 8 p., 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 films on transparent substrates, *Proceedings of SPIE*, 67320C, 6732 p.

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

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, *IEE Proceedings Visual Image Signal Processing*, 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, *Progress in Precision Engineering and Nanotechnology, 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.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Lazdinas, R. 2008. Analysis of Dynamic Method of Line Scales Detection, *Solid State Phenomena* Vols. 147–149: p. 576–581. ISSN 1662-9779 (Web of Knowledge).

Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Lazdinas, R. 2009. Analysis of estimation and compensation of angular errors of linear motion, *Mechanika* 5(79), p. 52–58. ISSN 1392-1207 (ISI Web of Science).

Barauskas, R.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Lazdinas R. 2011. Temperature fields, exchanges and deformations of a precise length comparator microscope, *Mechanika* 3(89), p. 279–283. ISSN 1392-1207 (ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Lazdinas, R. 2007. Dynamic method of grating scale calibration by photosensitive cell matrix, in *8th International workshop on Research And Education In Mechatronics*: *Tallinn, Estonia,* 305–307. ISBN 9789985597071 (*ISI* Proceedings).

Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Lazdinas, R. 2008. Analysis of the dynamic method of line scale detection parameters, In *9th International workshop on Research And Education in Mechatronics: Bergamo, Italy*. ISBN 88-88412-33-6 (*ISI* Proceedings).

Barakauskas, A.; Kasparaitis, A.; Lazdinas R. 2010. Influence of line scale contamination and defects upon calibration uncertainty in dynamic mode, in *15th International Conference „Mechanika 2010", Vilnius,* 30–35. ISSN 1822-2951 (*ISI* Proceedings).

Barakauskas, A.; Lazdinas, R.; Snukiškis, T. 2011. An experimental investigation of temperature fields of heat sources on length comparator**,** in *proceedings of 16th International Conference „Mechanika 2011", Kaunas*. ISSN 1822-2951 (*ISI* Proceedings).

Prielaidas, A.; Lazdinas, R. 2010. Experimental determination of systematic errors of precision angle measurers, in *Proceedings of the XIII Conference of Lithuanian Young Scientists „Science – Future of Lithuania", held in Vilnius on 8–9 April, 2010. Mechanical Technologies.* [13-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos Ateitis" 2010 metų teminės konferencijos Mechanika, Mechanical Technologies (2010 m. balandžio 8–9 d.), straipsnių rinkinys CD]. Vilnius: Technika, 3(5):1–4. ISBN 978-9955-28-560-1.

Bardauskas, K.; Lazdinas, R.; Snukiškis T. 2011. Rastrų formavimo įrenginio modernizacija ir tyrimas, in *Proceedings of the XIV Conference of Lithuanian Young Scientists „Science – Future of Lithuania", held in Vilnius on 22 April, 2010. Mechanical Technologies.* [14-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos Ateitis" 2011 metų teminės konferencijos Mechanika, Mechanical Technologies, (2011 m. balandžio 22 d.), straipsnių rinkinys CD]. Vilnius: Technika. ISBN 978-9955-28-836-7.

Čižiūnas, A.; Lazdinas, R. 2008. Brūkšninio ilgio mato kalibratoriaus temperatūros gradiento tyrimo metodika ir priemonės, in *Proceedings of the XI Conference of Lithuanian Young Scientists „Science – Future of Lithuania", held in Vilnius on 24–25 April, 2008. Mechanic.* [11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos Ateitis" 2008 metų teminės konferencijos Mechanika, Medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba (2008 m. balandžio 24–25 d.), straipsnių rinkinys]. Vilnius: Technika. ISBN 978-9955-28-373-7.

Rimantas LAZDINAS

PRECIZINIŲ BRŪKŠNINIŲ ILGIO MATŲ KALIBRAVIMO PAKLAIDŲ TYRIMAS ĮTERPTINĖS METROLOGIJOS SĄLYGOMIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Matavimų inžinerija (10T)

INVESTIGATION OF CALIBRATION ERRORS OF PRECISE GRADUATED LENGTH GAUGES UNDER EMBEDDED METROLOGY CONDITIONS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Measurement Engineering (10T)

2011 12 23. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika",
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
http://leidykla.vgtu.lt
Spausdino UAB „Ciklonas"
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius