

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Donatas REKUS

NIVELIAVIMO MATUOKLIŲ SKALIŲ FOTOMETRINIS KALIBRAVIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MATAVIMŲ INŽINERIJA (10T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2006–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Vladislovas Česlovas AKSAMITAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T)

Mokslinis konsultantas

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

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 1841-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-762-9

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2010

© Donatas, Rekus, 2010

donatasrekus@yahoo.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Donatas REKUS

PHOTOMETRIC CALIBRATION OF LEVELLING STAFFS SCALES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MEASUREMENT ENGINEERING (10T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2010.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Vladislovas Česlovas AKSAMITAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T).

Scientific Consultant

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

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties tikslumo nustatymas. Pateikiami teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai.

Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti fotometrinių niveliavimo matuoklių skalių žymų briaunų kalibravimo būdą bei ištirti jo tikslumą ir panaudojimo galimybes. Tyrimų objektas – niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties tikslumo nustatymas.

Siekiant įgyvendinti tyrimų tikslą, išspręsti šie uždaviniai: 1) atlikta mokslinės literatūros apie interferometrinių horizontalių ir vertikalinių komparatorių konstrukcijos, veikimo principo analizė; 2) išanalizuoti ir teoriškai pagrįsti skaitmeninių niveliacijos matuoklių vaizdų apdorojimo būdai; 3) sukurtas fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų kalibravimo būdas pagrįstas niveliavimo matuoklių skalių vaizdų aprašymu skaitmenine forma; 4) atliktas fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių padėties nustatymo būdo patikimumo įvertinimas, kontrolinius matavimus atliekus optiniu mikroskopu; 5) atlikta palyginamji fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties tikslumo nustatymo analizė su kalibravimo rezultatais gautais sertifikuotose geodezijos kalibravimo laboratorijose bei niveliavimo matuoklių gamintojų duomenimis.

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

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose disertacijos tema bei disertacijos struktūra.

Pirmame skyriuje analizuojami kodinių skalių duomenų apdorojimo metodai skaitmeniniuose nivelyuose, kodinių niveliavimo matuoklių kalibravimo vertikalūs bei horizontalūs komparatoriai.

Antrajame skyriuje pateikta kodinių niveliavimo matuoklių skalių analizė skaitmenine forma.

Trečiajame skyriuje analizuojamas fotometrinis kodinių niveliavimo matuoklių skalių kalibravimo būdas.

Disertacijos tema yra skaityta 14 pranešimų Lietuvos bei užsienio konferencijose, atspausdinti 11 mokslinių straipsnių: du – Lietuvos mokslo tarybos patvirtinto sąrašo tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose; vienas – įtrauktuose į ISI Web of Science sąrašą; keturi – mokslinės informacijos instituto (ISI) referuojamuose leidiniuose, keturi – respublikinių konferencijų medžiagose. Užpatentuotas 1 išradimas.

Abstract

The thesis presents the the accuracy of the position of the tags for the levelling staff's scales.

The aim of the work is to compile the new calibration method to be applied for the levelling staffs and to simplify the calibration appliances as well as the calibration process itself.

The following tasks are necessary to be solved in order to reach the aim of the investigation: 1) to analyse scientific publications regarding the structure, principle of operation on the interferometrical horizontal and vertical comparators; 2) to analyze and theoretically justify the selected digital techniques meant for the processing of the images received by the levelling staff's; 3) to derive the technique meant for the tags calibration of the photometric levelling staff's scales and based on the descriptions of the images of the levelling staff's scales and to be supplied in a digital form; 4) to perform the assessment of the reliability of the technique chosen to be performed in determining the position of the photometric levelling staff's scales the pilot measurements have to be executed by means of the optical microscope; 5) to execute the comparative analysis to determine the accuracy of the position of the tags on the photometric levelling staff's scales when compared with the results derived in the certified geodetic calibration laboratories as well as compare with the results submitted by the manufacturers of the levelling staff's.

The work consists of introduction, three chapters, conclusions, references, list of authors scientific publications, three appendixes.

Introduction presents the themes of the research, the relevance of the work, the objective of the research, the aims and tasks, the methodology chosen, the scientific novelty of the work, practical significance of the results and the defensive arguments.

The first chapter includes the analysis of the methods of processing of the data of the coded scales in the digital levels, vertical and horizontal comparators of the coded levelling staffs.

The second chapter submits the analysis made in a digital form on the scales of coded levelling staffs.

The third chapter analyses the methods of calibration of photometric coded levelling staff scales.

The topic of dissertation is 11 printed scientific articles, 1 invention patented: two included in the journals published in the list of international database by Lithuanian Council of Science; one is included in the list Web of science of; four – in the journals published by scientific information institute (ISI), four – in the materials of republican conferences. The invention has been patented.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	5
 1. SKAITMENINIŲ NIVELIAVIMO PRIETAISŲ TOBULINIMO RAIDOS BEI TIKSLUMO TYRIMŲ ANALIZĖ	 7
1.1. Skaitmeninių nivelių bei kodinių niveliavimo matuoklių modelių ypatumai ...	7
1.2. Skaitmeninių nivelių signalo analizė ir apdorojimas	14
1.3. Skaitmeninių nivelių bei kodinių matuoklių kalibravimas.....	21
1.4. Briaunų detektavimo operatoriai	29
1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	32

2. NIVELIAVIMO MATUOKLIŲ SKALIŲ APRAŠYMAS SKAITMENINE FORMA	35
2.1. Išradimo patentas LT 5559 B „Niveliavimo matuoklių brūkšnių padėties tikslumo kalibravimo įrenginys“	36
2.1.1. Išradimo prototipas	36
2.1.2. Išradimo aprašymas	38
2.2. Skaitmeninių vaizdų savybės	41
2.3. Skaitmeninė ir spalvinė niveliavimo matuoklių skalių žymų aprašymo forma	43
2.3. Antrojo skyriaus išvados	53
3. FOTOMETRINIS NIVELIAVIMO MATUOKLIŲ SKALIŲ ŽYMŲ PADĖTIES KALIBRAVIMAS	55
3.1. Niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties fotometriniu kalibravimu ir tikslumo tyrimas	55
3.2. Fotometriniu kalibravimo būdo tikslumo palyginimas su kalibravimo laboratorijų rezultatais	63
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	70
BENDROSIOS IŠVADOS	71
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	72
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	78
PRIEDAI	81
A priedas. Fotometriniu niveliavimo matuoklių skalių žymų briaunų kalibravimo programos PIKSELIS tekstas	81
B priedas. Išradimo patentas LT 5559 B „Niveliavimo matuoklių brūkšnių padėties tikslumo kalibravimo įrenginys.....	101
C priedas. Kodinių skalių žymų briaunų matavimų rezultatai.....	103

Contents

INTRODUCTION	1
Topicality of the problem	1
Actuality of research	2
Objective of research.....	2
Aim of research	2
Task of research	2
Methodology of research	3
Scientific novelty	3
Practical value	3
Defended propositions	4
Approval of research	4
Structure of research	5
 1. ANALYSIS OF DEVELOPMENT AND ACCURACY ANALYSIS OF DIGITAL LEVELLING DEVICES IMPROVEMENT	 7
1.1. Digital levels and coded levelling staffs model features	7
1.2. Digital levels signal analysis and processing.....	14
1.3. Digital levels and coded levelling staffs calibration.....	21
1.4. Edge detections operators	29
1.5. Conclusions of chapter 1 and formulation of tasks for research	32

2. DESCRIPTION OF LEVELLING STAFFS SCALES IN DIGITAL FORMAT	35
2.1. Invention patent LT 5559 B „Calibration device of levelling staffs scales tags accuracy“	36
2.1.1. Patent prototype	36
2.1.2. Patent description	38
2.2. The properties of digital images	41
2.3. Digital and color description form of levelling staffs scales tag	43
2.3. Conclusion of chapter 2	53
3. PHOTOMETRIC CALIBRATION OF LEVELLING STAFFS SCALES TAGS ..	55
3.1. Photometric calibration of levelling staffs scales tags and accuracy research...	55
3.2. Comparison of photometric calibration method accuracy with the results of the calibration laboratories	63
3.3. Conclusion of chapter 3	70
GENERAL CONCLUSIONS	71
REFERENCES	72
LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	78
APPENDIXES	80
Appendix A. The text of program of photometric calibration of levelling staffs scales tags	81
Appendix B. Invention patent LT 5559 B „Calibration device of levelling staffs grades positioning accuracy“	101
Appendix C. The results of coded scales measures	103

Ivadas

Problemos formulavimas

Tobulėjant šiuolaikinei geodezinei matavimų technikai, skaitmeniniuose nivelyruose įmontuotas mikroprocesorius pagal pasirinktą programą fiksuoja niveliavimo matuoklių atskaitas ir veiksmų seką, tokiu būdu 100% eliminuodamas darbus atliekančio matuotojo asmenines paklaidas. Tačiau atsiranda kitų paklaidų šaltinių, kuriuos būtina ištirti papildomai. Tai gali būti kodinių matuoklių skalių žymų paklaidos. Jos gali būti gamyklinės ir susijusios su matuoklių eksploatavimo sąlygomis. Dirbant lauko sąlygomis jas veikia drėgmė, staigūs temperatūros pokyčiai, intensyvi saulės radiacija, mechaniniai smūgiai bei apkrovos. Dėl šių priežasčių niveliavimo matuoklės turi būti periodiškai kalibruojamos.

Šiuo metu naudojami niveliacijos matuoklių kalibravimo interferometriniai įrenginiai sudėtingi, brangūs, didelių matmenų, ilgai trunkantis kalibravimo procesas.

Darbo aktualumas

Niveliavimo rezultatai gaunami su neišvengiamomis paklaidomis, kurios gali priklausyti nuo naudojamų prietaisų, nuo aplinkos poveikio arba niveliuotojo. Siekiant gauti patikimus matavimų rezultatus prietaisus reikia kalibruoti. Niveliavimo matuoklių kalibravimo tobulinimui reikalingi nauji kalibravimo būdai, lanksčiomis skaitmeninėmis technologijomis pagrįsta kalibravimo įranga, nesudėtinga kalibravimo darbų technologija. Tai užtikrintų savalaikę niveliavimo matuoklių kokybės kontrolę, leistų kontroliuoti ir eliminuoti sistemingasias niveliavimo paklaidas, priklausančias nuo matuoklių skalių padalų netikslumų.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties tikslumo nustatymas.

Darbo tikslas

Sukurti naują niveliavimo matuoklių kalibravimo būdą, supaprastinti kalibravimo įrangą ir kalibravimo procesą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti mokslinės literatūros apie interferometrinių horizontaliųjų ir vertikalųjų komparatorių konstrukciją, veikimo principo analizę.
2. Išanalizuoti ir teoriškai pagrįsti skaitmeninius niveliacijos matuoklių vaizdų apdorojimo būdus.
3. Sukurti fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų kalibravimo būdą pagrįstą niveliavimo matuoklių skalių vaizdų aprašymu skaitmenine forma.
4. Atlikti fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių padėties nustatymo būdo patikimumo įvertinimą, kontrolinius matavimus atliekant optiniu mikroskopu.

5. Atlikti palyginamąją fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties tikslumo nustatymo analizę su kalibravimo rezultatais gautais sertifikuotose geodezijos kalibravimo laboratorijose bei niveliavimo matuoklių gamintojų duomenimis.

Tyrimų metodika

Darbe naudoti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, taikant skaitmeninių vaizdų apdorojimo ir analizės principus, atliekant palyginamuosius niveliavimo matuoklių žymų padėties matavimus bei taikant matematinę statistinę analizę niveliavimo matuoklių skaitmeninių vaizdų vertėms palyginti.

Darbo mokslinis naujumas

Tyrimų metu buvo gauti šie nauji rezultatai:

1. Sukurtas fotometrinis niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties kalibravimo būdas, pagrįstas bendru etaloninės ir kalibruojamos matuoklių skalių žymų briaunų skaitmeninių fotovaizdų koreliacine analize.
2. Disertacijos tyrimų pagrindu gautas išradimo patentas.
3. Sukurta metodika, leidžianti niveliacijos matuoklių skalių žymų padėties skaitmeninių nuotraukų pikselių reikšmėms suteikti skaitines vertes.
4. Fotometrinio niveliavimo matuoklių žymų padėties kalibravimo būdo tikslumo analizės rezultatai, kurie pagrindžia fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų briaunų padėties nustatymo būdo praktinio taikymo galimybes.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Taikant parengtą fotometrinį niveliavimo matuoklių kalibravimo būdą yra žymiai supaprastinamas niveliavimo matuoklių kalibravimo procesas, jis tampa pigesnis, užimantis mažiau laiko ir darbo sąnaudų, lyginant su kitais šiuo metu taikomais kalibravimo būdais.

Ginamieji teiginiai

1. Naujas fotometrinis niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties kalibravimo būdas, pagrįstas bendru etaloninės ir kalibruojamos matuoklių skalių žymų briaunų skaitmeninių fotovaizdų koreliacine analize.
2. Sukurta metodika leidžianti niveliacijos matuoklių skalių žymų padėties skaitmeninių nuotraukų pikselių reikšmėms suteikti skaitines vertes.
3. Sukurto naujo niveliacijos matuoklių kalibravimo būdo praktinio taikymo galimybių pagrindimas, remiantis atliktų eksperimentų tikslumo matavimų rezultatų analize.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 11 mokslinių straipsnių, užpatentuotas 1 išradimas: du – Lietuvos mokslo tarybos patvirtinto sąrašo tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose (Aksamitauskas *et al.* 2009; Giniotis *et al.* 2007); vienas – įtrauktuose į Web of Science (Aksamitauskas, Rekus 2010); keturi – mokslinės informacijos instituto (ISI) referuojamuose leidiniuose (Aksamitauskas *et al.* 2010, Rekus *et al.* 2008, Giniotis *et al.* 2008, Aksamitauskas *et al.* 2005), keturi – respublikinių konferencijų medžiagose (Rekus 2006; Rekus 2007; Rekus, Aksamitauskas 2008; Rekus 2009). Užpatentuotas išradimas (Giniotis *et al.* 2009).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti trylikoje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje:

- Tarptautinėse mokslinėse konferencijose: „*Modern building materials, Structures and techniques*“ 2007, 2010 m., Vilniuje.
- Tarptautinėje konferencijoje: „*Environmental Engineering*“ 2008 m. Vilniuje.
- Tarptautinėje konferencijoje „*25th Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2008*“ 2008 m., Vilniuje.
- Dalyvauta Swiss Baltic Net tarptautiniame projekte GRS-011/06: 2007 09 10-14 d. dalyvauta 2-oje Swiss-Baltic Geodezijos mokslo savaitėje (seminare), Nida.
- 2007 m. liepos 8–14 dienomis stažuotės metu Ciuricho Federaliniame technologijos universitete (Šveicarijoje) dalyvauta 8-oje tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „*Optical 3-D measurement techniques*“.

- Respublikinėje mokslinėje studentų, magistrantų, doktorantų, jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Statyba ir architektūra*“ 2008 m., Kaunas.
- Respublikinėse mokslo konferencijose „*Civilinė inžinerija ir geodezija*“ 2006, 2007, 2008, 2009 m., Vilniuje.
- Respublikinėse mokslinėse – praktinėse konferencijose „*Matavimų inžinerija ir GIS*“ 2007, 2009, 2010 m., Kaune.

Stažuotės užsienyje:

- Stažuotė pagal Leonardo da Vinci programą: „Geografinės informacijos specialistų mokymo ir profesinio tobulinimosi strategijos formavimas žinių visuomenės plėtrai“. Amsterdamas, Olandija, 2007.
- Stažuotė Ciuricho Federaliniame technologijos universitete (Šveicarijoje) 2007 m.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas, trys priedai.

Darbo apimtis 109 puslapiai su priedais, tekste panaudotos 26 formulės, 38 paveikslai ir 8 lentelės. Rašant disertaciją naudotasi 101 literatūros šaltiniu.

Skaitmeninių niveliavimo prietaisų tobulinimo raidos bei tikslumo tyrimų analizė

Skyriuje analizuojama mokslinė literatūra apie preciziam niveliavimui naudojamus skaitmeninius nivelyrus, jų tipus, charakteristikas ir veikimo principus, taip pat išanalizuoti naudojamų kodinių matuoklių tipai su kiekvieno gamintojo naudojamomis kodinėmis skalėmis bei jų techninėmis charakteristikomis. Apžvelgti kodinių skalių duomenų apdorojimo metodai skaitmeniniuose nivelyruose. Taip pat apžvelgta mokslinė literatūra apie kodinių niveliavimo matuoklių kalibravimo vertikalius bei horizontalius komparatorius bei gaunami kalibravimo rezultatai.

1.1. Skaitmeninių nivelyrų bei kodinių niveliavimo matuoklių modelių ypatumai

Nuo 19 amžiaus aukščiams matuoti naudojami optiniai – mechaniniai nivelyrai, o šio amžiaus antroje pusėje šie prietaisai buvo pradėti automatizuoti (Schlemmer 1987). Taškų aukščių nustatymo geometriniu niveliavimu automati-

zavimas vyko sunkiausiai ir lėčiausiai. Tik 1960–1970 m. sukurti nivelyrai su kompensatoriais, o nuo 1974 m. Skandinavijos šalys pradėjo motorizuotą niveliavimą (Takalo 1996, 1997).

Nuo 1966 m. Oberkochene buvo pradedami gaminti nivelyrai Ni22 (1966), Ni20 (1972) ir Ni3 (1980). Juos visus sieja tai, kad jie yra patobulinta nivelyro Ni2, pagaminto 1950 m. versija. Šio prietaiso pagrindas yra švytuoklinis kompensatorius, kuris automatiškai leidžia išlaikyti vizavimo ašies horizontalumą. Dar ir dabar yra populiarūs prietaisai, kurie yra pagaminti Ni2 prietaiso pagrindu. Nivelyras Ni 2 labai tikslus: vidutinė kvadratinė dvigubo ėjimo matavimo paklaida neviršija 1 mm/km. Pasieltas 50^x žiūrono didinimas, o prietaise buvo įtaisytas mikrometras (Ingensand 1999).

Oberkochene 1980 m. buvo sukurtas automatinis nivelyras Ni4. Jis jau turėjo žymiai daugiau patobulinimų.

1973 m. sukurtas nivelyras Ni002. Jo bazėje buvo sukurti Ni020A, Ni005A, (patobulintas Ni020A su integruotu mikrometru) ir Ni040. Naujų prietaisų gamyba garantavo Carl Zeiss kompanijos egzistavimą ir plėtrą (Anderson *et al.* 1998).

Ni002 greitai iškovojo populiarumą. 1988 metais korporacija Carl Zeiss Jena pristatė naujus išradimus. Tai buvo Ni002A ir Reni002A (Feist 1994, 1995). Prietaisas Ni002A, tai tikslus optinis prietaisas su beveik visomis identiškomis nivelyro Ni002 funkcijomis. To paties tikslumo Reni 002A buvo pirmas žingsnis link pusiau automatinių nivelių ir įžanga į skaitmeninių prietaisų erą. Ši pusiau automatinė technologija vyravo iki 1990 metų, kol Šveicarijos geodezinių prietaisų firma Leica pristatė pasaulyje pirmą savo skaitmeninį nivelyrą NA2000.

Po Antrojo pasaulinio karo esant tuometinei politinei situacijai Vokietijoje egzistavo dvi geodezinius matavimo prietaisus gaminančios kompanijos – Carl Zeiss kompanija Jenoje, Rytų Vokietijoje, ir kita – Oberkochene, Vakarų Vokietijoje. Viena nuo kitos jos skyrėsi tik pardavimo faktūromis, tačiau prietaisų gamybos ir tobulinimo srityse buvo priklausomos viena nuo kitos, nors jų bendradarbiavimo tikrai nebūtum galėjęs pavadinti labai draugišku. 1990 m. pasikeitus politinei situacijai Vokietijoje, minėtos geodezinius prietaisus gaminančios įmonės susijungė ir pasiekė aukštų rezultatų skaitmeninių nivelių kūrimo (Menzel 1999).

Carl Zeiss kompanija toliau tobulino skaitmeninių nivelių gamybą. 1983 – 1985 m. pasirašius sutartį su Drezdeno technologijos universitetu buvo tęsti eksperimentai. 1994 metais buvo išleisti skaitmeniniai nivelyrai DiNi10 ir DiNi20. Čia buvo naudojamas geometrinis pozicinis metodas. Po kelių metų sukurta antros kartos skaitmeninių nivelių DiNi11, DiNi11T ir DiNi21 modeliai, kurie pagreitino matavimus (Feist 1994).

Pastaraisiais metais Carl Zeiss išleido trečios kartos naujus tobulesnius naujo dizaino prietaisus. Tai nivelyrai DiNi12, DiNi12T ir DiNi22 (Takalo 1996, 2002, Krikštaponis 2001, Krikštaponis *et al.* 2005).

Nivelyro Ni002 sėkminga konstrukcija buvo pripažinta geriausia gamybininkų tarpe. Iš pradžių prietaisas nebuvo skirtas motorizuotiems matavimams ir tik po 16 metų profesorius Peskelis iš Drezdeno universiteto patobulintą šį prietaisą pritaikė skaitmeniniams aukščių matavimams.

Pirmąjį pasaulyje skaitmeninį nivelyrą sukūrė Šveicarijos firma Leica 1990 metais. Tai buvo tikslus nivelyras Wild NA2000. 1991 metų pabaigoje išleistas precizinis nivelyras Wild NA3000. Vėliau sukurti antros kartos skaitmeniniai nivelyrai Wild NA2002 ir Wild NA3003. Pastarojo tipo skaitmeniniai nivelyrai buvo naudojami Lietuvoje sudarant vertikalųjį tinklą (Krikštaponis 2001, Krikštaponis *et al.* 2005).

1994 metais Japonijos firma „Topcon“ išleido skaitmeninius nivelyrus DL101 ir DL102. Topcon sistema naudoja fazinį matavimo metodą, kitaip vadinamą EDM. Vėliau gaminti tobulesni nivelyrų tipai DL101C ir DL102C (Becker 1999, Takalo 1994a).

1997 metais japonų firma Sokkia pagamino skaitmeninį nivelyrą SDL30, vienok tikslumo rodikliais jis kol kas netenkina precizinio niveliavimo reikalavimų (Takalo 1994b).

Dabartiniai skaitmeniniai nivelyrai yra daug geresni techninėmis charakteristikomis, programinės įrangos patobulinimais. Jie yra tikslesni, kadangi kompensatorius veikia tiksliau, tačiau matavimo principai ir duomenų analizės algoritmai yra panašūs kaip ir ankstesniuose jų pirmtakuose.

Skaitmeniniai nivelyrai – tai nivelyrai, kuriais visi matavimų rezultatai yra apskaičiuojami elektroniniu būdu. Skaitmeniniais nivelyrais matuojama žymiai greičiau, išvengiant (eliminuoiant) matuotojo klaidų. Labai paprastos matavimų operacijos. Matavimų metu automatiškai skaičiuojamos taškų altitudės ir matavimų rezultatai įrašomi į prietaiso atmintį (Krikštaponis 2001).

Pagrindinės skaitmeninių nivelyrų dalys yra:

- lęšiai;
- fokusavimo lęšio padėties jutiklis;
- kompensatorius su posvyrio davikliu;
- šviesos daliklis;
- kodinės informacijos vaizdo jutiklis – CCD.

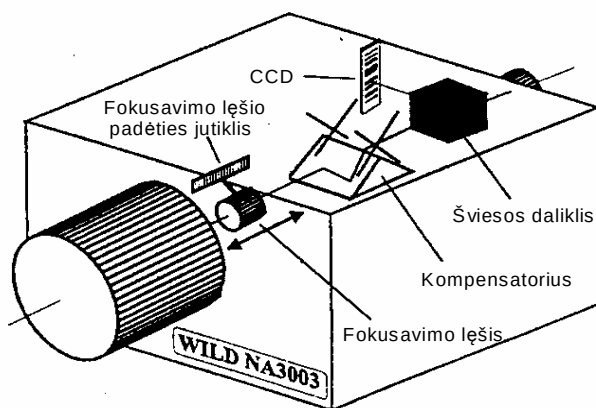
Pagrindinės skaitmeninių nivelyrų dalys parodytos 1.1 paveiksle (Wild NA2002/NA3000 1993, 1994).

Kiekviena skaitmeninius nivelyrus gaminanti firma yra sukūrusi savo kodų sistemą ir duomenų apdorojimo metodus. Šiuo metu yra naudojami trys vaizdo apdorojimo metodai:

- koreliacijos metodas (Leica sistemose);

- geometrinis metodas (Zeiss sistemose);
- fazinis metodas (Topcon sistemose).

Skaitmeninis nivelyras Wild NA2000 visiškai automatinis, kuriuo niveliuojant tereikia nukreipti prietaiso žiūroną į matuoklę, turinčią kodines padalas, ir užfiksuoti rezultatą nuspaudžiant klavišą. Elektroninė sistema apdoroja ir pateikia matuoklės atskaitą ir atstumą. Jie gali būti fiksuojami ir kaupiami elektroninėje laikmenoje. Matavimų trukmė 4 sekundės. Prietaise įmontuotas mikroprocesorius, turintis programas, skirtas matuoklės atskaitoms ir atstumams fiksuoti, trasoms ir plotams niveliuoti, projektiniams aukščiams žymėti bei nivelyrui tikrinti. Galima matuoti ir tradiciniu būdu pagal antroje matuoklės pusėje pažymėtas centimetrines padalas.



1.1 pav. Principinė skaitmeninio nivelyro struktūra

Fig. 1.1. General structure of the digital level

Japonijos firmos Topcon sistema naudoja fazinį matavimo metodą, kaip ir elektrooptiniuose tolimačiuose, kitaip vadinamą EDM (Rueger 2000, Rueger *et al.* 2000). Topcon matuoklėje yra paženklinti 30 mm ilgio kodiniai elementai, kurių kiekvieną sudaro trys šablonai R, A ir B (1.2 pav.).

R yra bazinis šablonas, sudarytas iš padalų trejukės. Atstumas tarp šablonų ašių yra pastovus ir lygus 10 mm. Visi šablonai paskirstyti matuoklėje taip, kad jų pasiskirstymo dažnis priklauso nuo matuoklės atstumo iki nivelyro fokusavimo plokštumos. A ir B šablonų ilgis kinta pagal sinuso funkciją nuo 2 iki 10 mm, kas atitinka 600 mm ir 570 mm bangos ilgius. Todėl tarp šių signalų tolygiai pasiskirstęs per visą matuoklę fazės poslinkis. Matuojant fazės skirtumą tarp A ir B kodų bei R kodo pasikartojimo dažnumą, gaunama tiksli aukščio ir

PCMCIA kortą. Matavimų trukmė su viena įkrauta baterija – 48 valandos. Šiuo metu tiek tikslumu, tiek techninėmis savybėmis Carl Zeiss skaitmeniniai nivelyrai yra vieni geriausių pasaulyje (Takalo 1992, 1994a, 1994b, 1996).

Japonų firmos Sokkia skaitmeninio nivelyro SDL30 atsitiktinis bidirekcinis (RAB) kodas sudarytas iš šešių skirtingo ilgio kodų, kurių kiekvienas yra susijęs su 16 mm ilgio baziniu elementu. Kiekvienas iš kodų atpažįstamas pagal tokių ryšį: 1=4:12, 2=6:10, 3=8:8, 4=10:6 ir 5=12:4. 0 kodas būtinas, kuris naudojamas tik trumpiems atstumams yra pažymėtas baltomis linijomis juodame fone. Pagal Šveicarijos mokslininkų tyrimus nivelyrai sėkmingai veikia naudojant tik 8 cm ilgio kodinės matuoklės atkarpą.

Kai 1990 m. Leica sukūrė NA2000, tai buvo pirmasis sėkmingas vienos dimensijos matuoklės skaitmeninio vaizdo apdorojimas. Vietoj stebėtojo akie panaudotas vaizdo jutiklis. Šiuo atveju skaitmeninis nivelyras atitinka vaizdo jutiklį, esant stabilizuotai vizavimo linijai. CCD jutiklis atpažįsta koduotas matuoklės padalas ir jas panaudoja signalo vaizdo sudarymui, kurį skaitmeninis nivelyras analizuoja koreliacijos būdu. Analitinės procedūros metu yra apskaičiuojama matuoklės atskaita ir atstumas iki matuoklės (Leica Geosystems 1993, 1994).

Niveliavimo tikslumui taip pat labai daug įtakos turi naudojamų matuoklių tipas. Matuoklių tipo pasirinkimą sąlygoja matuoklių ilgis, jų medžiaga ir metrologiniai parametrai.

Kodinės niveliavimo matuoklės visų tipų skaitmeniniams nivelyrams gamina Vokietijos kompanija NEDO (Takalo 1996).

Matuoklių ir skalių techninės charakteristikos pateikiamos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Kodinių matuoklių techninės charakteristikos

Table 1.1. Technical characteristics of coded staffs

Matuoklių tipas	Niveliacinės matuoklės			Skalė	Industrinės invarinės matuoklės		Invarinės niveliacinės matuoklės	
	GNL E4C	GBNL 4C	GKNL4		GWCL92	GWCL 182	GPCL2	GPCL3
Pavadinimas								
Medžiaga	Medis	Aliuminis	Stiklapluošis	Invaris	Inv./ Stikl.	Inv./ Stikl.	Inv./ Stikl.	Inv./ Stikl.
Ilgis, m	4,00	4,00	4,05	0,60	0,92	1,82	1,94	3,00
Transportinis ilgis, m	1,04	1,1	1,6	0,65	0,95	1,85	2,00	3,05
Elementų skaičius	1	4	3	1	1	1	1	1

1.1 lentelės tęsinys

Matuoklių tipas	Niveliacinės matuoklės			Skalė	Industrinės invarinės matuoklės		Invarinės niveliacinės matuoklės	
Pavadinimas	GNLE 4C	GBNL 4C	GKNL4	GWCL60	GWCL92	GWCL 182	GPCL2	GPCL 3
Padalos	Kodas, cm	Kodas, cm,	Kodas, cm	Kodas	Kodas	Kodas	Kodas	Kodas
Padalų plotis, cm	5	5	6	2,5	2,2	2,2	2,2	2,2
Plėtimosi koeficientas, ppm/°C	10–20	24	<10	<1	<1	<1	<1	<1
Atstumų diapazonas, m	1,8–100	1,8–100	1,8–100	1,8–20	1,8–30	1,8–60	1,8–60	1,8–60
Naudojamas ilgis, m	4,0	4,0	4,0	0,4	0,6	1,2	2,0	3,0
Svoris, kg	4,0	3,9	5,0	0,3	1,9	3,2	3,5	4,9

Darbai skaitmeniniais nivelyrais NA2000 ir NA3000 buvo sukurta sekcijinė matuoklė GKNL4 iš trijų 1,35 m ilgio sustumiamų elementų. Tai vartotojui leidžia pasirinkti matuoklės ilgį 1,35 m, 2,70 m arba 4,05 m. Viena matuoklės pusė turi kodines padalas skaitmeniniam niveliavimui, kitoje matuoklės pusėje yra tradicinės padalos (centimetais arba pėdomis). Matuoklės pagamintos iš stipraus stiklo pluošto, kurio plėtimosi koeficientas yra mažesnis nei 10 ppm/°C (1 ppm = 10⁻⁶ m). Sferinių gulsčių padalos vertė yra 17'. Dvi sferinės rankenos padeda laikyti matuoklę stabiliai. Taip pat gaminamos matuoklės su šarnyriniais sekcijų sujungimais: keturių dalių medinės arba aliumininės matuoklės; jos yra 4 m ilgio, bet susilanksto iki 1m ilgio (Takkalo 1996, 1999).

Specialios invarinės matuoklės GPCL2/3 su kodinių brūkšnių padalomis buvo sukurtos preciziniam niveliavimui. Kodinės padalos invaro juostelėje pažymimos naudojant sudėtingą lazerinę įrangą. Kodinė invarinė juostelė susideda iš 64 % geležies, 31 % nikelio ir 5 % kobalto (Ringpfeil, 1985). Atsižvelgiant į invarinio lydinio sudėtį yra gaunamas skirtingas temperatūrinis plėtimosi koeficientas. Remiantis daugiau nei 1000 invarinių kodinių niveliavimo matuoklių kalibravimo rezultatais (Maurer 1994, 1995), nustatyta, kad leistina atskaitos

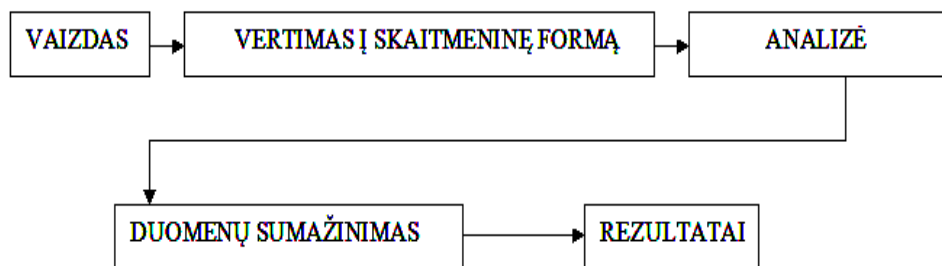
nuokrypa visam matuoklės ilgiui neviršija 0,06 mm. Matuoklės nulio padėties paklaida neviršija $\pm 0,05$ mm (Kahmen *et al* 1998).

Invarinių kodinių matuoklių leistinos gamyklinės tolerancijos nustatytos standartais ISO12858-1 ir DIN18717 $\pm(0,02\text{mm} + 20\text{ppm})$ sutartiniu intervalu, kai temperatūra yra $+20$ °C. Aišku, dabartinės technologijos leidžia gamyklines kodinių skalių paklaidas sumažinti, negu jos yra leistinos pagal standartus. Atsitiktinės kodinių niveliavimo skalių gamyklinės paklaidos yra mažesnės nei $\pm 7\mu\text{m}$ (Fischer 1999).

Be minėtų invarinių matuoklių, dar yra gaminamos trumpesnės 0,92 m ir 1,82 m ilgio vadinamosios pramoninės invarinės matuoklės GWCL92 ir GWCL182, skirtos daugiau vertikalųjų deformacijų stebėjimams. Deformacijų stebėjimui ar kitiems specialioms matavimams gali būti naudojamos 0,60 m ilgio invarinės skalės GWCL60 (Krikštonis 2001).

1.2. Skaitmeninių nivelių signalo analizė ir apdorojimas

1990 m. Šveicarų geodezinius prietaisus gaminanti firma Leica sukūrė skaitmeninį nivelyrą NA2000, tai buvo pirmasis sėkmingas skaitmeninio vaizdo apdorojimas, panaudotas matuoklės vaizdo analizei. Čia detektorius pakeičia matuotojo akį. To pasekoje skaitmeninis nivelyras atitiktų vaizdinį jutiklį (CCD) stabilizuota vizavimo linija (Ingensand 1990).



1.3 pav. Skaitmeninio vaizdo apdorojimo principas
Fig. 1.3. The principle of digital image processing

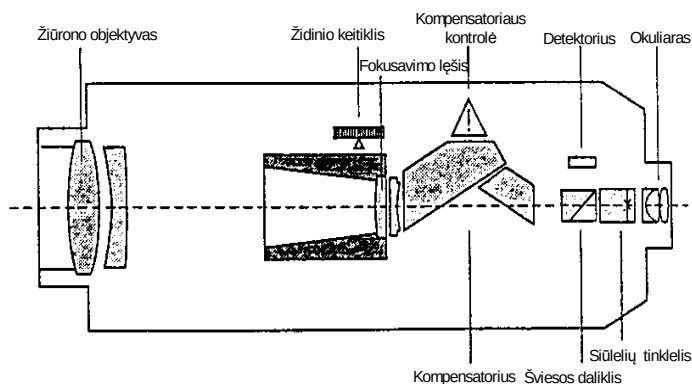
Vaizdinis jutiklis (CCD) (Beyer 1992, Holst 1996) atpažįsta koduotas matuoklės padalas ir jas panaudoja vaizdo signalo sudarymui, kad skaitmeninis

nivelyras jį galėtų analizuoti koreliacijos būdu. Analitinės procedūros metu yra apskaičiuojama matuoklės atskaita ir atstumas iki atitinkamo matuoklės taško (Krikštaponis 2000, Skeivalas *et al.* 1999).

Dirbant skaitmeniniu nivelyru, brūkšninio kodo vaizdas per šviesos pluoštą daliklį patenka į detektoriaus diodų įrenginį (1.4 pav.). Šviesos daliklis dalina šviesos pluoštą į matomą ir infraraudoną komponentus. Matomas komponentas per siūlelių tinklėlį patenka į matuotojo akis, o infraraudonųjų komponentų dalys patenka į detektorių, kuris labiausiai jautrus šviesai infraraudonojoje spektro dalyje. Detektorius, tai 65 mm ilgio įrenginys ir jame kas 25 mikrometrai išdėstyti 256 šviesai jautrūs fotodiodai (pikseliai).

Optinės sistemos kampinis matymo laukas – 2° , mažiausias fokusavimo nuotolis yra 1,8 metro. Tai atitinka 61 mm matuoklės atvaizdą detektoriuje. Didžiausias fokusavimo atstumas yra 100 m, kuriam esant apimamas visas matuoklės ilgis matuoklės ilgis. Židinio atstumo (fokusavimo) keitiklis nustato fokusavimo lęšio padėtį ir tokiu būdu pateikia apytikrio atstumo informaciją koreliacijai. Elektroninis padėties detektorius valdo kompensatoriaus pasvirimą matavimo metu (Gachter *et al.* 1987).

Procesoriaus veikimas yra pagrįstas vienos mikroschemos mikroprocesoriumi. Detektorinis diodo įrenginys verčia gautą kodinių juostų vaizdą į analoginį video signalą.



1.4 pav. Skaitmeninio nivelyro optinė mechaninė konstrukcija

Fig. 1.4. Optical mechanical construction of digital level

Atskaitymo elektronika sustiprina ir paverčia video signalą į skaitmeninę formą, pateikiama 256 pikselių 8 bitų signalu, parodant jį 256 tamsiomis juostomis. Matavimo signalą gauna mikroprocesorius.

Apytikslis atstumas yra apskaičiuojamas pagal fokusavimo lęšio padėtį. Fokusavimo ribos tarp 1,80 m ir 100 m atitinka 14 mm lęšio poslinkį.

Šis atstumas yra pateikiamas tokia formule:

$$d_f = \frac{k}{s}, \quad (1.1)$$

čia: d_f – fokusavimo atstumas;

k – optinė konstanta;

s – fokusavimo lęšio padėtis.

Išanalizuoti matavimo duomenys – tai galutinis rezultatas dviejų eilučių skaitmeniniame ekrane. Skaitmeniniai duomenys ir komandos įvedami klaviatūra esančia prie prietaiso okuliaro. Matavimo klavišas matavimų pradžiai yra šalia fokusavimo sraigto. Visi matavimo duomenys gali būti saugomi REC modulyje (nivelyro atmintyje) arba perduodami į lauko kompiuterį (Ingensand 1999).

Matavimus sudaro tokie etapai:

1. Vizavimas ir fokusavimas (matuotojas).
2. Skaitmeninių matavimų pradžia (matuotojas).
3. Netikslioji koreliacija.
4. Tikslioji koreliacija.

Pirmas skaitmeninio niveliavimo etapas yra toks pats, kaip tradiciniame niveliavime, tai yra matuotojas vizuoja prietaisu į matuoklę ir fokusuoja jos vaizdą. Palietus fokusavimo klavišą prietaisas nustato fokusavimo lęšio padėtį ir stebi kompensatorių. Signalo intensyvumas yra panaudojamas nustatyti laiką, reikalingą kiekvienam pikseliui (vaizdo elemento, taškelio), o po to vyksta brūkšninio kodo vaizdo analizė ir išsaugojimas. Po to seka grubi koreliacija. Šiuo atveju, atstumas gautas pagal fokusavimo lęšio padėtį, yra panaudotas, kaip pradinė reikšmė apytikriam taikinio aukščiui ir vaizdo masteliui nustatyti. Šis procesas trunka apie sekundę.

Ketvirtame etape seka tiksli koreliacija. Prietaiso mikroprocesorius įvertina tikslią padėtį ir brūkšninio kodo mastelį linijiniame detektoriuje (matricoje) bei panaudoja kalibravimo konstantas nustatyti instrumento aukštį ir atstumą iki matuoklių. Tiksliajai koreliacijai reikalingas laikas priklauso nuo matuojamojo atstumo bei nuo matavimo signalo kokybės, tačiau jis niekada neviršija vienos sekundės.

Kai šie keturi etapai yra atlikti, matavimų rezultatai toliau apdorojami, parodomi ekrane ir įrašomi pagal pasirinktą darbo režimą ir programą.

Koreliacijos metodas panaudotas skaitmeniniuose nivelyruose reikalauja dviejų parametų optimizavimo: tai yra aukščio ir mastelio. Aukščio skirtumas tarp prietaiso ir matuoklės atspindi koduotų juostų persislinkimą, o vaizdo mastelis priklauso nuo atstumo tarp prietaiso ir matuoklės.

Tiksliaja koreliacija yra nustatoma santykinė koduotų juostų vaizdo padėtis linijiniame detektoriuje ir koduotos juostos mastelis. Tikslios koreliacijos

paieškos srityje matavimo ir referenciniai signalai yra koreliuoti su pilnais aštuonių bitų duomenimis. Dėl tos priežasties matavimo ir referencinių signalų altitudės yra skirtingos, koreliacinė funkcija (1.2) yra normalizuojama.

Normalizavimas taip pat užtikrina, kad koreliacijos koeficientas visą laiką būtų tarp 1 ir 0. Tai leidžia įvertinti matavimo rezultatą po koreliacijos.

Po koreliacijos skaitmeninio nivelyro sistema atsižvelgia į netolygų matuoklės vaizdo šviesumą ir jį analizuoja.

Matavimo signalo pataisos skaičiavimo metu taip pat atsižvelgiama į trūkstamus koduotos juostos elementus, kadangi kliūtys gali užstoti dalį matuoklės, ir šios dalys atitinkamoje koreliacijoje yra praleidžiamos.

Bandymai parodė, kad iki 20 % matuoklės gali būti uždengta: dėl to nesumažėja rezultato tikslumas ir patikimumas. Kliūtis užstojama matuoklės vieta yra nesvarbi, tačiau precizinei niveliacijai atskaitymų matuoklės galuose reikėtų vengti (Geodezijos instituto ataskaita 2002).

Analitiniame procese turi būti atsižvelgta į tai, kad kiekvienas pikselis yra trapecišškai jautrus šviesai. Referencinis signalas gaunamas susiejus kodo funkciją c ($dy - h$) su detektoriaus jautriąja funkcija $D_i(y)$ saugoma prietaise. Referencinis signalas tada bus toks

$$\rho_i(d, h) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(d, y - h) dy \cdot D_i(y) dy. \quad (1.2)$$

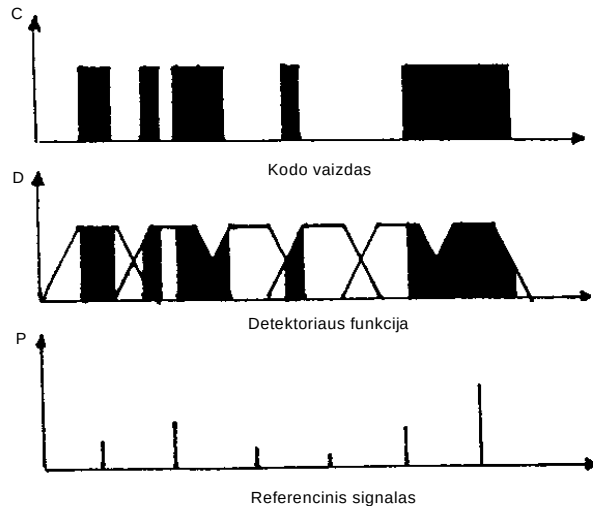
čia $\rho_i(d, h)$ – referencinis dydis pikseliui i ; $D_i(y)$ – pikselio jautrumo funkcija; $c(d, y - h)$ – kodo funkcija; h – aukštis; y – kodo padėtis detektoriaus atžvilgiu; d – vaizdo atstumas.

Atsižvelgiama tik į baltus (geltonus) matuoklės elementus, kadangi tik jie atspindi šviesą nuo matuoklės (Putrimas 1999).

Matuoklės GKNL4 kodas yra binarinis (Nedo 2002), kadangi jį sudaro tik balti ir juodi elementai. Visos matuoklės ilgis yra 4050 mm, iš viso joje yra 2000 elementų, tai yra bazinis elementas lygus 2,025 mm (Maurer *et al.* 1986, Takkalo 1992).

Kadangi matuoklės kodas yra analizuojamas koreliacijos metodu, nepasikartojantis pseudostochastinis kodas yra panaudotas šablonui. Šis kodas turi ypatybes, kurios leidžia naudoti koreliacijos metodą visame fokusavimo atstume nuo 1,8 m iki 100 m (Takkalo 1994).

Optinės sistemos vaizdo kokybė, kompensatoriaus veikimo tikslumas ir vizavimo linijos stabilumas turi įtakos rezultatui. Šie vidiniai tikslumą veikiantys faktoriai turėjo įtakos kuriant prietaisą ir jo analitines funkcijas (Takkalo 1992).



1.5 pav. Kodo sąsaja su detektoriaus funkcijomis

Fig. 1.5. Interface code to the detector functions

Pilnas matavimo atstumo skaičiavimas apima apie 50000 koreliacijos koeficientų, tai reiškia, kad (1.2) formulė turėtų būti taikoma 50000 kartų. Vietoje to skaitmeniniame nivelyre yra naudojami du skirtingi grubios ir tikslios koreliacijos modeliai, tuo būdu sumažinamas matematinių operacijų skaičius.

Vizavimo ir fokusavimo tikslumas šiek tiek veikia ir rezultato tikslumą. Prietaiso optiniai duomenys rodo, kad kai taikiny yra atitinkamai 2,0 m ir 100 m atstumu, matuoklės vaizdo plotis detektoriuje yra nuo 0,3 mm iki 14,0 mm. Matuoklės GKNL4 plotis yra 50 mm, tuo būdu prietaiso padėtis matuoklės atžvilgiu nėra ypač svarbi. Vengiant nesimetriškos refrakcijos poveikio, reikia vengti, kad maksimalus atstumas preciziniame niveliavime viršytų 35 m, o tai atitinka 22 mm pločio invarinę juostelę. Dėl šios priežasties galima atskaityti niveliavimo matuoklėje pasuktoje iki 45 laipsnių kampu apie jos vertikalią ašį (Menzel 1999).

Bandymai parodė, kad nors aukščio matavimo tikslumas nepriklauso nuo to, kaip tiksliai fokusuojamas matuoklės vaizdas, tačiau rūpestingas fokusavimas trumpina matavimo laiką, kadangi nuo fokusavimo lęšių padėties priklauso koreliacijos paieškos sritis (Menzel 1999, Krikštonis 2000, 2001, 2002).

Koreliacijos nustatymo tikslumas priklauso nuo pikselių matmenų, jų skaičiaus bei detektoriaus jautrio funkcijos. Tai savo ruožtu įtakoja atskaitų, gautų

nivelyro indikatoriuje tikslumą. Kodinių matuoklės atskaitų redukavimo į skaitmenines atskaitas tikslumas priklauso nuo detektoriaus konstrukcijos bei kovariacijos tikslumo (Skeivalas *et al.* 2000).

Panaudodami dviejų atsitiktinių dydžių h ir r kovariacijos K_{hr} formulę (Skeivalas *et al.* 1999, Skeivalas, Giniotis 2000), galime parašyti:

$$K_{hr} = \rho(h, r) \sigma_h \sigma_r, \quad (1.3)$$

čia $\rho(h, r)$ – koreliacijos koeficientas; σ_h, σ_r – dydžių h ir r standartiniai nuokrypiai.

Dydžiu H suprantama matuoklės kodinio vaizdo atitinkamo taško koordinatė, dydžiu R – referencinio kodo atitinkamo taško koordinatė. Koordinatės nustatomos vienmatėje ašyje.

Dydžių H ir R koreliacijos koeficiento įvertis $\rho'(h, r)$ skaičiuojamas pagal įprastinę matematinės statistikos formulę:

$$\rho'(h, r) = \frac{\frac{1}{n} \sum_i h_i r_i - \bar{h} \cdot \bar{r}}{m_h \cdot m_r}, \quad (1.4)$$

čia h_i – matuoklės kodinio vaizdo i -ojo taško koordinatės reikšmė, r_i – referencinio kodo i -ojo taško koordinatės reikšmė; $\bar{h}, \bar{r}$ – aritmetiniai vidurkiai. Standartinių nuokrypių σ_h ir σ_r įverčiai m_h ir m_r skaičiuojami iš formulių

$$m_h = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n h_i^2 - \bar{h}^2}, \quad (1.5)$$

$$m_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n r_i^2 - \bar{r}^2}. \quad (1.6)$$

Koreliacijos koeficientų visuma išreiškiama koreliacijos funkcijos pavidalu.

Vidutinis informacijos kiekis $H(x)$, kuris gaunamas panaudojus visus pikselius yra lygus

$$H(x) = - \sum_1^{1024} p_i \log_2 p_i = \log_2 1024 = 10 \text{ bitų}, \quad (1.7)$$

čia $p_i = 1/1024$ – matuoklės kodinio vaizdo ir referencinio kodo i-ojo taško koordinatinių sutapdinimo tikimybė.

Matuoklės kodinio vaizdo taškų sutapdinimas su referenciniu kodu atliekamas atitinkamu tikslumu, kuris priklauso nuo gautos kovariacijos tikslumo.

Elektroninio nivelyro indikatorius parodo matuoklės, pastatytos fiksuotame taške atskaitą, kuri fiksuojama pagal nivelyro optinę ašį. Tačiau ši atskaita suformuojama iš matuoklės kodinio vaizdo, kaip dviejų taškų koordinatinių projekcijų linijiniame detektoriuje skirtumas, t. y. $a = x_1 - x_0$. Koordinatė x_0 fiksuoja matuoklės nulinę atskaitą, o koordinatė x_1 matuoklės atskaitą pagal nivelyro optinę ašį. Matuoklės kodinio vaizdo sutapdinimas su referenciniu kodu nėra tikslus, nes jis priklauso nuo koreliacijos tikslumo. Todėl linijiniame detektoriuje nustatyta atskaita a nėra tiksli.

Šios atskaitos atsitiktinė paklaida Δ_a susideda iš dviejų dalių: Δ_{ah} ir Δ_{ar} , t. y.

$$\Delta_a = \Delta_{ah} + \Delta_{ar}, \quad (1.8)$$

čia Δ_{ah} – atskaitos pagal matuoklės kodinį vaizdą atsitiktinė paklaida, Δ_{ar} – matuoklės kodinio vaizdo sutapdinimo su referenciniu kodu atsitiktinė paklaida. Kadangi pastarosios paklaidos yra koreliuotos, tai atskaitos a dispersija skaičiuojama pagal šią formulę:

$$\sigma_a^2 = \sigma_{ah}^2 + \sigma_{ar}^2 + 2K(\Delta_{ah}, \Delta_{ar}). \quad (1.9)$$

Atskaitų a_h matuoklės kodiniame vaizde ir atskaitų a_r referenciniame kodo dispersijos yra vienodos, nes naudojamas vienas ir tas pats linijinis detektorius, t. y. $\sigma_{ah}^2 = \sigma_{ar}^2$. Atsižvelgiant į tai, kad $|K(\Delta_{ah}, \Delta_{ar})| \leq \sigma_{ar}^2$, iš (1.9) formulės gauname, kad:

$$\sigma_a^2 \leq 4\sigma_{ar}^2. \quad (1.10)$$

Pavienių atskaitų a_h ir a_r dispersijos išreiškiamos per koordinatinių x_0 ir x_1 dispersijas:

$$\sigma_{ah}^2 = \sigma_{ar}^2 = \sigma_{x_0}^2 + \sigma_{x_1}^2 = 2\sigma_r^2, \quad (1.11)$$

čia $\sigma_{x_0} = \sigma_{x_1} = \sigma_r$.

Elektroniniame nivelyre automatinio režimu galima atlikti matuoklės, esančios nekintančioje padėtyje, daugkartinius tos pačios koordinatės matavimus. Paprastai daromi keli pakartotiniai tos pačios koordinatės atskaitymai ir galutiniu rezultatu užrašomas atskaitų aritmetinis vidurkis. Šiuo atveju atskaitų aritmetinio vidurkio standartinis nuokrypis yra lygus (Skeivalas 1995, Skeivalas *et al.* 2000):

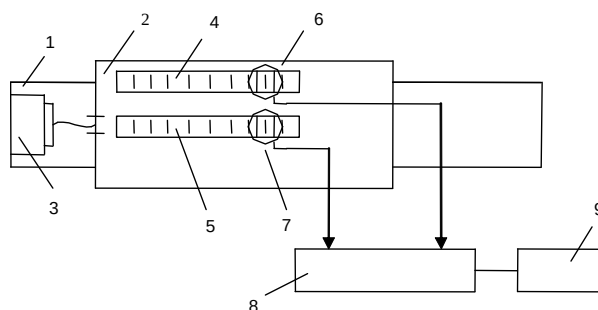
$$\sigma_{\bar{a}} = \frac{\sigma_a}{\sqrt{k}}, \quad (1.12)$$

čia k – atskaitymų skaičius.

1.3. Skaitmeninių nivelių bei kodinių matuoklių kalibravimas

Matuoklių kalibravimo komparatorius (Lot. *comparo* – lyginu) iš dalies pakartoja matavimo operacijas, atliekamas niveliavimo metu.

Kalibravimas yra atliekamas lyginant tyriamą matuoklę su etalonu. Ant ilgio matavimo įrenginio stalo padedami etaloninis ir tikrinamasis matas ir matavimo prietaisai vienas paskui kitą, lygiagrečiai vienas kitam arba lygiagrečiose viena kitai plokštumose. Etaloniniu matu gali būti ilgio matavimo keitiklis, lazerinis interferometras su spindulį atspindinčiu veidrodžiu, pastatytu ant K stalo vienoje simetrijos ašyje, lazerinis girometras arba kitas etaloninis ilgio matas.



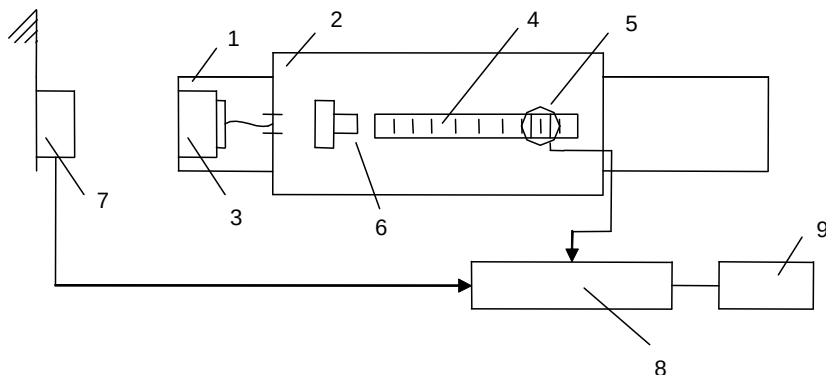
1.6 pav. Ilgio matų tikrinimo komparatoriaus schema

Fig 1.6. Length measurement comparator scheme

Plačiai naudojami niveliavimo matuoklių skalių žymų komparatoriai. Šie komparatoriai (1.6 pav.) turi masyvų stovą 1, ant kurio įrengtos kreipiančiosios,

kuriomis juda pagrindas 2, kur lygiagrečiai pritvirtintos etaloninės 4 ir kalibruojamoji 5 niveliavimo matuoklės. Ant pagrindo viena paskui kitą arba lygiagrečiai viena kitai pastatomos dvi niveliavimo matuoklės brūkšninės skalės: etaloninė 4 ir matuojamoji skalė 5. Ties abiem skalėmis pastatyti fotoelektriniai matavimo prietaisai - mikroskopai 6 ir 7. Išvestys iš fotoelektrinių mikroskopų sujungtos per interfeisą su kompiuteriu 8, kuriame apdoroti duomenys perduodami į registravimo prietaisą 9 protokolą spausdinti arba matavimų rezultato grafiką braižyti.

Komparatoriuje su lazeriniu interferometru (1.7 pav.) ant komparavimo pagrindo 2 seigos kryptimi pastatoma matuojamoji brūkšninė skalė 4 arba matuojamasis ilgio keitiklis. Vienoje ašyje su juo yra statomas atspindintis interferometro veidrodys 6 (pentaprizmė), o taip pat ašies linijoje – lazerinis interferometras 7.



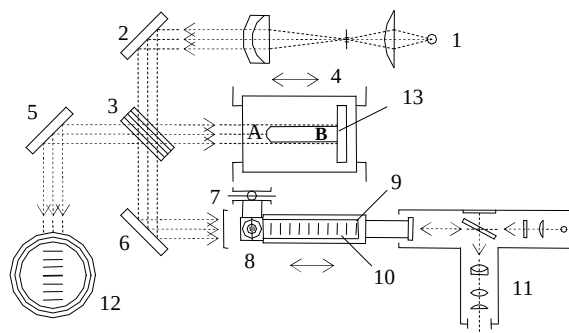
1.7 pav. Komparatoriaus su lazeriniu interferometru schema

Fig 1.7. Comparator with a laser interferometer scheme

Komparavimo stalui pasislinkus nustatytu žingsniu (arba nepertraukiamo judesio metu) yra sulyginami fotoelektrinio mikroskopo 5 signalai ir jiems atitinkantys interferometro signalai. Pastarieji yra laikomi etaloniniais, o skirtumo tarp šių signalų vertė reiškia matuojamosios skalės arba ilgio keitiklio paklaidą. Kompiuteryje 8 yra apskaičiuojamas matavimo rezultatas, įvertinant sisteminės ir atsitiktinės paklaidas, neapibrėžtį pagal pasirinktus pasikliautinus intervalus. Lazerinis interferometras automatiškai kompensuoja aplinkos temperatūros poveikį, linijinis plėtimosi koeficiento įtaką dėl skirtingų stalo ir matuojamojo objekto medžiagų, aplinkos slėgio, drėgmės.

Interferometrinis komparatorius veikia tokiu principu: matavimo prietaisais šviesos bangų interferometru gali palyginti brūkšninius ir galinius ilgio matus

(GIM) iki 100 mm. GIM matuoti naudojami Kesterso interferometrai. Didesnio ilgio matai matuojami ir universaliu interferenciniu mikroskopu.



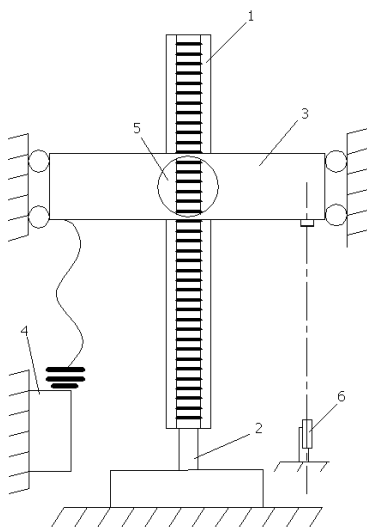
1.8 pav. Interferometrinio komparatoriaus schema

Fig 1.8. The scheme of interferometric comparator

Lygiagretaus spindulių pluošto (1.8 pav.) 1 šaltinio šviesa 2 veidrodžiu nukreipiama į pusiau šviesą praleidžiančią stiklinę plokštelę 3. Nuo plokštelės atspindėjusi šviesos dalis apšviečia ilgio mato etaloną 4, kuris yra pritvirtintas ant judamo stalo. Priekinė A etalono dalis yra laisva, o prie galinės B dalies pridėta stiklinė plokštelė 13. Nuo A ir B plokštumų atspindėjusi šviesa grįžta į 3 plokštelę ir 5 veidrodžiu nukreipiama į kolimatorių 12. Nuo 2 veidrodžio atspindėjusi šviesos dalis, praėjusi pro 3 plokštelę 6 veidrodžiu nukreipiama į 7 veidrodį, kuris yra tvirtai sujungtas su fotoelektriniu mikroskopu 8. Mikroskopas gali judėti išilgai 9 stalo, ant kurio patalpintas brūkšninis matas 10. Nuo 7 veidrodžio atspindėjusi šviesa sugrįžta į veidrodį 6 ir nukreipiama į 3 plokštelę. Nuo 3 plokštelės atspindėjusi šviesa 5 veidrodžiu taip pat nukreipiama į kolimatorių 12. Interferenciniu indikatoriumi 11 (atitinkančiu Maikelsono interferometrą, kurio vienas veidrodis yra tvirtai sujungtas su stalu) fiksuojama stalo padėtis. Etalonišės ir matuojamosios žymų brūkšninio matų nulinio brūkšnio padėtis nustatoma mikroskopu, o perstumiant vežimėlį su matu suvienodinamas dviejų šviesos spindulių pluoštų nueitas nevienodas kelio ilgis, kuris susidaro atspindint šviesai nuo paviršiaus A ir 7 veidrodžio. Po to perslenkant 7 veidrodį ir 8 mikroskopą suvienodinamas abiejų šviesos spindulių pluoštų kelias, susidaręs atspindinėjus šviesai nuo 7 veidrodžio ir B mato paviršiaus. 7 veidrodžio ir 8 mikroskopo būtinas perslinkimo dydis yra lygus mato ilgiui. Nauja veidrodžio padėtis brūkšninio mato atžvilgiu fiksuojama mikroskopu ir interferenciniu indi-

katoriumi. *GIM* palyginti į šviesos šaltinio skleidžiamą spindulių pluoštą patalpinamas cilindrinis Fabri-Pero etalonas, o 7 veidrodys pastatomas taip, kad jo plokštuma lyginamą matą dalintų kartotinamomis etalonui dalimis. Interferencinio komparatoriaus matavimo santykinė paklaida yra apie $1 \cdot 10^{-7}$ (Giniotis 2005).

Visos kodinių brūkšnių matuoklės gali būti kalibruojamos tradiciniais interferometriniais komparatoriais. Pakanka išmatuoti 2,025 mm pločio atskirus elementus (brūkšnius) pasirinktu žingsniu. Skalės kalibravimui po jos pagaminimo yra naudojamas vertikalus matuoklių komparatorius.



1.9 pav. Vertikalojo komparatoriaus su lazeriniu interferometru schema

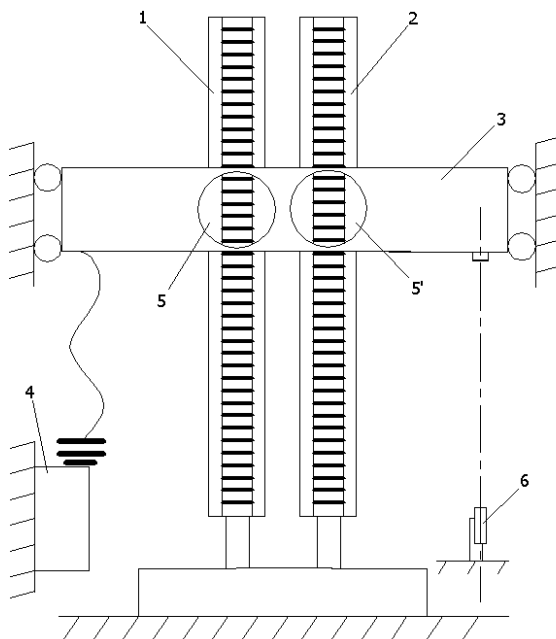
Fig. 1.9. The scheme of vertical comparator with laser interferometer

1.9 paveiksle pavaizduoto vertikalojo komparatoriaus schemoje parodyti šie elementai: 1 – matuojama niveliacijos matuoklė, 2 – lazerinis interferometras, 3 – kariatėlė su mikroskopu ir CCD fotokamera 5, 4 – pavara. Šio tipo komparatorių absoliutinė paklaida yra apskaičiuojama pagal brūkšnio padėties skirtumą nuo lazerinio interferometro rodmenų su temperatūrine, drėgmės, slėgio, skalės medžiagos plėtimosi koeficiento įtakos pataisomis.

1.10 paveiksle pavaizduotas vertikalusis komparatorius, kur niveliavimo matuoklių skalių paklaida jame yra nustatoma tarp dviejų matavimo prietaiso rodmenų 5 ir 5“.

Kodinėse matuoklėse atstumai tarp žymų padėčių visada yra kodinių žingsnių sandauga iš 2,025 mm.

Vertikalieji ir horizontalieji niveliavimo matuoklių komparatoriai yra sudėtingi, brangūs, didelių gabaritų įrenginiai, kuriems aptarnauti reikia aukštos kvalifikacijos specialistų.



1.10 pav. Vertikalaus komparatoriaus schema su lazeriniu interferometru
Fig. 1.10. The scheme of vertical comparator with laser interferometer

Suomijos geodezijos institute matuoklių kalibravimas yra atliekamas tokiu principu: matuoklė komparatoriuje keliama specialia kėlimo sistema ir žingsnine pavara. Matuoklės padėtis yra atskaitoma lazeriniu interferometru, o matuoklės skalės žymų padėtys registruojamos specialiu vaizdo jutikliu (CCD). Automatinė klimato kontrolės sistema registruoja aplinkos temperatūrą, slėgį, drėgmę, nes matuoklės ilgį ir lazerio bangų sklaidimą reikia koreguoti, atsižvelgiant į aplinkos parametrus. Visa ši sistema yra valdoma kompiuterine programa.

2002 m. Takalo pritaikė komparatorių visos sistemos kalibravimui. Jis sukonstravo 10 x 2,7 x 5,2 m matmenų laboratorijos patalpoje du 4,05 aukščio stovus, kas leido atlikti matuoklės kalibravimą diapazone nuo 3 m iki 7,7 m. Temperatūra laboratorijoje buvo nustatoma nuo +5 °C iki +50 °C ir drėgnumas reguliuojamas nuo 5 % iki 100 % (Takalo 1999, 2002).

Pagrindinis sistemos kalibravimo principas yra stebėti lazerinio interferometro ir skaitmeninio nivelyro atskaitas vienu metu. Matavimai atliekami paslenkant brūkšninę kodinę matuoklę vertikalajame komparatoriuje kas 25 mm ir užrašant lazerinio interferometro bei skaitmeninio nivelyro atskaitas. Mastelio pataisos kiekvienai matuoklei nustatomos pridodant intervalų eilės pataisas. Ma-

tuoklių kalibravimo komparatorius susideda iš slankiklio, prie kurio tvirtinama ir reguliuojama kalibruojamoji matuoklė, lazerinio interferometro (etaloninio mato) su atspindinčia prizme, nejudamai pritvirtinto vaizdo jutiklio, nukreipto į ties jį žingsniais perstatomas matuoklės žymas. Taip pat pavara, kuri skirta perslinkti matuoklę su veidrodėliu išilgai matuoklės ašies, rezultatų saugojimo ir apdorojimo bloko. Įrenginys yra sukurtas ir naudojamas Suomijos geodezijos institute (1.9 pav.).

Šis vertikalusis komparatorius leidžia kalibruoti 3 m ilgio matuokles vertikalioje padėtyje. Tipiškas refrakcinis lazerio spindulio trajektorijos indeksas gaunamas iš keturių temperatūros matavimo jutiklių, vieno atmosferos slėgio ir santykinio oro drėgnumo jutiklio. Laboratorijoje temperatūra turi būti $22,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, o santykinis oro drėgnumas $50\text{ \%} \pm 10\text{ \%}$. Šio vertikaliojo komparatoriaus tikslumas yra $\pm 4\text{ }\mu\text{m}$.

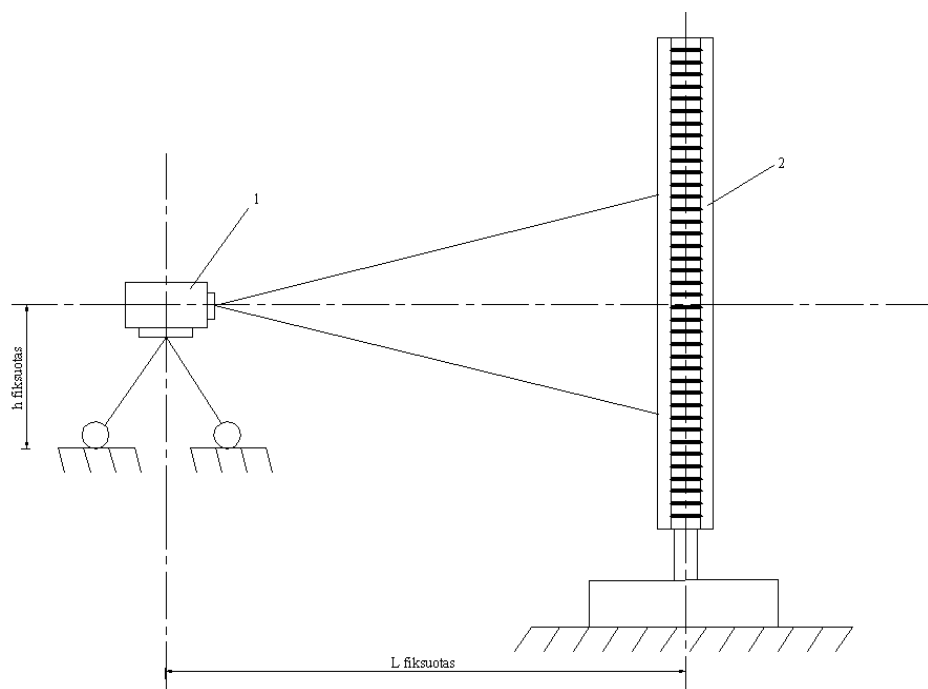
Kai kurių skaitmeninių nivelyrų konstrukcija įtakoja matavimus ir sukelia sisteminius aukščių nuokrypius (Ingensand 1996). Tai gali būti siejama su tam tikromis matuoklės atkarpomis ar tam tikrais vizavimo atstumais (Reithofer 1993, 1996). Šie nuokrypiai pasitaiko matuojant Leica nivelyrais *NA3003*. Taip pat vartotojui netinkamai naudojantis niveliavimo sistema gali atsirasti niveliavimo sistemos aukščių nuokrypos.

Naudojant skaitmeninius nivelyrus, matavimo procese dalyvauja visa sistema (nivelyras ir matuoklės). Jei bent vienas iš sistemos komponentų (matuoklė ar nivelyras) yra pažeisti – gaunamos klaidingos aukščio atskaitos. Dažniausiai pažeidžiamos matuoklės žymos. Todėl tikslinga atlikti nivelyro ir matuoklių, kaip vientisos sistemos kalibravimą.



1.11 pav. Suomijos geodezijos instituto naudojama skaitmeninio nivelyro ir kodinės matuoklės kalibravimo sistema

Fig. 1.11. Finnish Institute of Geodesy used Levels and coded digital meter calibration system



1.12 pav. Suomijos geodezijos instituto vertikalusis niveliacijos matuoklių komparatoriaus schema

Fig. 1.12. The scheme of vertical levelling staffs comparator in Finnish Institute of Geodesy

Matuoklės atskaitos skaičiavimo algoritmams naudojama koreliacija, aritmetinis vidurkis, Furje analizės metodas. Įvairių matavimų technologijų apžvalgą atliko H. Ingensand (1999). Šiuo metu preciziniam niveliavimui dažniausiai naudojami *Leica*, *Topcon* ir *Trimble* firmų skaitmeniniai nivelyrai bei 3 m ilgio invariantinės kodinės matuoklės. Norint gauti tikslias aukščių atskaitas, būtina nustatyti kiekvienos matuoklės mastelį, invaro juostelės temperatūrų matavimo momentu bei jos linijinį plėtimosi (ilgėjimo) koeficientą. Paprastai matuoklės mastelis nustatomas ją kalibruojant ir šiame procese nenaudojant nivelyro. Tačiau ir atliekant sistemos kalibravimą gali būti nustatytas matuoklės mastelis. Sistemos kalibravimo kritikai manė, kad tai neįmanoma todėl, kad dabartinių niveliavimo sistemų skiriamoji geba yra 0,01 mm. Tačiau H. Woschitz (2002) eksperimentiškai įrodė, kad atliekant sistemos kalibravimą gali būti tiksliai nustatytas ir matuoklės mastelis. Matuojant trumpus atstumus (3,3 m) buvo atlikti du kalibravimo bandymai. Bandymų tikslas – atrasti galimas blogąsias matuoklės funkcijas. Remiantis dviejų kalibravimo bandymų duomenimis, gauti šie matuoklės masteliai $15,2 \pm 0,3$ ppm ir $15,9 \pm 0,3$ ppm. Matome, jog skirtumas

tarp matuoklės mastelių yra nedidelis. Matuoklės masteliai buvo nustatyti ją kalibruojant dviem būdais: vertikaliojoje ir horizontaliojoje padėtyje. Pirmuoju atveju jos mastelis pasirodė vidutiniškai 0,9 ppm mažesnis negu antruoju atveju. (Becker *et al.* 1994).

Precizinių skaitmeninių nivelių sistemų kalibravimui naudojami vertikalieji komparatoriai yra įrengti Graco technologijos universitete (Austrija), Suomijos Geodezijos institute, Miuncheno Bundesvero universitete (Vokietija). Vertikaliojo komparatoriaus patalpose turi būti palaikoma pastovi temperatūra ir drėgmė. Galimi matuoklių komparatorių struktūriniai variantai yra išvardinti 1.2 lentelėje (Ingensand *et al.* 1996, Ingensand 1999).

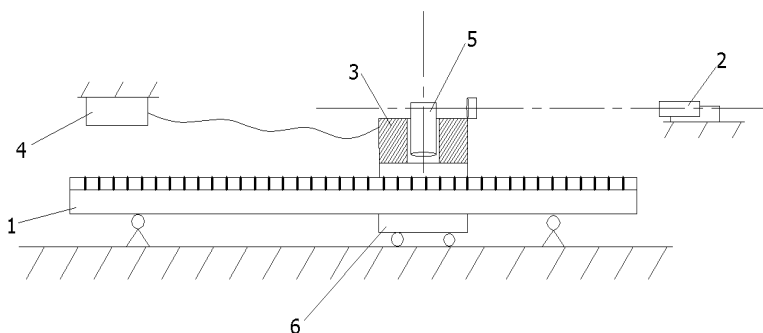
1.2 lentelė. Komparatorių principinė struktūra

Table 1.2. Principal structure of comparators

Komponuotė	Naudojamas etalonas	Judančioji dalis
Vertikalioji	Lazerinis interferometras	Kalibruojamoji matuoklė
Horizontalioji	Lazerinis interferometras	Karietėlė su CCD kamera ir atspindinčia prizme
Vertikalioji, horizontalioji	Etalonišės matuoklės skaitmeninis vaizdas	Be judesio arba su daliniu judesiu (kai tam tikru žingsniu perstatomas skaitmeninis fotoaparatas)

Kalibravimo metu stengiamasi tikrinamąją matuoklę padėti į tokią padėtį, kurioje ji yra naudojama darbo metu, t. y. į vertikalią padėtį. Tačiau yra atvejų, kai matuoklės yra tikrinamos horizontaliojoje padėtyje, nes toks komporavimas žymiai palengvina matavimą ir sumažina reikiamos patalpos aukštį.

Miuncheno technikos universitete yra naudojami ir vertikalūs ir horizontalūs niveliavimo matuoklių komparatoriai. Horizontaliais komparatoriais yra tiriama matuoklių aplinkos temperatūros įtaka niveliacinėms matuoklėms (invariantinėms juostelėms). Matuoklės yra kalibruojamos esant 0, 10, 20, 30 ir 40 °C temperatūrai (Ingensand 1999).



1.13 pav. Horizontaliojo niveliacijos matuoklių komparatoriaus schema

Fig. 1.13. Scheme of the horizontal levelling staffs comparator

1.13 paveiksle horizontaliojo komparatoriaus schemoje 1 yra kalibruojamoji niveliacijos matuoklė, 2 – lazerinis interferometras, 3 – kariatėlė su mikroskopu ir CCD fotokamera 5, 4 – pavara, 6 – tiesialinijinio kariatėlės judesio kreipiančiosios.

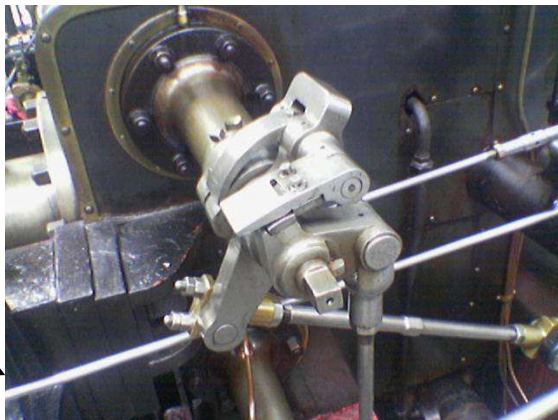
Horizontalusis komparatorius, kurio schema yra parodyta 1.12 paveiksle yra naudojamas ir Ciuricho federaliniame technologijos universitete Šveicarijoje, kur man teko stažuotis ir susipažinti su šio komparatoriaus veikimo principu.

1.4. Briaunų detektavimo operatoriai

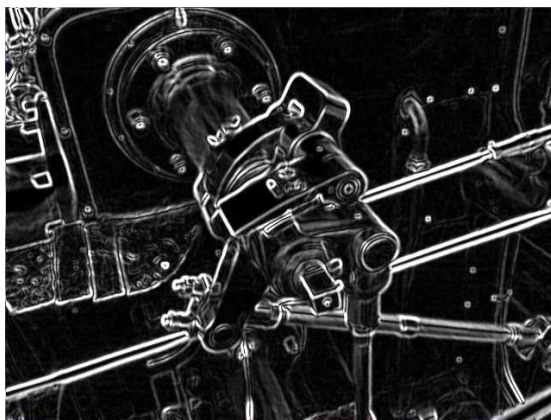
Kodinių skalių žymų nustatymui gali būti naudojami briaunų detektavimo operatoriai (*edge detection operators*) (Green 2002). Briaunų nustatymo operatoriai yra naudojami skaitmeninėse nuotraukose, kai yra atliekamas vaizdų apdorojimas, norint nustatyti įvairių skaitmeninio vaizdo briaunų kraštus (1.13, 1.14 pav.). Yra naudojami specialūs briaunų detektavimo algoritmai. Skaičiuojami vaizdo gradientai pagal vaizdo intensyvumą kiekviename pikselio taške, kurie yra analizuojami specialia programine įranga.

Gradiento skaičiavimui naudojama dviejų kintamųjų funkcija 1.14, 1.15 formulės (pagal vaizdo intensyvumą), vaizdas yra projektuojamas į plokštumą ir skaičiuojamos taškų horizontalios ir vertikalios komponentės. Kiekviename vaizdo taške šviesos intensyvumo gradientai yra įvertinami ir nustatomas bei įvertinamas vaizdo intensyvumas operatoriuje (Canny 1986).

Pavaros detalės
briauna



1.14 pav. Vaizdas, panaudotas vaizdo briaunų detektavimui
Fig. 1.14. Image used for image edge detection



1.15 pav. 1.14 paveikslas apdorotas vaizdo briaunų detektoriumi
Fig. 1.15. Image processed with image edge detector in Fig. 1.14

Matematiškai operatorius naudoja du matricinius pavidalus, kurie susiejami su pradiniu vaizdu priartėjimo metodu. Jei mūsų pradinis vaizdas yra A (formulėje 1.14 ir 1.15), tai tada gradientai G_x ir G_y yra du apdoroti vaizdai, kurių kiekviename taške yra atliekami išvestiniai skaičiavimai ir nustatoma briauna (1.14 pav. rodykle pavaizduota detalės briauna).

$$G_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{pmatrix} \times A \quad (1.14)$$

$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{pmatrix} \times A \quad (1.15)$$

Kiekviename vaizdo taške bendrą šviesos intensyvumo gradientą galime užrašyti taip:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1.16)$$

Naudodami šią informaciją mes galime apskaičiuoti gradiento kryptį

$$\Theta = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (1.17)$$

Yra naudojami įvairūs briaunų detektavimo operatoriai: *Sobel*, *Canny*, *Cross*, *Ridge* ir kiti. Galutinis briaunų detektavimo rezultatas yra tas pats, tik skiriasi programų aprašymo algoritmai. Kol kas skaitmeninių vaizdų briaunos nustatomos nelabai tiksliai, bet jų detektavimo metodika nuolat tobulinama ir tikslinama (Green 2000).

1.5. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Iš atliktos mokslinės literatūros analizės galima daryti išvadas:

1. Tobulėjant šiuolaikinei geodezinei matavimų technikai, skaitmeniniuose nivelyruose įmontuotas mikroprocesorius pagal pasirinktą programą kontroliuoja niveliavimo matuoklių atskaitas ir veiksmų seką, tokiu būdu 100% eliminodamas darbus atliekančio matuotojo asmenines paklaidas. Niveliuojant skaitmeniniais nivelyrais atsiranda specifiniai paklaidų šaltiniai, kuriuos būtina ištirti papildomai.

2. Paskelbtose mokslinėse publikacijose didelis dėmesys skiriamas horizontaliems ir vertikaliesiems interferometriniais niveliavimo matuoklių komparatoriams.

3. Matuoklių kalibravimo komparatorius iš dalies pakartoja matavimo operacijas, atliekamas niveliavimo metu. Pagrindinis sistemos kalibravimo principas – fiksuoti lazerinio interferometro ir skaitmeninio nivelyro rodmenis vienu metu. Matavimai atliekami paslenkant niveliacinę matuoklę vertikaliajame komparatoriuje kas 25 mm bei fiksuojant lazerinio interferometro bei skaitmeninio nivelyro rodmenis.

4. Kalibravimo įrenginiai yra sudėtingi, brangūs, didelių matmenų, kadangi yra būtina žingsnine pavara matuoklę perstumti į tokį pat, kaip jos ilgis, aukštį. Be to yra naudojamas labai brangus ir sudėtingas įrenginys – lazerinis interferometras. Visa tai daro komparatoriaus konstrukciją labai sudėtingą ir brangią.

5. Vystantis mokslui ir techninėms galimybėms tobulėjo komparatorių įranga, tačiau komparatorių matmenys nemažėjo. Todėl iškilo uždavinys kaip būtų galima supaprastinti niveliavimo matuoklių kalibravimą, kalibravimo įrenginius bei procesą, taikant fotometrinius metodus.

6. Skelbtuose publikacijose išanalizuoti įvairūs briaunų detektavimo operatoriai: *Sobel*, *Canny*, *Cross*, *Ridge* ir kiti. Galutinis briaunų detektavimo rezultatas yra tas pats, tik skiriasi programų aprašymo algoritmai.

Įvertinant mokslinėje literatūroje išnagrinėtus klausimus yra tikslinga, žinant darbo tikslą, išspręsti šiuos uždavinius:

- Atlikti mokslinės literatūros apie interferometrinių horizontaliųjų ir vertikalųjų komparatorių konstrukciją, veikimo principo analizę.
- Išanalizuoti ir teoriškai pagrįsti skaitmeninius niveliacijos matuoklių vaizdų apdorojimo būdus.

- Sukurti fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų kalibravimo būdą pagrįstą niveliavimo matuoklių skalių vaizdų aprašymu skaitmenine forma.
- Atlikti fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių padėties nustatymo būdo patikimumo įvertinimą, kontrolinius matavimus atliekant optiniu mikroskopu.
- Atlikti palyginamąją fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties tikslumo nustatymo analizę su kalibravimo rezultatais gautais sertifikuotose geodezijos kalibravimo laboratorijose bei niveliavimo matuoklių gamintojų duomenimis.

Niveliavimo matuoklių skalių aprašymas skaitmenine forma

Šiame skyriuje aprašyti tyrimai, kurių pagrindu buvo gautas išradimo patentas. Išanalizuotos skaitmeninių vaizdų savybės, skaitmeninių ir spalvinių matuoklių žymų aprašymo formatai: JPG, BMP bei pateikiamos jų savybės. Sukurta kompiuterinė programa PIKSELIS, kuri leidžia skaitmeninių kodinių niveliacijos matuoklių kodinių skalių nuotraukų dalis paversti į skaitmeninę informaciją. Atlikti tyrimai su įvairiais skaitmeninių nuotraukų formatais.

Šių tyrimų tikslas – taikant sukurtą kompiuterinę programą PIKSELIS nustatyti geriausius kodinių niveliacijos matuoklių skalių žymų aprašymo formatus, kurių pagalba būtų galima tiksliai nustatyti kodinių skalių žymas niveliacijos matuoklėse, kad galėtumėme gautos informacijos pagrindu atlikti fotometrinį kalibravimą.

Skyriaus tematika atlikti tyrimai paskelbti autoriaus straipsniuose bei tarptautinių, respublikinių konferencijų medžiagoje. (Aksamitauskas *et al.* 2009; Giniotis *et al.* 2007; Aksamitauskas, Rekus 2010; Aksamitauskas *et al.* 2010, Rekus *et al.* 2008, Giniotis *et al.* 2008, Aksamitauskas *et al.* 2005; Rekus 2006; Rekus 2007; Rekus, Aksamitauskas 2008; Rekus 2009). Užpatentuotas išradimas (Giniotis *et al.* 2009).

2.1 Išradimo patentas LT 5559 B „Niveliavimo matuoklių brūkšnių padėties tikslumo kalibravimo įrenginys“

Niveliavimo matuoklių kalibravimo įrenginys, kuris susideda iš pagrindo, ant kurio padėta ir tikrinama kalibruojamoji matuoklė (KM), etaloninio mato (EM), kreipiančiųjų, kuriomis gali judėti matuoklių brūkšnių padėties matavimo prietaisas – skaitmeninė fotokamera (SFK) ir rezultatų apdorojimo bloko. Etaloninis matas yra pakeičiamas jo fotogrametriniu vaizdu, užfiksuotu skaitmeninėje fotokameroje, o kalibruojamosios matuoklės skalių žymų padėtis yra lyginama su EM fotogrametrinio vaizdo žymų padėtimi, skalių žymų padėtį fotogrametriškai vaizde nustatant pagal koreliacijos koeficiento vertę (Giniotis *et al.* 2009).

Šios disertacijos atliktų tyrimų pagrindu buvo pateikta paraiška ir gautas išradimo patentas.

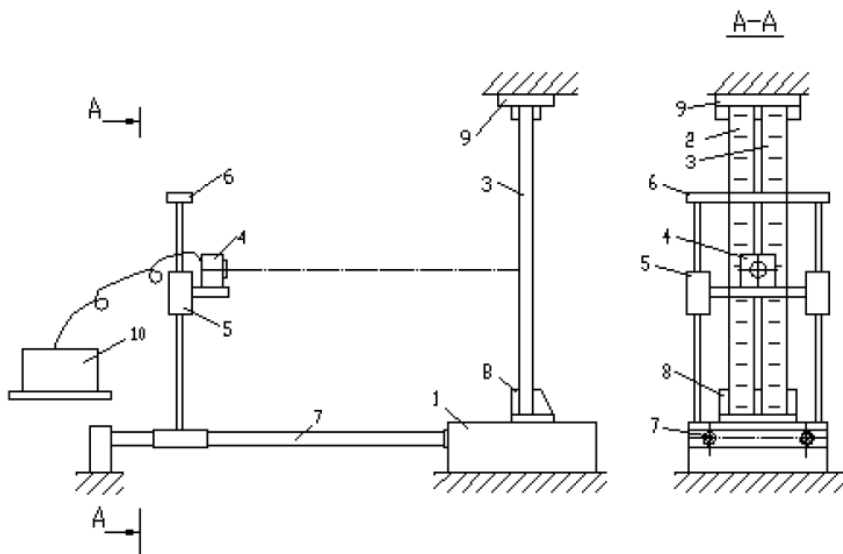
2.1.1. Išradimo prototipas

Siūlomo išradimo prototipu yra pasirinktas niveliavimo matuoklių kalibravimo įrenginys (patento Nr. LT 5333 B, išradėjai: V. Giniotis, P. Petroškevičius, J. Skeivalas).

Išradimo esmė yra ta, kad matuoklei kalibruoti etaloniniu matu yra naudojama skaitmeninė fotokamera (CCD), kalibruojamoji ir etaloninė matuoklė, perstatoma į keletą padėčių lygiagrečiai matuoklių ašims. Ji registruoja abiejų matuoklių skalių žymų vaizdus ir jų tarpusavio padėtį, o kalibravimo rezultatai vertinami pagal matavimus papildoma skale, esančia apdorojimo įrenginyje (pvz., kompiuterio ekrane), nustatant skaitinį skirtumą tarp matuojamosios ir etaloninės skalės žymų padėčių (Giniotis *et al.* 2006).

Išradimo pagrindinius požymius sudaro tai, kad matavimo įrenginys (2.1 pav.) turi pagrindus 1, 5, 6 ir 7 ant kurio viršutinėje dalyje 8 ir apatinėje dalyje 9 pritvirtinta ir vertikalčiai reguliuojama kalibruojamoji 2 ir etaloninė matuoklė 3, kalibravimo metu perslenkama išilgai matuoklės ašies, matuoklės žymų padėties matavimo skaitmeninę fotokamerą 4 ir rezultatų apdorojimo bloką 10. Nuo kitų matuoklių kalibravimo įrenginių jis skiriasi tuo, kad jo pagrinde lygiagrečiai su matuojamąja matuokle yra pritvirtinta etaloninė matuoklė. Sudaryta galimybė ties abiem matuoklėmis slankioti skaitmeninę fotokamerą, abiejų matuoklių vaizdus fotografuoti ir perduoti į kompiuterį. Abiejų matuoklių vaizdo apdorojimo įtaisas turi papildomą skalę ir išilgai tos skalės bei matuoklių vaizdo perslenkamus bisektorius, kurie skirti atskaitymams atlikti tarp etaloninės ir matuojamosios matuoklės žymų padėčių. Etaloninė matuoklė, kaip ir visi pamatiniai etalonai, yra atitinkamai kalibruojama aukštesnio lygio matais. Matuoklėms ka-

libruoti naudojant etaloningą matuoklę ir skaitmeninę fotokamerą, perstatomą į keletą padėčių išilgai matuoklių ašies bei fotografuojant abiejų matuoklių žymų vaizdus, kalibravimo rezultatus galima įvertinti papildoma skale. Skaitmeninių fotokamerų skiriamoji geba yra apie 6 milijonai ir daugiau pikselių regėjimo lauke, todėl fotogrametrinis vaizdas kompiuterio ekrane gali būti analizuojamas, saugomas, perduodamas ir vertinamas mikrometriniais dydžiais.



2.1 pav. Kalibravimo įrenginio schema (Giniotis *et al.* 2008)

Fig. 2.1. Calibration device scheme (Giniotis *et al.* 2008)

Šis matavimo įrenginys taip pat gali būti naudojamas ir kitiems ilgio matams kalibruoti: rulečių, įvairių liniuočių, skalių ir t. t. Pasiekiamas techninis rezultatas yra šio įrenginio konstrukcijos supaprastinimas ir atpiginimas, konstrukcijos matmenų sumažinimas, informacijos gavimo, saugojimo ir perdavos paprastumas.

Matuoklių kalibravimas yra paremtas etaloningės ir kalibruojamos matuoklių fotografavimu viename kadre. Tuo yra užtikrinama nekintama jų tarpusavio padėtis. Po to tie vaizdai kompiuteryje gali būti sugretinami, orientuojami pagal kalibravimo skalę arba didinami. Matuoklių vaizdų tarpusavio padėtis kalibravimo procese yra nekeičiama. Kompiuteryje yra naudojama papildoma skalė ir bisektoriai, kurie gali judėti išilgai kalibravimo skalės. Nustačius optinę žymę ties matuoklių brūkšnių briaunomis arba ties jų vidine ašimi reikiamu kalibravimo žingsniu, yra registruojami tų brūkšnių padėties skirtumai pagal kalibravimo

skalės rodmenis. Taip pasirinktu žingsniu yra kalibruojamas visas matuoklės ilgis, nustatant kalibruojamos matuoklės brūkšnių padėties skirtumą nuo etaloninės matuoklės brūkšnių padėties.

Šio išradimo – prototipo trūkumas yra tas, kad kalibravimo tikslumą mažina ties matuoklių brūkšnių briaunomis pastatomas bisektorius, o briaunų ryškumas ir kontrastas nėra pakankamai ryškus, todėl vizualinis nustatymas ties briauna nėra tikslus. Dėl to nėra tikslus ir visas kalibravimo procesas. Be to, kalibravimo metu naudojama tokių pat gabaritų etaloninė matuoklė ir mechaninė pavara bei įranga kamerai perstatyti. Tai įrenginio konstrukciją daro sudėtingesnę, nes matuoklių ilgis yra 3–4 m, sunku įrenginį derinti ir kalibruoti matuokles, kalibravimui būtina turėti didelę patalpą, įrenginys yra brangus. Skaitmeninių vaizdų kokybei pagerinti bei vaizdinei informacijai automatiniam apdorojimui tinkama forma pateikti taikomi vaizdų apdorojimo metodai. Šiais metodais yra keičiamos skaitmeninių nuotraukų charakteristikos, o kompiuterinės regos (matymo) principais skaitmeniniuose vaizduose atpažįstami taškai.

2.1.2. Išradimo aprašymas

Siūlomo išradimo esmė yra ta, kad minėtame niveliavimo matuoklių kalibravimo įrenginyje (prototipas – patentas Nr. LT 5333 B) etaloninė ir matuojamoji niveliavimo matuoklės yra pakeistos jų fotogrametriniu vaizdu, įvestu į kompiuterio ekraną arba atminties bloką. Be to įrenginys yra papildytas analizuojančiu langu – diafragma, galinčia slankioti abiejų matuoklių fotogrametrinio vaizdo ir skaitmeninės fotokameros (SFK) pikselių bei atskaitymo skalės atžvilgiu, SK pikselių išėjimai analizuojančio lango ribose matricos pavidalu yra sujungti su kompiuterio įvestimi į koreliacijos koeficientų skaičiavimo bloką, pikselių išėjimo matrica sujungta su linijinio poslinkio matavimo skalės rodmenimis, o abiejų matuoklių brūkšnių briaunų padėtis atskaitymo sistemoje yra fiksuojama pagal pasirinktą pikselių apšviestumą atitinkančio koreliacijos koeficiento vertę (Giniotis *et al.* 2009).

Niveliavimo matuoklių kalibravimo įrenginys susideda iš skaitmeninės fotokameros, pagrindo, ant kurio patalpinta kalibruojamoji matuoklė (KM), etaloninės matuoklės (EM), kreipiančiųjų, kuriomis gali judėti matuoklių brūkšnių padėties matavimo prietaisas – skaitmeninė fotokamera (SFK) ir rezultatų apdorojimo bloko (2.1 pav.). Šis išradimas nuo prototipo skiriasi tuo, kad etaloninė ir kalibruojamoji matuoklės yra pakeistos jų fotogrametriniu vaizdu, įvesti į kompiuterio ekraną arba atminties įrenginį, kompiuteryje ant abiejų matuoklių vaizdo, užfiksuoto SFK, patalpintas analizuojantis langas – diafragma, galinti slinkti išilgai matuoklių vaizdų ir sujungta su matuojamąja skale, o matuoklių žymos

padėtis fiksuojama ne vizualių bisektoriaus užvedimu, bet analizuojančiojo lango pikselių apšviestumo koreliacijos koeficiento verte. Žymų fotometrinių vaizdų padėtis, nustatoma pagal koreliacijos koeficientus, atitinkančius jų padėtį analizuojančiame lange, susietame su matavimo skale, leidžia surasti ilgio tarp jų vertę, kuri atitinka matuoklės skalės žymos paklaidą, t. y., matuoklių kalibravimo paklaidą.

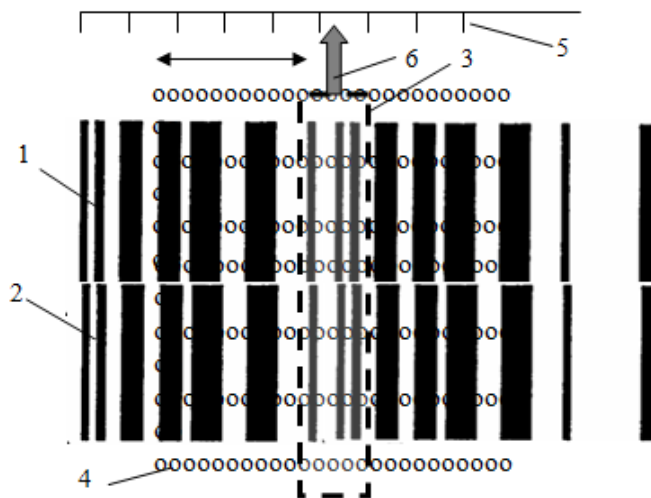
Nustačius optinę žymę ties matuoklių skalių žymų briaunomis reikiamu kalibravimo žingsniu yra registruojami brūkšnių padėties skirtumai pagal kalibravimo skalės rodmenis. Taip pasirinktu žingsniu kalibruojamas visas matuoklės ilgis, nustatant kalibruojamos matuoklės brūkšnių padėties skirtumą nuo etaloninės matuoklės brūkšnių padėties. Matuoklių vaizdai apdoroti ir rodmenims atskaityti gali būti naudojama viena iš daugelio grafinių programų, pvz., AutoCAD.

Niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties tikslumo kalibravimo įrenginyje naudojamas etaloninės ir kalibruojamos matuoklių skalių žymų padėties vaizdų lyginimas. Tai atstoja prototipe naudotą bisektoriaus pozicionavimą ties žyma ir padidina žymos padėties nustatymo tikslumą, nes optiniai žymų vaizdai neturi pakankamai kontrastingumo, perėjimas iš šviesaus tarpo į tamsų brūkšnį yra pilkas, todėl negalima tiksliai nustatyti briaunos padėtį. Koreliacijos koeficientas parodo, kurioje vietoje kartojasi tas pats žymos kontrasto lygis, todėl tai įgalina visų žymų briaunas matuoti lygiai toje pat kontrastingumo padėtyje.

Niveliavimo matuoklių kalibravimo įrenginyje KM ir EM fotogrametriniai vaizdai lyginami su galimybe juos perstumti vienas kito atžvilgiu rezultatų apdorojimo bloke, pavyzdžiui, asmeninio kompiuterio ekrane. Tai taip pat supaprastina įrenginio konstrukciją, nes vietoj sudėtingų mechaninių justavimo mechanizmų, ši operacija yra atliekama kompiuteriniu būdu.

Fotografuojant etaloninę ir kalibruojamąją matuoklę, dėl kontrolės greta jų galima įmontuoti papildomą etaloninę milimetrinę skalę arba analoginę matuoklę, kurią naudodami skaitmeninių niveliavimo matuoklių vaizdų rezultatų analizei kompiuteryje, galėtume išilgai skalių atlikti atskaitymus tarp etaloninės milimetrinės skalės, etaloninės ir kalibruojamosios matuoklės skalės žymų padėčių. Skalės padalos nuskaitomos rodykle, sujungta su analizuojančiuoju langu – diafragma. Vietoj skalės galima naudoti ir kompiuterines ilgio atskaitos priemones, pavyzdžiui, AutoCad'o arba kitos grafinio programinio aprūpinimo koordinatinių tinklėlių.

Principinė kalibravimo įrenginio schema (2.2 pav.): 1 – kalibruojamos matuoklės fotogrametrinis vaizdas, 2 – etaloninės matuoklės fotogrametrinis vaizdas, 3 – analizuojanti diafragma, 4 – fotokameros pikselių matrica, 5 – atskaitymo skalė, 6 – atskaitymo indikacinė rodyklė.



2.2 pav. Principinė kalibravimo sistema

Fig. 2.2. Principal system of calibration

Kompiuterio ekrane projektuojamas kalibruojamos matuoklės fotogrametrinis vaizdas 1 ir lygiagrečiai jam – etaloninės matuoklės fotogrametrinis vaizdas 2. Ekrane jie orientuojami lygiagrečiai ir gali būti perstumti vienas kito atžvilgiu, sutapatinant jų pradžias. Tai gali būti ir neatliekama, nes pradinė jų tarpusavio padėtis gali būti įvertinta koordinacių vertėmis matavimo metu. Ant abiejų matuoklių vaizdų uždėta analizuojanti diafragma 3, o išvardintų elementų apačioje yra parodyta fotokameros pikselių matrica 4. Lygiagrečiai matuoklių vaizdai yra parodyta nejudanti atskaitymo skalė 5, kurios atžvilgiu gali slankioti atskaitymo indikatoriainė rodyklė 6, nejudamai sujungta su analizuojančia diafragma 3.

Pradinėje padėtyje perslenkant analizuojančią diafragmą 3 su rodykle 6, yra atskaitoma pradinė matuoklės brūkšnių padėtis. Tai daroma diafragmą 3 pastatant ant pradinių brūkšnių ir kompiuterio koreliacijos bloke fiksuojant tam tikrą koreliacijos koeficiento vertę. Toliau pasirinktu žingsniu diafragma 3 perstumiami išilgai matuoklių vaizdo, diafragmos padėtis patikslinama ją perstumiant iki tokios padėties ties matuojamąja matuokle 1, kad koreliacijos koeficientas bus lygus pradiniam pasirinktam koreliacijos koeficientui. Užfiksuojama diafragmos koordinacinė padėtis pagal skalę 5, rodyklę 6 arba kompiuterio grafinę koordinacių sistemą. Tada tas pats padaroma su etaloniniu vaizdu 2, vėl patikslinant diafragmos padėtį koordinacinėje sistemoje iki pasirinktosios koreliacijos koeficiento vertės, tik dabar ją fiksuojant iš vaizdo 2. Gautųjų verčių

skirtumas rodo dviejų matuoklių skalių žymų padėčių linijinę paklaidą. Procedūra kartojama iki viso kalibruojamųjų matuoklių ilgio.

2.2. Skaitmeninių vaizdų savybės

Fotometrinis niveliavimo matuoklių skalių žymų kalibravimas yra pagrįstas skaitmeninių vaizdų matricos elementų analizės taikymu.

Skaitmeninių vaizdų kokybei pagerinti bei vaizdinei informacijai automatiniam apdorojimui tinkama forma pateikti taikomi vaizdų apdorojimo metodai. Šiais metodais yra keičiamos skaitmeninių nuotraukų charakteristikos, o kompiuterinės regos (matymo) principais skaitmeniniuose vaizduose atpažįstami taškai.

Skaitmeninių vaizdų apdorojimo procesus sudaro šie pagrindiniai etapai:

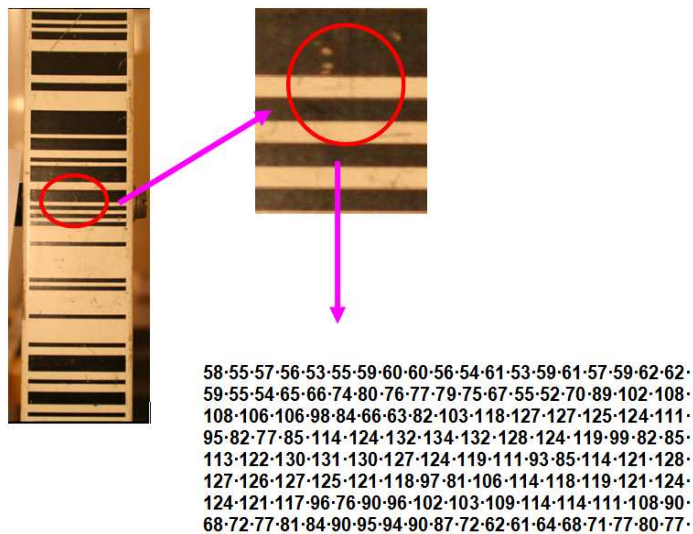
- gavyba, tai aukštos kokybės (ryškaus kontrasto, ryškumo, išraiškingumo) fotografinio vaizdo sukūrimas, fotografuojant objektus skaitmeninėmis kameromis;
- išsaugojimas ir suglaudimas, tai labai didelės apimties skaitmeninių vaizdų pertvarkymas, sumažinant jų užimamos kompiuterio atminties talpą. Efektyvus vaizdų suglaudimas, išsaugojimas bei išdėstymas yra vienas iš svarbiausių vaizdų apdorojimo uždavinių;
- radiometrinių savybių gerinimas, tai fotografinių vaizdų spalvinės sklaidos vienodinimas;
- glodinimas – atsitiktinių vaizdo „šiukšlių“ ar „triukšmų“ šalinimas, vaizdų kraštų išryškinimas;
- segmentavimas – vaizdų skaidymas, apibrėžiant segmentų ribas;
- vizualizavimas.

Didėjant skaitmeninių vaizdų skiriamajai gebai, nuolat tobulinant skaitmenines fotokameras, skenerius bei vaizdų apdorojimo programinę įrangą, skaitmeninės fotogrametrijos technologijas galima plačiai taikyti įvairiose srityse. Šiuo atveju šias technologijas panaudosime kodinių niveliavimo matuoklių tikslumo tyrimams (Wolf *et al.* 2000, 2006; Ruzgienė 2008).

Kiekvienas skaitmeninių vaizdų matricos elementas vadinamas vaizdo elementu – pikseliu (angl. *Pixel* yra *picture element*) reiškia vaizdo rastro ląstelės plotą. Kai vaizdo elemento plotas yra labai mažas, pikseliai yra vadinami vaizdo taškais (Linder 2006, Robinson 1995).

Pikseliuose telpa tam tikras informacijos kiekis. Pikselio reikšmė priklauso nuo registruojamo prietaiso ir kompiuterinės įrangos savybių. Dažniausiai yra taikomas nuo 0 iki 255 pikselio reikšmių diapazonas (2.3 pav.). Tokio diapazono spalvos sklaidą skiria žmogaus akis. Nespalsvotojų fotonuotraukų pikselių reikšmės reiškia pilkos spalvos sodrumą (pilkėjimą nuo baltos iki juodos spalvos).

Kai pikselio reikšmė 0 yra visiškai juoda spalva, kai 255 balta. (Richards *et al.* 2006).



2.3 pav. Skaitmeninio vaizdo pateikimas identifikavus pikselius

Fig. 2.3. Digital image presentation of the identity of the pixel

Apdorojant skaitmeninius vaizdus, nustatoma pikselio padėtis vaizdo koordinatinių sistemoje (xy). Vaizdo koordinatinių sistemos ašys yra skaitmeninio vaizdo matricos išorėje 0,5 pikselio dydžio atstumu. Pikselio dydis vaizdo koordinatinių sistemoje yra $\Delta x \times \Delta y$. Eilutės ir stulpeliai yra indeksuojami žingsniu i ir j . Indeksus padauginus iš Δx ir Δy randama pikselio padėtis skaitmeninio vaizdo koordinatinių sistemoje. Automatiškai identifikavus pikselius, nustatomos jų koordinatės x ir y .

Fotografinį (analoginį) vaizdą apibrėžia tolydžioji (nenutrūkstamoji) funkcija $f(x,y)$, čia x ir y taškų stačiakampės koordinatės.

Taikant matematinius modelius (matricas ar pikselių masyvus) vaizdai pateikiami skaitmenine forma (Wolf *et al.* 2000, 2006).

Skaitmeninė fotonuotrauka yra tolydusis vaizdas. Šis vaizdas paverčiamas skaitmeniniu, skaidant tolydžiąją funkciją. Jis gaunamas sudarant matricą $N \times M$ iš N eilučių ir M stulpelių bei įvertinant spalvų intensyvumą. Kiekvieno diskrečiojo vaizdo spalvų sodrumas išreiškiamas pikselio bitų skaičiumi. Skaitmeninio vaizdo matrica išreiškiama tokiu pavidalu:

$$g(x,y) = \begin{pmatrix} g(1,1) & g(1,2) & g(1,3) & \dots & g(1,M) \\ g(2,1) & g(2,2) & g(2,3) & \dots & g(2,M) \\ \dots & \dots & \dots & & \dots \\ g(N,1) & g(N,2) & g(N,3) & \dots & g(N,M) \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

čia $g(N,M)$ – spalvų intensyvumas; M – skaitmeninio vaizdo stulpelių skaičius; N – eilučių skaičius; x,y – skaitmeninio vaizdo (pikslio) koordinatės (x – stulpelis, y – eilutė).

Skaitmeninio vaizdo geometrinė skiriamoji geba rodo skaitmeninio vaizdo dydį, t. y. pikselių kiekį, kuris priklauso nuo pikslio dydžio (Ruzgienė 2008).

2.3. Skaitmeninė ir spalvinė niveliavimo matuoklių skalių žymų aprašymo forma

Grafiniai vaizdai, pateikiami skirtingais formatais: BMP ir JPG (JPEG). BMP (BitMap) – pats pavadinimas sako, kad tai yra tiesiog "bitų žemėlapis". Kiekvienas grafinis vaizdas sudarytas iš taškų, kur BMP formate kiekvienam taškui koduoti yra naudojami 1, 4, 8 arba 24 bitai. Atitinkamai 1 bitu koduotas paveikslėlis turės 2 spalvas (juoda – balta); 4 bitais – 16 spalvų; 8 bitais – 256 spalvas; o pats kokybiškiausias (bet ir užimantis daugiausia vietos) paveikslėlis bus užkoduotas 24 bitais ir turės daugiau nei 16 milijoną skirtingų galimų atspalvių. Koduojant 24 bitais, kiekvieno taško spalva išreiškiama raudonos (R), žalios (G) ir mėlynos (B) komponentių intensyvumu (256 intensyvumo lygiai). Labai paprasta paskaičiuoti: tarkim, 800x600 pikselių ir 24 bitų (3 baitai) BMP formato paveikslėlio dydis bus $800 \times 600 \times 3 = 1\,440\,000$ baitų. Realiai failo dydis bus keliasdešimt baitų didesnis, nes pradžioje failo dar yra informacija apie failo formatą, dydį ir pan. Taigi, visai nesvarbu paveikslėlio turinys – ar jis tiesiog bus vienos spalvos (tarkim, baltas), ar tai bus kokybiška nuotrauka su smulkios detalėmis – vis tiek abu šie paveikslėliai užims vienodą kiekį atminties.

BMP – tai pats paprasčiausias grafinis formatas. BMP paveikslėlis gali būti šiek tiek suglaudintas pasinaudojus RLE algoritmo modifikacijomis. Šis algoritmas paprasčiausiai sutankina informaciją, pakeisdamas iš eilės sekančių vienos spalvos taškų seką tam tikru kodu. RLE beveik nesumažina fotografijų, kuriose gausu daug skirtingų spalvų, bet paprastiems paveikslėliams gali būti gana efektyvus.

JPG (JPEG) – Joint Photographic Experts Group standartizuotas formatas. Skirtingai nei BMP, šiuo formatu koduojant paveikslėlį, yra netenkama dalies informacijos, paveikslėlio dydis „suspaudžiamas“ 10–20 kartų – priklausomai

nuo suspaudimo laipsnio ir, aišku, paties paveikslėlio. Dažniausiai šis formatas naudojamas fotografijų, dailės kūrinių tipo paveikslėliuose. Kodavimas JPG formatu remiasi tuo, kad žmogaus akis neskiria, tarkim, 16 milijonų skirtingų atspalvių; akis jautresnė spalvos šviesumui, nei jos atspalviui. Taigi koduojant šiuo formatu, artimi atspalviai koduojami vienodai, tokiu būdu sutaupant atminties. Šiuo formatu koduotos nuotraukos praktiškai nesiskiria nuo realių. Tačiau JPG formatas nenaudotinas šiais atvejais:

- kai paveikslėlį sudaro dideli vieno atspalvio plotai;
- kai paveikslėlyje naudojama mažai spalvų;
- kai paveikslėlyje yra kontrastingi perėjimai – tarkim, juodo teksto balto fone atveju;
- kai naudojamas smulkus (kelių pikselių) šriftas;
- juodai – baltiems paveikslėliams.

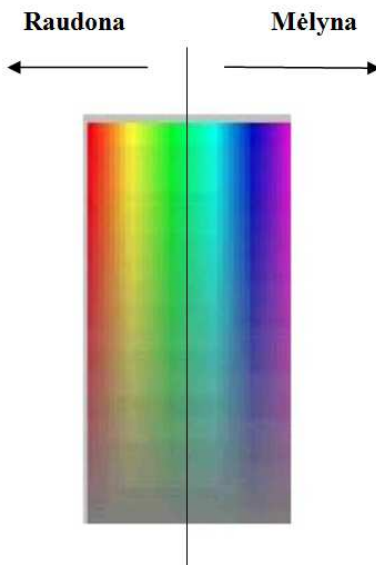
JPG bei BMP nuotraukų formatų naudojimas, privalumai bei trūkumai yra pateikti 2.1 lentelėje.

Personalinio kompiuterio grafinio vaizdavimo sistema gali atkurti spalvotą taškelių matricą – mažus šviesos taškelius tinklelio struktūroje. Toks vaizdas vadinamas bitų žemėlapiu. Bitų žemėlapius aprašo grafinių duomenų vaizdavimui skirti matricos taškų spalvų kodų rinkiniai. Galimų vaizdo spalvų paletė pavaizduota 2.1 paveiksle.

2.1 lentelė. JPG, BMP formatų naudojimas bei savybės

Table 2.1. JPG, BMP formats and features

Formatas	Naudojimas	Privalumai	Trūkumai
JPG	Pritaikytas labai efektyvus sutankinimo metodas. Įrašant šiuo metodu, vaizdas iškraipomas. Kuriant failą galima nurodyti sutankinimo laipsnį. Kuo jis didesnis, tuo failas užima mažiau vietos, bet pablogėja vaizdo kokybė. Saugomi tik turintys 16,8 mln. spalvų vaizdai. Dažnai naudojamas internete.	Populiarus, gerai sutankinami duomenys, greitai perskaitomas	Iškraipo vaizdą, lėtai įrašomi.
BMP	Naudojamas operacinėse sistemose OS/2, Windows. Kiekvienoje sistemoje yra skirtinga vidinė struktūra, bet tas pats plėtinys. Vis daugiau programų gali skaityti abi šio formato atmainas.	Populiarus, duomenys greitai perskaitomi ir greitai įrašomi.	Užima daug atminties laikmenoje.

**2.4 pav.** Spalvų paletė**Fig. 2.4.** Color palette

Ekrane matomų arba spausdinamų spalvų skaičius priklauso ne tik nuo jų kodavimo būdo, bet ir nuo kompiuterio įrangos savybių. 16 milijonų spalvų grafinės sistemos vadinamos „realių spalvų“ (true color) sistemomis, nes tik šiuo atveju vaizdai parodomi realiomis spalvomis su visais atspalviais. Realųjų spalvų sistemose taškų spalvos koduojamos 24 bitais, o šie bitai suskaidomi į tris 8-bitų grupes, kurios aprašo raudonos, žalios ir mėlynos spalvų komponentes (vadinamas RGB spalvomis). Kiekvieną tokią komponentę galima atvaizduoti 0–255 intervalo skaičiumi, kuris rodo jos intensyvumą. Pavyzdžiui, jei visos trys komponentės lygios 0, turime juodą tašką. Jei raudonoji komponentė lygi 0, o žalia ir mėlyna – lygios 255, turime ciano spalvos tašką. Vaizdo spalvas valdyti padeda specialios spalvų lentelės, kurios vadinamos paletėmis. 2 pav. parodyta, kaip atrodo tokia lentelė su 24-bitų RGB spalvų reikšmėmis. Naudojant paletes, bitų žemėlapyje saugomi ne spalvų komponentių kodai, o spalvų paletės lentelės indeksai.

Duomenys apie spalvas yra saugomi spalvų indeksais. Pavyzdžiui, spalvų rinkinys koduojamas 1 baitu lygiu 256 spalvoms. Rezultatų pavyzdys yra pateiktas 2.5 paveiksle.

Spalvos indeksas			
1			
2			
3			
....			
....			
254			
255			

Eil.Nr.	Spalva	Spalvos kodas
0	Spalva1	Kodas1
1	Spalva2	Kodas2
...	...	...
...	...	...
254	Spalva255	Kodas255
255	Spalva256	Kodas256

2.5 pav. Spalvų kodavimo indeksai

Fig. 2.5. Color coding index

Spalvų rinkinys koduojamas:

1 baitu (*Colors*) – 256 spalvos,

2 baitais (*High Color*) – 65536 spalvos,

3 baitais (*True Color*) – 16777216 spalvų.



2 baitai



3 baitai

2.6 pav. Spalvų kiekis priklausomai nuo kodų saugojimui skirtų baitų
 Fig. 2.6. The color codes depending on the amount of bytes for storage

Spalvų kodavimas yra vienodas. Spalvų rinkinys koduojamas 1 baitu lygiu 216 spalvoms. Naudojamas Web – grafikoje, nes ne visi kompiuteriai atvaizduoja 256 spalvas. Ekrane išskleistas skaitmeninis pikselinis vaizdas nepriklausomai nuo vaizdo saugojimo formato, susideda iš atskirų taškų (pikselių) bei kiekvienas taškas turi savo skaitmeninę reikšmę. Reiškia kad kiekvienas vaizdas turi savo originalų reikšmių rinkinį. Lyginant taškų reikšmių rinkinius galima nustatyti vaizdo autentiškumą.

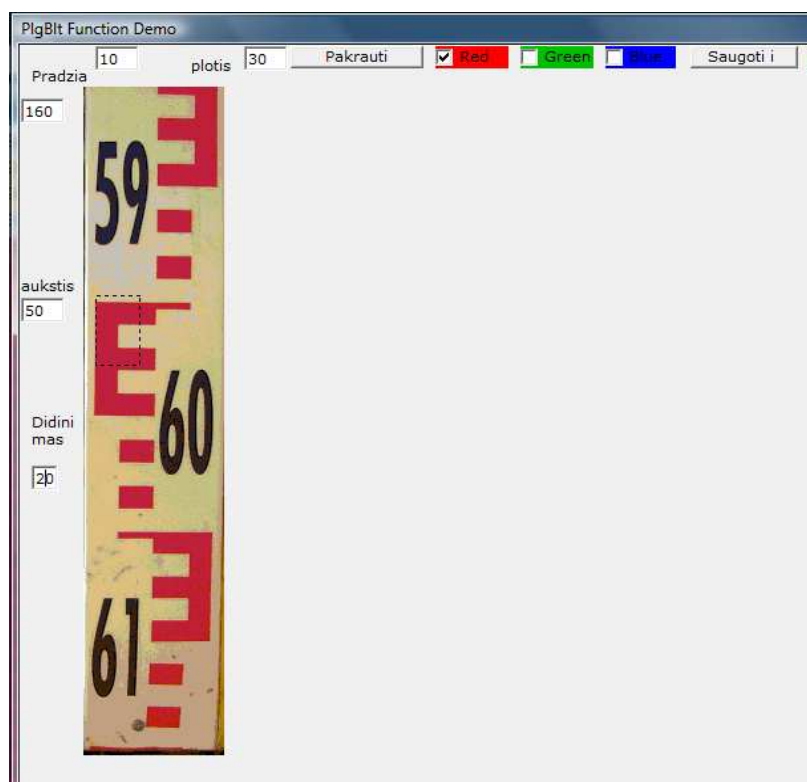
Norėdami įvertinti niveliavimo matuoklių skalių žymų padėčių kalibravimo tikslumą buvo sukurta kompiuterinė programa PIKSELIS. Taip pat atlikti tyrimai niveliavimo matuoklių skalių žymų padėčių nuotraukų fragmentus verčiant į skaitmeninę formą. Programa PIKSELIS buvo sukurta naudojant programinį paketą MATLAB. Programos tekste yra aprašomos pagrindinės funkcijos: nuotraukos pikselių rinkinių spalvų atpažinimas nuo 0 iki 256 spalvų, operatorių pasirinkimas, konstantos veiksmų pasirinkimui. Aprašomas programavimo algoritmas raudonai (red), žaliai (green) ir mėlynai (blue) komponentėms pasirinkti. Vėliau yra atidaromas langas bylos pasirinkimui. Perpiešiamas paveikslas su naujomis koordinatėmis, nurodomos analizuojamojo lango pradžios koordinatės, aukštis ir plotis. Pradedamas ciklas duomenų srauto tekstei bylai, jos eilučių bei stulpelių ilgis, numeracija.

Vėliau aprašomas ciklas spalvos intensyvumui pasirinkti. Nustatomi raudonos spalvos, žalios ir mėlynos spalvų intensyvumo ciklai bei eilučių bei stulpelių didinimo parametrai. Visi duomenys yra užrašomi į tekstinę bylą arba pateikiami grafiškai. Toliau nustačius pradines spalvų reikšmes nuo 0 iki 255 yra skaičiuojamos ir nupiešiamos profilogramos X, Y ašimis. Ištrinami tarpiniai duomenys ir objektai iš kompiuterio laikinosios atminties bei atnaujinamas paveikslas tolimesniai darbui.

Pateikiamas programinis ciklas skirtas pikselių reikšmių įrašymui ant paveikslo (grafinei informacijai pavaizduoti). Algoritmas kartojamas kitoms spalvinėms komponentėms. Programos pabaigoje aprašomas ciklas darbo užbaigimui.

Programos algoritmas yra pateiktas A priede.

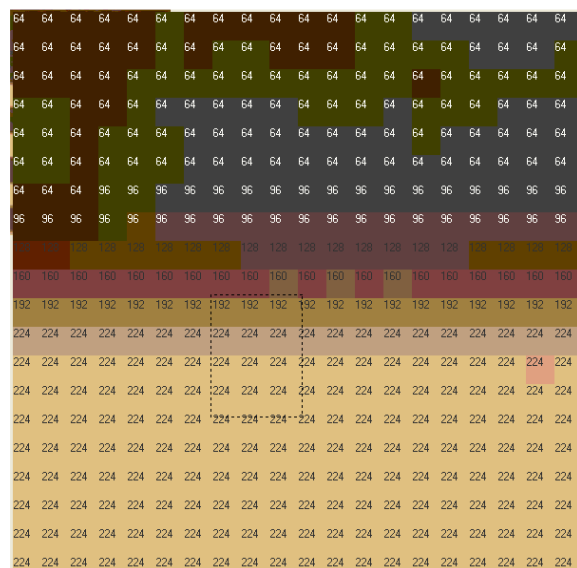
2.7 paveiksle matomas programos PIKSELIS darbalaukis. Jame galime nustatyti ir nurodytu žingsniu keisti analizuojančio lango buvimo vietą, jo dydį skaitmeninėje nuotraukoje. Taip pat galime keisti raudonos, žalios ir mėlynos spalvų komponentes (RGB spalvas).



2.7 pav. Programos PIKSELIS programinis langas
Fig. 2.7. Software PIKSELIS program window

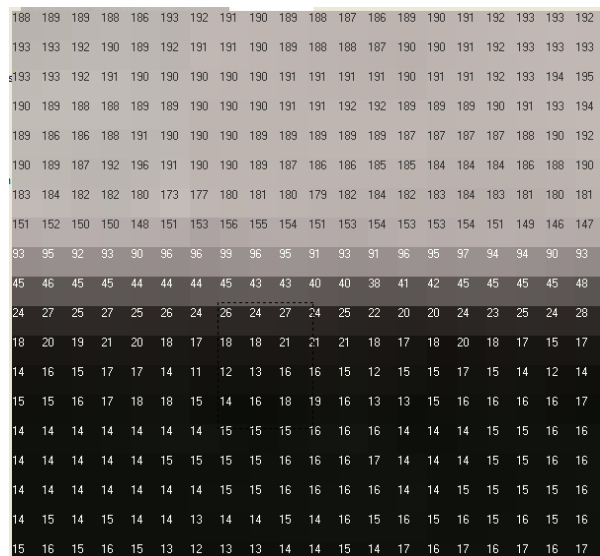
Sukurtąją programą galima gauti skaičių matricos variantą (2.8 pav.–2.11 pav.) išsaugoti personaliniame kompiuteryje *TXT* formatu arba visą informaciją pateikti grafiškai, prie kiekvieno pikselio užrašant jo vertę. Visos nuotraukos naudotos tyrime buvo transformuotos į plokštumą, kad būtų panaikinta fotokameros objektyvo distorsija.

Tyrimo metu buvo naudojami niveliavimo matuoklių kodinių skalių žymų padėčių skaitmeninių nuotraukų fragmentai formatuose: JPEG, BMP 16 bitų, BMP 256 bitų, BMP 24 bitų, BMP MONOCHROME, TIFF ir GIFF. Taip pat buvo eksperimentuojama su raudonos, žalios ir mėlynos spalvų komponentėmis (vadinamomis RGB spalvomis). Įvairių nuotraukų formatų pavyzdžiai matomi analizuojančiame lange yra pateikti 2.8–2.11 paveiksluose.



2.10 pav. BMP 256 bitų formatas

Fig. 2.10. 256-bit BMP format



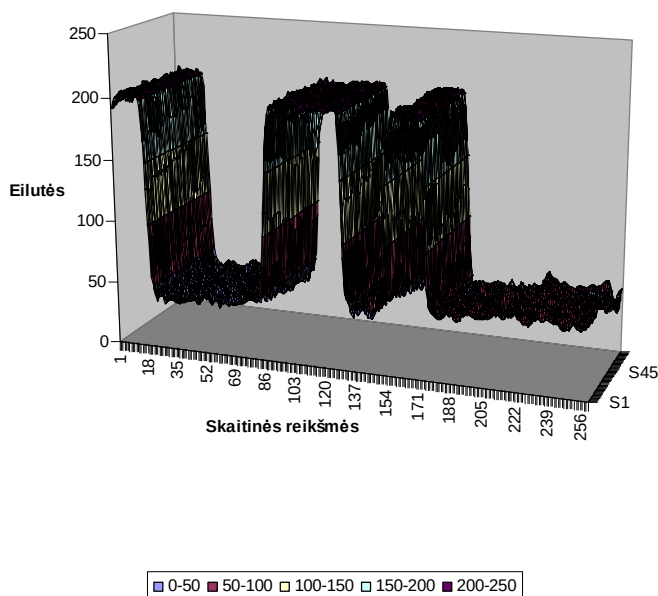
2.11 pav. BMP 24 bitų formatas

Fig. 2.11. 24-bit BMP format

Gautose kodinių skalių skaičių matricose tamsesnės pikselių spalvos išreiškiamos mažesnės vertės skaičiais, o šviesesnės – didesniais (intervalas nuo 0 iki 256). Šias vertes pagal skaitmeninės nuotraukos pikselių spalvas suteikia kompiuterinė programa PIKSELIS (2.8–2.11 pav.). Šiuose paveiksluose pikselių skaitmeninės vertės yra susietos su konkrečia gardele ir pavaizduotos grafiškai. Geriausiai briaunos tarp niveliavimo matuoklių skalių tamsių ir šviesių žymų yra matomos, kai skaitmeninės nuotraukos formatas yra 256 bitai (2.10 pav.). Šiame paveiksle matome briaunos defektus esančius centrinėje kodinės skalės dalyje, kur skaitinės vertės yra 96 ir daugiau negu 130.

Dėl to galime nustatyti ribą tarp juodų ir baltų matuoklės skalės žymų briaunų arba pastebėti kodinės skalės mechaninius pažeidimus (2.8–2.11 pav.).

Fotometriniame niveliavimo matuoklių skalių žymų padėčių kalibravimo būde svarbiausias dalykas yra nustatyti ribą tarp šviesesnių spalvų žymų padėčių ir tamsesnių. Tam tikslui geriausiai yra tinkamas BMP 256 bitų formatas, kadangi jame matosi pažeistos matuoklių skalių žymų vietos arba skalių gamykliniai netikslumai (2.12 pav.).

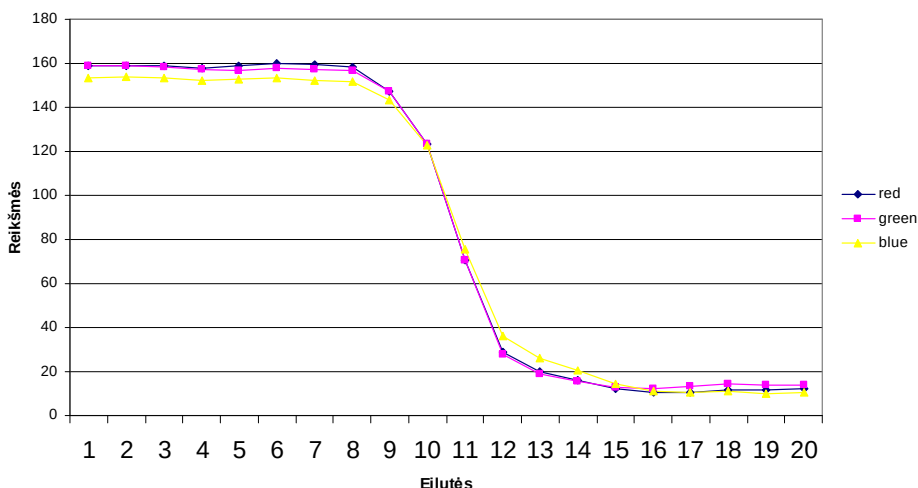


2.12 pav. Kodinės skalės ir jos kiekvieno pikselio verčių vidurkių grafikas

Fig. 2.12. Coded scale and average values of each pixel graph

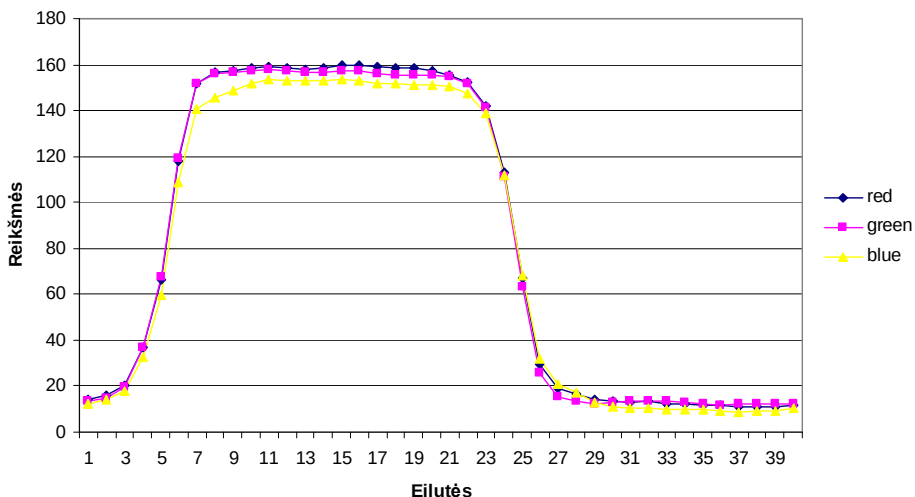
Sukurtoje kompiuterinėje programoje PIKSELIS galime keisti raudonos, žalios ir mėlynos spalvų spektrą, pasirinkti kuri spalva bus dominuojanti koduojant vaizdą.

Šios programos darbo rezultatai pateikti 2.13 ir 2.14 paveiksluose. Čia niveliavimo matuoklių žymų padėtyms pavaizduotos raudonos, žalios ir mėlynos spalvų spektruose. Šiuose paveiksluose matome, kad grafikai atvaizduoti minėtomis spalvomis mažai skiriasi vienas nuo kito ir tai įrodo sukurtos programos veiksmingumą. Eksperimentas buvo vykdomas tose niveliavimo matuoklės vietose, kur kodinės skalės žymos keičiasi iš tamsios spalvos į šviesią (mažiausia spalvinė reikšmė raudonojoje komponentėje buvo 10,45, didžiausia 160,25; žaliojoje komponentėje mažiausia – 13,95, didžiausia 158,75; mėlynoje mažiausia reikšmė – 10,4, o didžiausia 153,65).



2.13 pav. Pirmos kodinės skalės fragmento pikselių reikšmių pagal RGB komponentes

Fig. 2.13. The first piece of coded scale pixel values in RGB components



2.14 pav. Antros kodinės skalės fragmento pikselių reikšmių pagal RGB komponentes

Fig. 2.14. The second piece of coded scale pixel values in RGB components

Panaudojus gautus skaičių matricos rezultatus nustatome niveliavimo matuoklės skalės žymos storius, kurie bus reikalingi tolimesniam matuoklių kalibravimui.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Išanalizavus skaitmeninius niveliavimo matuoklių vaizdų apdorojimo variantus, nustatėme, kad tyrimams tinka BMP 256 bitų formatas, kadangi jame matosi pažeistos matuoklių skalių žymų vietos arba skalių gamykliniai netikslumai.
2. Taikant skaitmeninių vaizdų apdorojimo matematinius modelius galime juos pateikti matricę ar pikselių masyvų skaitmenine forma.
3. Fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų padėčių kalibravimo būde svarbiausia yra nustatyti ribą tarp šviesesnių spalvų žymų ir tamsesnių.
4. Sukurta kompiuterinė programa leidžia niveliacijos matuoklių žymų padėčių skaitmeninių nuotraukų pikselių reikšmėms suteikti skaitines vertes (nuo 0 iki 256). Tamsesnės pikselių spalvos išreiškiamos mažesnės vertės skaičiais (nuo 0 iki 20), o šviesesnės – didesniais (nuo 20 iki 160).

5. Atlikus tyrimus su raudonos, žalios ir mėlynos spalvų komponentėmis (vadinamomis RGB spalvomis), 2.13 ir 2.14 paveiksluose pavaizduotose grafikuose matome, kad skalių žymų padėtys atvaizduotos raudonos, žalios ir mėlynos spalvų spektruose sutampa ir įrodo sukurtos programos veiksmingumą.

Fotometrinis niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties kalibravimas

Šiame skyriuje yra išanalizuotas fotometrinis kodinių niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties kalibravimo būdas. Gauti rezultatai yra palyginami Suomijos Geodezijos institute naudojamo vertikaliojo komparatoriaus bei niveliavimo matuoklių gamintojų deklaruojamais tikslumo duomenimis. Pateikti niveliavimo matuoklių žymų padėties kalibravimo būdo tikslumo analizės rezultatai.

Skyriaus tematika atlikti tyrimai paskelbti autoriaus straipsniuose bei tarptautinių, respublikinių konferencijų medžiagoje. (Aksamitauskas *et al.* 2009; Giniotis *et al.* 2007; Aksamitauskas, Rekus 2010; Aksamitauskas *et al.* 2010, Rekus *et al.* 2008, Giniotis *et al.* 2008, Aksamitauskas *et al.* 2005; Rekus 2006; Rekus 2007; Rekus, Aksamitauskas 2008; Rekus 2009).

3.1. Niveliavimo matuoklių skalių žymų padėties fotometrinis kalibravimas ir tikslumo tyrimas

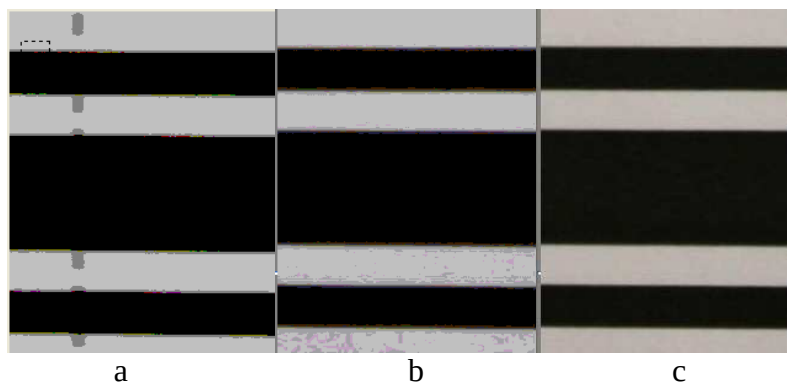
Skaitmeninė fotokamera *Canon EOS 350D*, kuria buvo atliekamos kodinių matuoklių skalių žymų skaitmeninės nuotraukos, buvo kalibruota ir nustatyti vidinio orientavimo elementai – simetrinės ir nesimetrinės distorcijos. Fotokamera kalibruota *Technet* ir *Tcc* kompiuterinėmis programomis, naudojant specia-

lų standą su žinomomis tašku koordinatėmis. Skaitmeninės fotokameros skiriamoji geba yra 8 milijonai vaizdo elementų (pikselių). Kalibravimui panaudotas specialus standas (Pictran 2004, Labe 2004). Įvertintas gautų rezultatų tikslumas. Fotokameros kalibravimo rezultatai naudojami tolesniam nuotraukų apdorojimui (Sužiedelytė–Visockienė 2007).

Visos tyrimė naudotos nuotraukos buvo transformuotos į plokštumą, kad būtų panaikinta fotokameros objektyvo distorcija ir kad objektai fotonuotraukose būtų detalesni. Mažiausia fotokameros objektyvo distorcija buvo fotokameros objektyvo centre.

Kodinių matuoklių kalibravimo tikslumo įvertinimui bei kodinių niveliavimo matuoklių kodinių skalių žymų padėčių nustatymui, panaudojant kompiuterinę programą PIKSELIS, buvo atlikti tyrimai skaitmeninių kodinių niveliacijos matuoklių nuotraukų dalis verčiant į skaitmeninę informaciją.

Buvo eksperimentuojama matuojant kodinių niveliavimo matuoklių skalių skaitmeninių nuotraukų fragmentus formatuose: JPEG, BMP 16 bitų, BMP 256 bitų, BMP 24 bitų, BMP MONOCHROME, TIFF ir GIFF. Kodinių skalių žymų briaunoms nustatymui ir tyrimams atlikti pasirinktas BMP 256 bitų formatas, kadangi tiksliausiai matomos kodinių skalių briaunų ribos, tarp tamsių ir šviesių žymų ir buvo mažiausi iškraipymai skaitmeninėse nuotraukose (3.7 pav.).



3.7 pav. BMP 16 bitų (a), BMP 256 bitų (b), BMP 24 bitų (c) kodinių niveliavimo skalių fragmentai

Fig. 3.7. 16-bit BMP (a), 256-bit BMP (b), BMP 24 bit (c) of code snippets leveling scales

3.7 paveiksle pateikti kodinių niveliavimo skalių fragmentai BMP 16 bitų, BMP 256 bitų, BMP 24 bitų skaitmeniniais formatais. Jame parodyta kodinės niveliacijos skalės centrinė dalis, nes šiose vietose yra mažiausi iškraipymai skaitmeninėse nuotraukose (Sužiedelytė–Visockienė 2007). Tamsesnės pikselių

spalvos išreiškiamos mažesnės vertės skaičiais, o šviesesnės – didesniais (nuo 0 iki 256). Tokiu būdu galime nustatyti ribą tarp juodų ir baltų kodinės skalės brūkšnių briaunų ir pastebėti kodinės skalės mechaninius pažeidimus.

Kodinių skalių žymų plotis buvo nustatytas panaudojus programinę įrangą naudojamą fotometriniam kalibravimui, į jos darbinį langą įkėlus kodinių skalių skaičių matricos rezultatus. Atliktų tyrimų tikslumo įvertinimui, kontrolei tų pačių kodinių skalių žymų pločiai buvo išmatuoti su mikroskopu UIM–21, Nr. 640072.

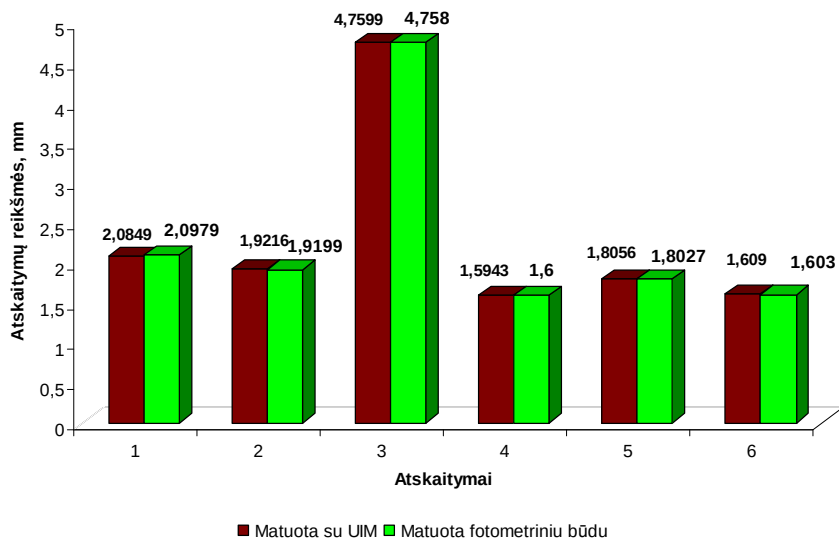


3.8 pav. Mikroskopas UIM-21, Nr. 640072

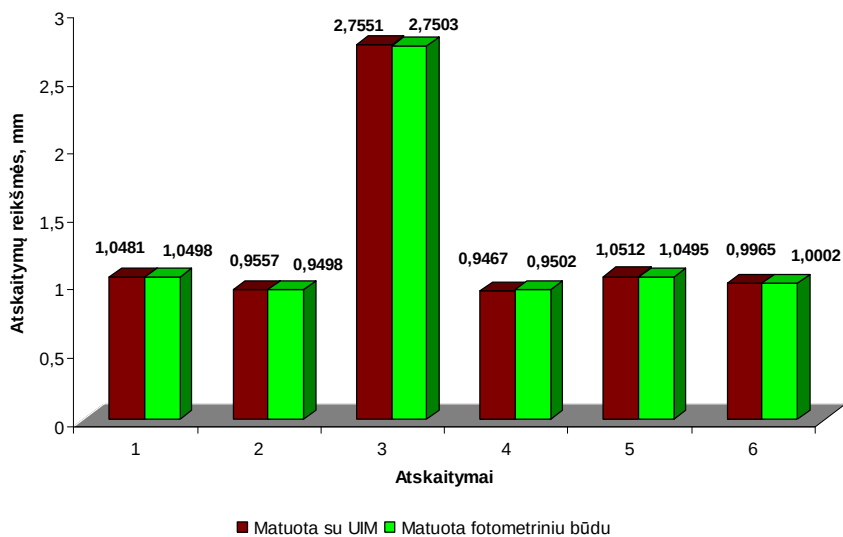
Fig. 3.8 Microscope UIM-21, No. 640072

Tyrimai buvo atliekami dviem etapais. Pirmiausia kodinės žymos (baltos ir juodos juostos) tam tikru intervalu ir skirtingu juostos pločiu buvo suprojektuotos kompiuterio ekrane ir atspausdintos popieriuje. Buvo atlikta po 5 matavimų ciklus kiekviename kodinės skalės žymos krašte. Kiekvienoje skalėje buvo po 7 kodinius elementus. Gautieji matavimų rezultatai bei jų skirtumai pateikti 3.1 lentelėje.

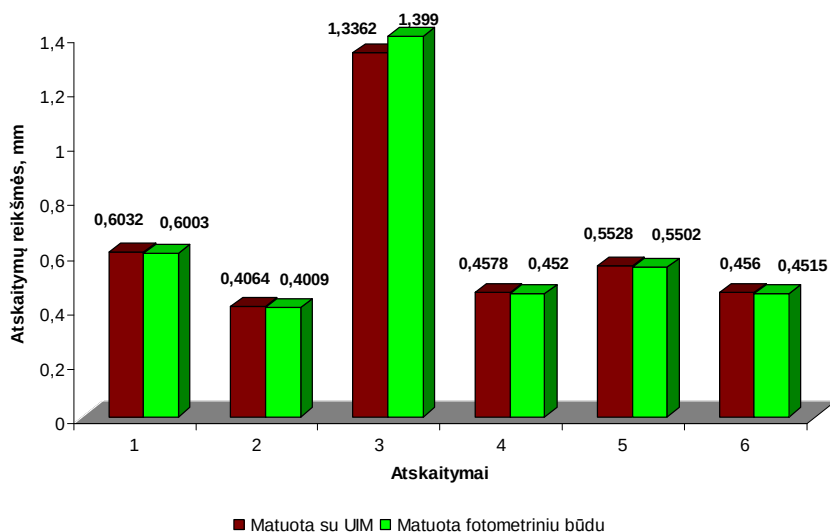
Pirmoje skalėje skirtumai nr.1 ir nr.2, trečiosios skalės skirtumas nr.3 gavosi labai didelis apie $10\ \mu\text{m}$ (3.9–3.12 pav.), todėl tolimesnėje analizėje jų nenaudosime (matyt, blogai buvo atlikti matavimai mikroskopu, stambios paklaidos). Kitų kodinių elementų matavimų skirtumai pirmoje, antroje ir trečioje kodinėse skalėse kito nuo $2\ \mu\text{m}$ iki $6\ \mu\text{m}$.



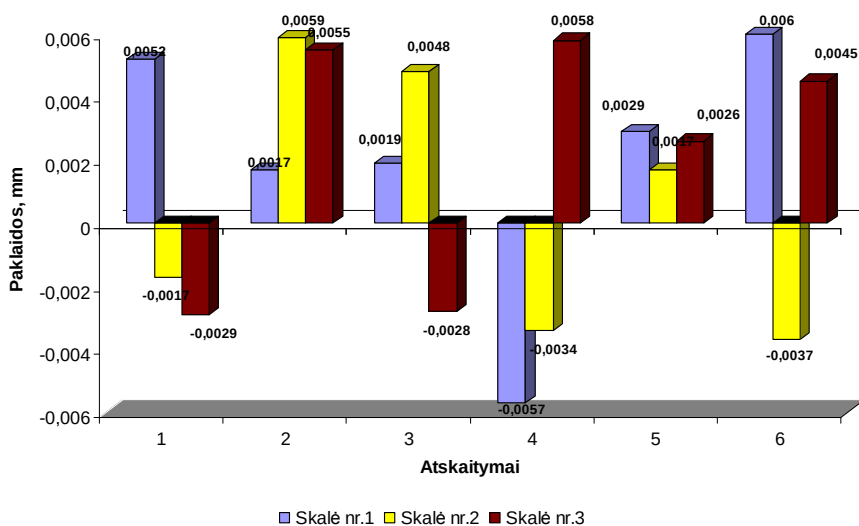
3.9 pav. Skalės nr. 1 matavimų fotometrinio būdu ir mikroskopu UIM-21 rezultatai
Fig. 3.9. The results of measurements of the scale no. 1 with photometric method and UIM-21 microscope



3.10 pav. Skalės nr. 2 matavimų fotometrinio būdu ir mikroskopu UIM-21 rezultatai
Fig. 3.10. The results of measurements of the scale no. 2 with with photometric method and UIM-21 microscope



3.11. pav. Skalės nr. 3 matavimų su fotometrinio būdu ir mikroskopu UIM-21 rezultatai
Fig. 3.11. The results of measurements of the scale no. 3 with with photometric method and UIM-21 microscope



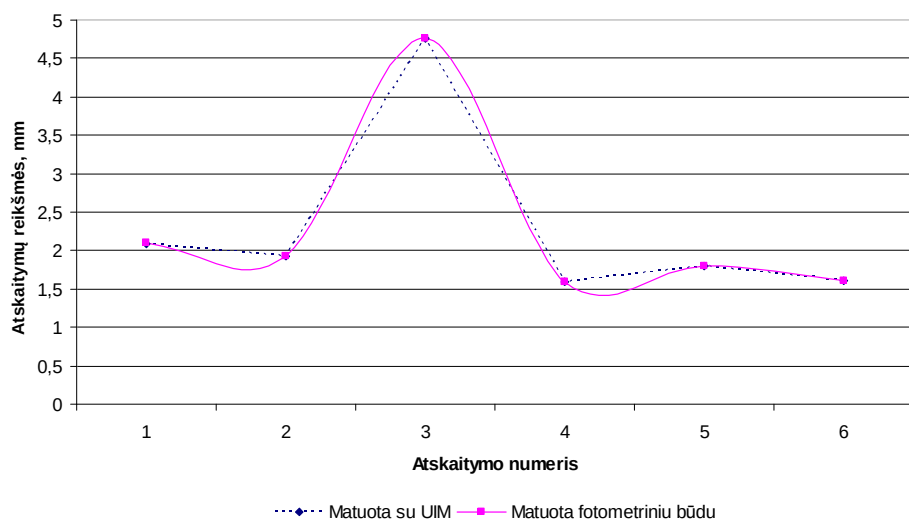
3.12 pav. Paklaidos matuojant su UIM ir fotometrinio būdu
Fig. 3.12. The errors measured with the UIM and photometric method

Įvertinus kodinių skalių brūkšnių pločius, matavimus atlikus mikroskopu ir fotometrinio kalibravimo būdu, tikslumas įvertintas 6 μm tikslumu.

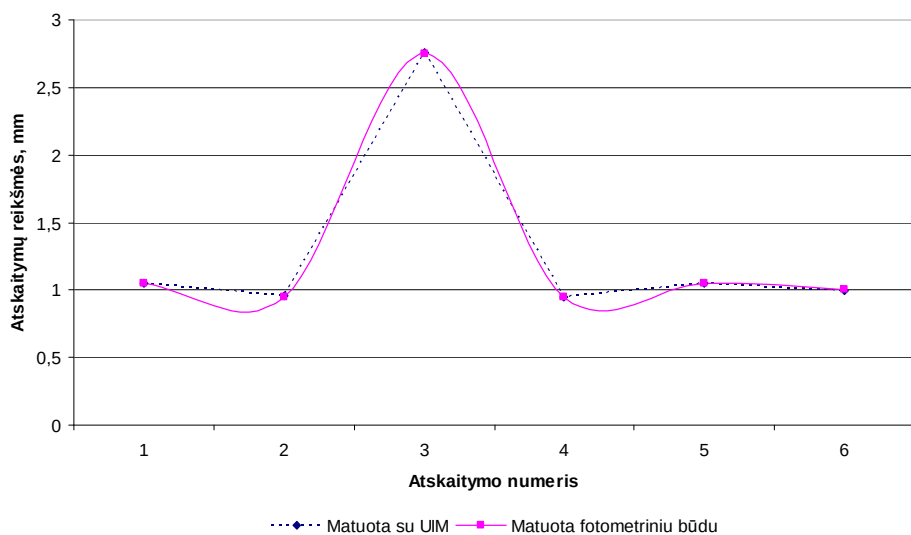
3.1 lentelė. Kodinių skalių brūkšnių pločiai, išmatuoti mikroskopu ir fotometriniu būdu
Table 3.1. Coded scale thickness of the lines microscope and measuring with photometric method

Skalė nr. 1			
Matav. eil. nr.	Kodinės skalės brūkšnių plotis, kai matuota su UIM, mm	Kodinės skalės brūkšnių plotis, kai matuota fotometriniu būdu, mm	Skirtumas Δ , mm
1	2,0849	2,0979	0,0052
2	1,9216	1,9199	0,0017
3	4,7599	4,758	0,0019
4	1,5943	1,6	-0,0057
5	1,8056	1,8027	0,0029
6	1,609	1,603	0,006
Skalė nr. 2			
Matav. eil. nr.	Kodinės skalės brūkšnių plotis, kai matuota su UIM, mm	Kodinės skalės brūkšnių plotis, kai matuota fotometriniu būdu, mm	Skirtumas Δ , mm
1	1,0481	1,0498	-0,0017
2	0,9557	0,9498	0,0059
3	2,7551	2,7503	0,0048
4	0,9467	0,9502	-0,0034
5	1,0512	1,0495	0,0017
6	0,9965	1,0002	-0,0037
Skalė nr. 3			
Matav. eil. nr.	Kodinės skalės brūkšnių plotis, kai matuota su UIM, mm	Kodinės skalės brūkšnių plotis, kai matuota fotometriniu būdu, mm	Skirtumas Δ , mm
1	0,6032	0,6003	-0,0029
2	0,4064	0,4009	0,0055
3	1,3362	1,399	-0,0028
4	0,4578	0,452	0,0058
5	0,5528	0,5502	0,0026
6	0,456	0,4515	0,0045

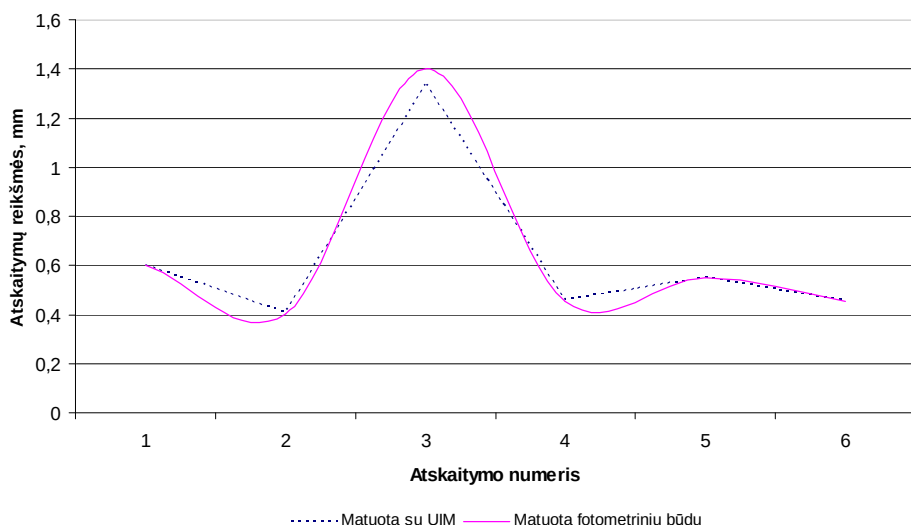
Išanalizavę 3.1 lentelėje esančius matavimų skirtumų rezultatus matome, kad mažiausias skirtumas yra apie 2 μm , o didžiausias neviršija 6 μm . Abiejų variantų matavimų tikslumas yra beveik vienodas, jų rezultatai mažai skiriasi.



3.13 pav. Skalės nr. 1 matavimų fotometrinio būdu ir mikroskopu UIM-21 rezultatai
Fig. 3.13. The results of measurements of the scale no. 1 with photometric method and UIM-21 microscope



3.14 pav. Skalės nr. 2 matavimų fotometrinio būdu ir mikroskopu UIM-21 rezultatai
Fig. 3.14. The results of measurements of the scale no. 2 with photometric method and UIM-21 microscope



3.15 pav. Skalės nr. 3 matavimų fotometrinio būdu ir mikroskopu UIM-21 rezultatai
Fig. 3.15. The results of measurements of the scale no. 3 with photometric method and UIM-21 microscope

Apibendrinti tyrimų rezultatai yra pateikti paveiksluose 3.13–3.15. Grafiuose matyti, kad atskaitymų reikšmės mažai skiriasi. Kiekvienoje skalėje buvo matuoti 6 kodiniai elementai, su skirtingais žymų pločiais. Pločiai skyrėsi nuo 2,0849 iki 0,4009 mm.

Antrajame tyrimų etape visos niveliavimo matuoklių kodinės skalės buvo fotografuojamos, nuotraukos apdorojamos fotogrametriškai (Sužiedelytė–Visockienė 2007). Panaudojus kompiuterinę programą PIKSELIS buvo gautos skalių žymų skaitinės vertės. Kodinių skalių brūkšnių storis buvo nustatytas panaudojus fotometrinių matuoklių skalių žymų briaunų kalibravimo būdo programinę įrangą, į jos darbinį langą įkėlus kodinių skalių skaičių matricos rezultatus. Tyrimų tikslumui įvertinti, tų pačių kodinių skalių brūkšnių storiai buvo išmatuoti mikroskopu UIM- 21, Nr. 640072.

Buvo atlikta 10 matavimų ciklų į kiekvieną kodinės skalės žymos kraštą. Kiekvienoje skalėje buvo po 20 kodinių elementų. Galutiniai matavimų rezultatai bei jų skirtumai pateikti C priede. Pirmame, antrame, trečiame ir ketvirtame matavimų cikluose buvo gauti didžiausi kodinių skalių žymų storių neatitikimai matuojant optiniu mikroskopu ir fotometrinio būdu: pirmame matavimų cikle, matavime nr. 3 skirtumas buvo 0,0099 mm, antrame matavimų cikle didžiausias skirtumas matavime nr. 13 buvo gautas 0,0076 mm. Trečiame ir ketvirtame matavimų cikluose didžiausi skirtumai buvo gauti matavimuose nr. 3 – 0,0077 mm.

Kituose matavimų cikluose didžiausias skirtumas tarp matavimų optiniu mikroskopu ir fotometriniu būdu matavimo rezultatais buvo 0,006 mm, o mažiausia – 0,0002 mm.

3.2. Fotometrinio kalibravimo būdo tikslumo palyginimas su kalibravimo laboratorijų rezultatais

Suomijos geodezijos institutas naudoja vertikalųjį sistemos kalibravimo komparatorių. Ten yra kalibruojamos ir VGTU Geodezijos instituto kodinės niveliavimo matuoklės (Paršeliūnas *et al.* 2000, Petroškevičius *et al.* 1998, 2004). Minėtame komparatoriuje įdiegtas lazerinis interferometras 5529A, kuriuo užduodamas kalibravimo metu pasirinktas ilgio standartas. Kalibruojant sistemą, nivelyru išmatuotas yra matuojamas aukščių skirtumas lyginamas su tikruoju lazeriniu interferometru gautu, aukščių skirtumu. Nustatomas 7,6 m. atstumas nuo skaitmeninio nivelyro iki matuoklės. Šis atstumas yra parenkamas kalibruojant visas matuokles. Skaitmeninio niveliavimo metodu matuoklės atskaitos apdorojimui nivelyru yra stebimas tam tikras kodinės matuoklės sektorius, o ne viena padala kaip įprastame metode. Iš to seka, kad artėjant prie matuoklės skalės viršaus ir apačios, atskaitos neapibrėžtis gali išaugti tiek, kad yra rekomenduojama atmesti maždaug 20 cm sektoriaus iš matuoklės apačios ir viršaus. Kiekviena sistema (nivelyras matuoklė) buvo kalibruota po du kartus, apimant visą matuoklės skalę pirmyn ir atgal naudojant 25 mm žingsnius. Mastelio vardikliai gauti iš tiesinės regresijos. Kiekvienai kodinei matuoklei buvo nustatyta pirmos kodo linijos padėtis. Taip pat buvo išmatuoti santykiniai atstumai nuo matuoklės pado apačios iki pirmos kodinės juostelės krašto. Nominalus atstumas buvo 43 mm.

1998–2004 m. keturios VGTU Geodezijos instituto precizinės kodinės matuoklės GPCL3 (Nr. 26598, 26599, 26600 ir 26605) kasmet kalibruojamos vertikalioju automatinio lazeriniu komparatoriumi Suomijos geodezijos instituto Nacionalinėje standartų laboratorijoje. Paskutinį kartą jos buvo kalibruotos 2004 m. kovo 2530 dienomis.

Kodinės matuoklės kalibruojamos vertikalioje padėtyje, kokioje jos būna niveliavimo metu. Matuojant atstumus nuo brūkšnio pradžios ir kaip galima arčiau matuoklės pado, nustatoma kiekvieno kodinės juostelės brūkšnio padėtis. Palyginamosios nominalios ir tikrosios padėties, rezultatai redukuojami į +20 °C temperatūrą. Tiriama kiekvienos kodinės matuoklės invarinės juostelės 2,930 m ilgio atkarpa. Suomijos geodezijos instituto Nacionalinėje standartų laboratorijoje nustatyta, kad matuoklės invarinės juostelės kiekvienos linijos vieta dėl temperatūros pokyčių ir linijų ženklinimo paklaidų skiriasi nuo nominalios padėties.

Todėl nustatomosios pataisos turi būti skaičiuojamos pagal pataisų regresijos lygtį arba grafiką. Pataisų regresijos lygčių bendras pavidalas:

$$\delta_k = k_3 + k_4 a_m + k_5 a_m^2 + \dots + k_N a_m^{N-3}, \quad (3.1)$$

čia $k_3, \dots, k_N$ – lygties koeficientai.

Kalibruojant gautos tokios matuoklių atskaitų pataisų lygtys. Atsiradusių dėl invarinės juostelės kodinių padalų paklaidų lygtys yra pateiktos 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Matuoklių atskaitų pataisų lygtys

Table 3.3. Instrumentation correction equation samples

Metai	Matuoklės	
	Nr. 26598	Nr. 26599
1998	$\delta_k = -0,0040a_m - 0,6719$	$\delta_k = -0,0033a_m + 0,9675$
1999	$\delta_k = -0,0084a_m + 1,1459$	$\delta_k = -0,000009a_m - 1,0364$
2000	$\delta_k = 0,0028a_m - 0,2567$	$\delta_k = 0,0023a_m + 2,4049$
2001	$\delta_k = 0,0030a_m - 0,7929$	$\delta_k = 0,0023a_m - 0,6719$
2002	$\delta_k = 0,0044a_m - 0,6719$	$\delta_k = 0,0015a_m - 0,6297$
Metai	Matuoklės	
	Nr. 26598	Nr. 26599
2003	$\delta_k = 0,0043a_m - 0,90$	$\delta_k = 0,0028a_m - 0,15$
2004	$\delta_k = 0,0057a_m - 1,3009$	$\delta_k = 0,0053a_m - 2,2783$
Metai	Matuoklės	
	Nr. 26600	Nr. 26605
1998	$\delta_k = -0,0062a_m + 1,3269$	$\delta_k = -0,0075a_m + 0,0108$
1999	$\delta_k = -0,009a_m + 5,5096$	$\delta_k = -0,0022a_m + 2,8355$
2000	$\delta_k = -0,0045a_m + 3,8272$	$\delta_k = 0,00014a_m - 2,36609$
2001	$\delta_k = -0,0053a_m + 2,6194$	$\delta_k = 0,0056a_m - 2,3544$
2002	$\delta_k = -0,0029a_m + 2,3457$	$\delta_k = 0,0024a_m - 0,3508$
2003	$\delta_k = -0,0045a_m + 3,00$	$\delta_k = 0,0042a_m - 0,67$
2004	$\delta_k = -0,0021a_m + 0,819$	$\delta_k = 0,0048a_m - 0,0969$

Į lygtis įrašius atskaitų a_m reikšmes milimetrais (mm), pataisos δ_k yra gaunamos mikrometrais (μm).

Išanalizavę galutinius naujojo fotometrino kalibravimo būdo tikslumo rezultatus matome, kad mažiausias skirtumas yra apie 2 μm , o didžiausias neviršija 10 μm .

3.4 lentelė. Suomijos GI komparatoriumi nustatytos kodinių niveliavimo matuoklių kalibravimo pataisos

Table 3.4. Finland Geodetic institute comparator set of code leveling staffs calibration correction

Matuoklės nr.	Atskaitos mm	Kalibravimo pataisos, μm			Pataisų skirtumai, μm	
		1998 m.	2003 m.	2004 m.	2004–2003 m.	2004–1998 m.
26598	0	-1	-1	-1	0	0
	500	-3	+1	+2	+1	+5
	1000	-5	+3	+4	+1	+9
	1500	-7	+6	+7	+1	+14
	2000	-9	+8	+10	+2	+19
	2500	-11	+10	+13	+3	+24
	3000	-13	+12	+16	+4	+29
26599	0	+1	0	+2	+2	+1
	500	-1	+1	+5	+4	+6
	1000	-2	+3	+8	+5	+10
	1500	-4	+4	+10	+6	+14
	2000	-6	+5	+13	+8	+19
	2500	-7	+7	+16	+9	+23
	3000	-9	+8	+18	+10	+27
Matuoklės nr.	Atskaitos mm	Kalibravimo pataisos, μm	Pataisų skirtumai, μm	Matuoklės nr.	Atskaitos mm	Kalibravimo pataisos, μm
26600	0	+1	+3	+1	-2	0
	500	-2	+1	0	-1	+2
	1000	-5	-1	-1	0	+4
	1500	-8	-4	-2	+2	+6
	2000	-11	-6	-3	+3	+8
	2500	-14	-8	-4	+4	+10
	3000	-17	-10	-5	+5	+12
26605	0	0	-1	0	+1	0
	500	-4	+1	+2	+1	+6
	1000	-7	+4	+5	+1	+12
	1500	-11	+6	+7	+1	+18
	2000	-15	+8	+10	+2	+25
	2500	-19	+10	+12	+2	+31
	3000	-22	+12	+14	+2	+36

Išanalizavus 1998–2004 metų kalibravimo duomenis matyti, kad kalibravimo tikslumas Suomijos Geodezijos institute yra apie 1–2 μm . Tarp 2003 m. ir 2004 m. kalibravimo pataisų pokyčiai 3000 mm atskaitai neviršija +10 μm , o tarp 1998–2004 m. kalibravimų +36 μm .

Suomijos Geodezijos instituto komparatoriumi ne tik kalibruojamos matuoklių kodinės padalos, bet ir dideliu tikslumu nustatomos invarinių juostelių ilgėjimo koeficientų reikšmės. Kodinių matuoklių ilgėjimo koeficientų reikšmės nustatomos tuo pačiu lazeriniu interferometriniu komparatoriumi, matuojant invarinės juostelės atkarpas, esant trimis, keturioms skirtingoms tam tikru nuoseklumu keičiamoms temperatūrų reikšmėms. Temperatūros pataisų regresijos lygtys užrašomos taip:

$$\delta_t = k_1 t + k_2, \quad (3.2)$$

čia k_1 ir k_2 yra 3.2 regresijos lygties koeficientai.

I lygtį įrašius invaro juostelių temperatūrų t reikšmes laipsniais, pataisos gaunamos mikrometrais (μm).

Atliekant fotometrinių kalibravimą pagal skaičių matricos duomenis, matuoklės brūkšnių vaizdo sutapatinimui gali būti taikomas didžiausio koreliacijos koeficiento principo, statistškai sulyginus skaitmeninę informaciją, gautą nuo kalibruojamosios ir etaloninės matuoklių. Tokiu atveju statistinė žymų padėtis įvertinama žingsneliais perstumiant etaloninės matuoklės atžvilgiu, matuojamosios matuoklės skaitmeninės informacijos seką ir ieškant didžiausio koreliacijos koeficientų atitikimo.

Skaitmeninės informacijos koreliacijos koeficientai skaičiuojami pagal formulę:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.3)$$

čia r_{xy} – koreliacijos koeficientas, x ir y yra eilučių ir stulpelių skaičius skaitmeninės informacijos matricoje. $\bar{X}$ yra visų skaičių aritmetinis vidurkis matricoje, o $\bar{Y}$ yra visų skaičių aritmetinis vidurkis matricoje Y . $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$. (Giniotis *et al.* 2000, 2003, 2004, 2005, Vekteris *et al.* 2000)

Brūkšnių briaunų linijos patikimesnis įvertis gali būti nustatytas taikant linijinės regresijos principą. Brūkšnių briaunų skaitmeninės informacijos eilutė statistškai analizuojama nustatant, kiek šie skaičiai atitinka tiesialinijinę priklausomybę. Taikant žinomas statistikos formules galima nustatyti didžiausią tikimybę, kokią geriausiai atitinkančią liniją galima išvesti per turimas fotogrametriniu būdu gautų taškų skaitmenines vertes. Tam tikslui surandamos vidutinių kvadratinių nuokrypių įverčiai S_x ir S_y :

$$S = \Sigma xy - \frac{\Sigma x \Sigma y}{n}. \quad (3.4)$$

Nagrinėjamos imties koreliacijos koeficientas apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x \times S_y}} . \quad (3.5)$$

Naudojant analizuojantį langą ir keičiant jo padėtį visoje skaitmeninės informacijos matricoje, galima parinkti ir apskaičiuoti didžiausią koreliacijos koeficientą tarp analizuojamų matuoklių brūkšnių padėties koordinatčių bei nustatyti žingsnį, kuriuo ši koordinatė skiriasi nuo etaloninės skalės žymos koordinatės. Šis žingsnis reikalingas kalibruojamųjų matuoklių skalių žymų briaunų padėties absoliutinėms paklaidoms nustatyti, o jas apskaičiavus visame matuoklės skalės ilgyje, bus nustatyta sistemingoji kalibruojamosios matuoklės skalės paklaida.

$$\delta y_i = r_{t_{\max_i}} . \quad (3.6)$$

Pirmiausiai lyginami dviejų testuojamų skalių gauti skaičiavimo rezultatai, imant kiekvienos atskiros skalės gretimas eilutes ir vėliau tų pačių skalių tarpusavio vienodas eilutes. Skaičiavimai atlikti tose vietose, kur keičiasi kodinės skalės kodas iš tamsios spalvos į šviesią. Skaičiuojant skalių koreliacijos koeficientus, imtos atitinkamų eilučių vidurkių reikšmės. Dalis skaičiavimo rezultatų pateikta 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Skaitmeninės informacijos koreliacijos koeficientai tarp gretimų eilučių skirtingų skalių (skalės nr. 1 ir skalės nr.2) ir gretimų eilučių tų pačių skalių.

Table 3.5. Digital information, the correlation coefficients between adjacent rows of different scales (scale no. 1 and no. 2 scale) and the adjacent rows of the same scale.

Pirmoji testuota skalė		Antroji testuota skalė		Abi skalės	
Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas
$r_{0,1}$	-0,89	$r_{0,1}$	-0,91	$r_{0,0}$	-0,88
$r_{1,2}$	-0,90	$r_{1,2}$	-0,89	$r_{1,1}$	-0,90
$r_{2,3}$	-0,90	$r_{2,3}$	-0,86	$r_{2,2}$	-0,88
$r_{3,4}$	-0,75	$r_{3,4}$	-0,76	$r_{3,3}$	-0,80
$r_{4,5}$	-0,43	$r_{4,5}$	-0,37	$r_{4,4}$	-0,41
$r_{5,6}$	0,32	$r_{5,6}$	0,24	$r_{5,5}$	-0,40
$r_{6,7}$	0,39	$r_{6,7}$	0,38	$r_{6,6}$	-0,42
$r_{7,8}$	0,48	$r_{7,8}$	0,49	$r_{7,7}$	-0,50

3.5 lentelės tęsinys

Pirmoji testuota skalė		Antroji testuota skalė		Abi skalės	
Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas
$r_{8,9}$	-0,66	$r_{8,9}$	-0,58	$r_{8,8}$	-0,70
$r_{9,10}$	-0,85	$r_{9,10}$	-0,77	$r_{9,9}$	-0,84
...	...	...	...	...	...
$r_{38,39}$	0,84	$r_{38,39}$	0,82	$r_{38,38}$	0,85
$r_{39,40}$	0,88	$r_{39,40}$	0,90	$r_{39,39}$	0,90
$r_{40,41}$	0,65	$r_{40,41}$	0,78	$r_{40,40}$	0,74
$r_{41,42}$	0,36	$r_{41,42}$	0,43	$r_{41,41}$	0,46
$r_{42,43}$	0,49	$r_{42,43}$	0,56	$r_{42,42}$	0,55
$r_{43,44}$	0,47	$r_{43,44}$	0,55	$r_{43,43}$	0,61
...	...	...	...	...	...
$r_{70,71}$	0,96	$r_{70,71}$	0,96	$r_{70,70}$	0,94
$r_{71,72}$	0,94	$r_{71,72}$	0,90	$r_{71,71}$	0,92
$r_{72,73}$	0,72	$r_{72,73}$	0,73	$r_{72,72}$	0,74
Pirmoji testuota skalė		Antroji testuota skalė		Abi skalės	
Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas
$r_{73,74}$	0,46	$r_{73,74}$	0,45	$r_{73,73}$	0,56
$r_{74,75}$	0,58	$r_{74,75}$	0,59	$r_{74,74}$	0,42
$r_{75,76}$	0,78	$r_{75,76}$	0,79	$r_{75,75}$	0,62
$r_{76,77}$	0,89	$r_{76,77}$	0,91	$r_{76,76}$	0,85
$r_{162,163}$	0,84	$r_{162,163}$	0,83	$r_{162,162}$	0,90
$r_{163,164}$	-0,87	$r_{163,164}$	-0,85	$r_{163,163}$	-0,89
$r_{164,165}$	-0,71	$r_{164,165}$	-0,79	$r_{164,164}$	-0,76
$r_{165,166}$	0,39	$r_{165,166}$	0,41	$r_{165,165}$	0,40
$r_{167,168}$	0,56	$r_{167,168}$	0,54	$r_{166,166}$	0,57
$r_{169,170}$	0,88	$r_{169,170}$	0,85	$r_{167,167}$	0,84
...	...	...	...	...	...
$r_{195,196}$	-0,98	$r_{195,196}$	-0,94	$r_{195,195}$	-0,92
$r_{196,197}$	-0,87	$r_{196,197}$	-0,88	$r_{196,196}$	-0,89
$r_{197,198}$	-0,89	$r_{197,198}$	-0,91	$r_{197,197}$	-0,84
$r_{198,199}$	-0,75	$r_{198,199}$	-0,79	$r_{198,198}$	-0,79
$r_{200,201}$	-0,49	$r_{200,201}$	-0,50	$r_{199,199}$	-0,54
$r_{201,202}$	0,78	$r_{201,202}$	-0,80	$r_{200,200}$	-0,81
$r_{202,203}$	0,98	$r_{202,203}$	-0,95	$r_{201,201}$	-0,92
...	...	...	...	...	...
$R_{233,234}$	0,87	$R_{233,234}$	0,84	$r_{233,233}$	0,86
$R_{234,235}$	0,88	$R_{234,235}$	0,85	$r_{234,234}$	0,84
$R_{235,236}$	0,74	$R_{235,236}$	0,74	$r_{235,235}$	0,80

3.5 lentelės tęsinys

Pirmoji testuota skalė		Antroji testuota skalė		Abi skalės	
Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas	Eilutės	Koreliacijos koeficientas
$r_{236,237}$	0,54	$r_{236,237}$	0,55	$r_{236,236}$	0,74
$r_{237,238}$	0,42	$r_{237,238}$	0,41	$r_{237,237}$	0,45
$r_{238,239}$	0,58	$r_{238,239}$	0,59	$r_{238,238}$	0,55
$r_{239,240}$	0,66	$r_{239,240}$	0,37	$r_{239,239}$	0,24
$r_{240,241}$	0,70	$r_{240,241}$	0,70	$r_{240,240}$	0,68

Koreliacijos koeficientas parodo, ar matuojamųjų kintamųjų tiesinė priklausomybė yra tiksli. Iš 3.5 lentelės matyti, kad tose vietose, kur tiesinės koreliacijos ryšys yra mažiausias, galime nustatyti kodinių skalių brūkšnių ribą tarp skirtingų spalvų (juodos ar baltos) brūkšnių briaunų.

Brūkšnių briaunų linijos patikimesnis įvertis gali būti nustatytas taikant lininės regresijos principą. Brūkšnių briaunų skaitmeninės informacijos eilutė statistiškai analizuojama nustatant, kiek šie skaičiai atitinka tiesialininę priklausomybę. Regresijos skaičiavimuose yra tikrinama lygių vidurkių hipotezė:

$$H_0 : a_x = a_y , \quad (3.14)$$

Kuri lyginama su alternatyvia hipoteze, kai šie vidurkiai nelygūs:

$$H_0 : a_x \neq a_y . \quad (3.15)$$

Kadangi atitinkamo tikslumo dispersijų reikšmės nežinomos, tai taikomas reikšmingumo kriterijus, paremtas empirinėmis dispersijų reikšmėmis (Čekanavičius et al 2004, 2006).

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2 + s_y^2}{n}}} , \quad (3.16)$$

kuris pasiskirstęs pagal Stjudento skirstinį su $\nu=2n-2$ laisvės laipsnių, kai H_0 teisinga, čia n yra matavimų skaičius.

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį α , iš Stjudento skirstinio lentelių randama kritinė reikšmė $t_{\alpha,2n-2}$. Jei $|T| \geq t_{\alpha,2n-2}$, tai hipotezė, kad vidurkiai yra lygūs atmetama ir priimama alternatyvi hipotezė, t.y. vidurkiai nėra lygūs. Formulėje 3.16 $\bar{x}$ yra atitinkamos eilutės empirinis vidurkis, $\bar{y}$ - kitos eilutės empirinis vidurkis, s_x^2 – atitinkamos eilutės empirinė dispersija, s_y^2 – kitos eilutės empirinė dispersija.

Tai hipotezė, kad vidurkiai yra lygūs yra teisinga, matavimo rezultatų statistiniai duomenys parodė, kad lygių vidurkių hipotezė yra teisinga.

Kai reikšmingumo lygmuo $\alpha=0,05$ (tikimybė, kad padarytos išvados yra klaidingos) $T_{0,05;2*20-2}=2,024$. (Sakalauskas 2003, Čekanavičius et al 2004, 2006).

Naudojant analizuojantį langą ir keičiant jo padėtį visoje skaitmeninės informacijos matricoje, galima parinkti ir apskaičiuoti didžiausią koreliacijos koeficientą tarp analizuojamų matuoklių brūkšnių padėties koordinatę bei nustatyti žingsnį, kuriuo ši koordinatė skiriasi nuo etaloninės skalės brūkšnio koordinatės. Šis žingsnis bus lygus kalibruojamųjų matuoklių brūkšnių padėties absoliučiai paklaidai, o jas apskaičiavus visame matuoklės ilgyje, bus nustatyta sistemingoji kalibruojamosios matuoklės paklaida.

Specialios invarinės matuoklės su kodinių brūkšnių padalomis buvo sukurtos NEDO kompanijos preciziniam niveliavimui. Kodinė invarinė juostelė susideda iš 64% geležies, 31% nikelio ir 5% kobalto (Ringpfeil, 1985). Atsižvelgiant į invarinio lydinio sudėtį, yra gaunamas skirtingas temperatūrinis plėtimosi koeficientas. Remiantis daugiau nei 1000 invarinių kodinių niveliavimo matuoklių kalibravimo rezultatais (Maurer 1994, 1995) laikoma, kad leistina atskaitos nuokrypa visam matuoklės ilgiui neviršija 0,06 mm. Matuoklės nulinio padėties paklaida neviršija $\pm 0,05$ mm (Kahmen *et al* 1998).

Invarinių kodinių matuoklių leistinos gamykinės tolerancijos nustatytos standartais ISO12858-1 ir DIN18717 $\pm(0,02 \text{ mm} + 20 \text{ ppm})$ sutartiniu intervalu, kai temperatūra yra $+20^\circ\text{C}$. Aišku, dabartinės technologijos leidžia gamyklines kodinių skalių paklaidas dar labiau sumažinti, negu jos yra leistinos pagal standartus. Atsitiktinės kodinių niveliavimo skalių gamykinės paklaidos yra $\pm 7 \mu\text{m}$ (Fischer 1999).

3.3. Skyriaus išvados

1. Vertinant fotometriniu niveliavimo matuoklių skalių žymų padėčių kalibravimo būdo tikslumą, žymų pločiai buvo išmatuoti mikroskopu UIM. Gauti rezultatai parodė, kad didžiausias skirtumas dešimtyje matavimų ciklų buvo 0,008 mm, o mažiausias – 0,0002 mm.
2. Palyginus UIM rezultatus bei fotometriniu kalibravimo būdo rezultatus nustatyta, kad fotometriniu kalibravimo būdo tikslumas yra $\pm 6 \mu\text{m}$, atitinka niveliavimo matuoklių gamintojų tikslumo reikalavimus ($7 \mu\text{m}$). Todėl galime teigti, kad sukurtą kalibravimo būdą galime praktiškai taikyti niveliavimo matuoklių kokybei kontroliuoti.
3. Invarinių kodinių matuoklių leistinos gamykinės paklaidos yra leidžiamos iki $\pm 7 \mu\text{m}$, todėl galime teigti, kad pasirinktas fotometrinis kalibravimo kalibravimo būdas atitinka niveliavimo matuoklių gamykinį tikslumą.

Bendrosios išvados

1. Sukurtas naujas fotometriniis niveliavimo matuoklių skalių žymų kalibravimo būdas paremtas skaitmeninių fotografinių vaizdų apdorojimo metodika, kurį taikant skalių žymų padėties briaunas galime nustatyti 6 μm tikslumu. Pagal ISO 12858–1 standartą matuoklių skalių žymų padėties paklaidų nuokrypos yra leidžiamos iki 20 μm . Todėl galime teigti, kad sukurtą kalibravimo būdą galime praktiškai taikyti niveliavimo matuoklių kokybei kontroliuoti.
2. Taikant sukurtą kalibravimo metodiką, reikalinga žymiai paprastesnė ir pigesnė kalibravimo įranga lyginant su šiuo metu matuoklių kalibravimui naudojamais įprastiniais interferometriniais komparatoriais.
3. Taikant siūlomą kalibravimo metodiką, kalibravimo įrangą sudaro skaitmeninė aukštos skiriamosios gebos (ne mažesnė kaip 8 milijonų pikselių) fotokamera, kompiuteris ir sukurta kompiuterinė programa matuoklių skalių žymų fotografiniam vaizdui aprašyti skaitmenine forma bei gautai informacijai apdoroti.
4. Palyginus tuos pačius niveliavimo matuoklių skalių žymų kalibravimo fotometriniu būdu ir kontrolinius matavimus optiniu mikroskopu rezultatus, galime teigti, sukurtą kalibravimo būdą tikslumas (6 μm) atitinka niveliavimo matuoklių gamintojų tikslumo reikalavimus (7 μm).

Literatūra ir šaltiniai

- Anderson, J. M.; Mikhail, E. M. 1998. *Surveying: theory and practise*. United States of America: WCB McGraw-Hill. 1167 p. ISBN: 0-07-015914-9.
- Becker, J.M.; Andersson, B.; Eriksson, P.O.; Nordquist, A. 1994. A new generation of levelling instruments: NA2000 and NA3000, in *XX International congress*, Melbourne, Australia, 1994, 294–305.
- Becker, J.M. 1999. History and evolution of height determination techniques especially in Sweden, “*Geodesy Surveying in the Future*”, 15–17th of March, 1999, Gävle, Sweden, 43–57.
- Beyer, H. A. 1992. Geometric and radio metric analysis of CCD Camera based photogrametric close range system. Zurich, Institute of geodesy and photogrametry. 51.
- Canny, J. 1986 A computational approach to edge detection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol 8, 1986. 679–714.
- Čekanavičius, V. Murauskas, G. 2004. Statistika II. Vilnius, Technika. 2004. 272 p. ISBN 9955-491-16-7.
- Čekanavičius, V. Murauskas, G. 2006. Statistika. Vilnius, Technika. 2006. 239 p. ISBN 9986-546-93-1.
- Ingensand, H. 1990. Das Wild 2000, Das erste digitale Nivelliere der Welt. *Allgemeine Vermessung*, Nachrichten: 201–210.
- Ingensand, H., Meissl, A. 1996. New digital levelling techniques and their applications. *South African Journal of Surveying and Mapping* 23, 1996, 205–210.
- Ingensand, H. 1999. The Evolution of digital levelling techniques – limitations and new solutions, “*Geodesy Surveying in the Future*”, 15–17th of March, 1999, Gävle, Sweden, 59–68.

- Feist, W. 1994. Precision level Ni002A, *Allgemeine Vermessungs Nachrichten* 101, 1994, 56–63.
- Feist, W. 1995. Die neuen digitalnivelliere DiNi10 und DiNi20. *Vermessung und Raumordnung* 57, 1995. 65–78.
- Feist, W. 1996. Die total level station DiNi10T – Das erste digitale Nivelliertachymeter. *Vermessung und Raumordnung* 58, 1996. 1–7.
- Fisher, T., Fisher, W. 1999. Manufacturing of high precision levelling roads, “*Geodesy Surveying in the Future*”, 15–17th of March, 1999, Gävle, Sweden, 223–228.
- Gachter, B. 1987. Measuring device for determining Relative position between two Items. United States patent No. 4, 715, 714.
- Giniotis, V. 2000. Investigations in the length and angle measurements, in *International measurement confederation XVI IMEKO world congress, Sept.25–28, Viena, 2000*. 99–103.
- Giniotis, V.; Rybokas, M. 2003. Data processing and information assessment in scales measurement simulation, in *XVII IMEKO World congress: Metrology in the 3rd Millennium : 22–27 June, 2003 Dubrovnik, Croatia*. Dubrovnik, 2003. 1053–1056.
- Giniotis, V.; Skeivalas, J.; Petroškevičius, P.; Milner, J.H. 2004. Accuracy analysis of digital meters, in *8th International Symposium on Measurement and Quality Control in Production: Symposium Erlangen, 12–15. Oktober 2004*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2004. 443–448.
- Giniotis, V.; Petroškevičius, P.; Bručas, D. 2005. Theoretical and practical aspects of geodetic instruments calibration, in *The 6th International Conference Environmental Engineering : selected papers : May 26–27, 2005 Vilnius, Lithuania. Vol. 2*. Vilnius : Technika, 2005. 863–866. ISBN 9986058511.
- Giniotis, V. 2005. Padėties ir poslinkių matavimas. Vilnius, Technika. 2005. 216 p. ISBN 9986-05-890-2.
- Giniotis, V.; Petroškevičius, P.; Skeivalas, J. 2006. Niveliavimo matuoklių kalibravimo įrenginys. Lietuvos patentas Nr. LT 5333B.
- Giniotis, V.; Petroškevičius, P.; Skeivalas, J. 2008. Application of photogrammetric method for height measurement instrumentation, *Mechanika* 1(69): 69–73.
- Giniotis, V.; Bansevičius, R.; Rybokas, M. 2009. Mechatronic approach in precision measurements, in *Proceedings IMECO XIX world congress : fundamental and applied metrology. September 6–11, 2009, Lisbon, Portugal*. 1935–1940.
- Grattan, K.T.V.; Giniotis, V.; Skeivalas, J. 2003. Development of 2D optical measurements, in *XVII IMEKO World congress: Metrology in the 3rd Millennium : 22–27 June, 2003, Dubrovnik, Croatia*. 1831–1833.
- Griffit, D.A.; Layne, L. J. 1999. *A case Book for Spatial Statistical Data Analysis*. Oxford university press, New York. 506p. ISBN: 0-19-510958-9.
- Green, B 2002 [interaktyvus]: [žiūrėta 2009 m. 06 12] prieiga per internetą <http://www.pages.drexel.edu/~weg22/edge.html>
- Holst, G. C. 1996. *CCD arrays, cameras and displays*. Bellingham, Washington, USA. 42 p.
- Kahmen, H.; Faig, W. 1988. *Surveying*. Walter de Gruyter, Berlin, New York. 578 p.

- Kasser, M.; Becker, J.M. 1999. Error sources in high precise levelling – How to minimise their effects on the heights, in *The Importance of Heights Geodesy Surveying in the Future, 15–17th of March, 1999*, Gävle, Sweden, 213–222.
- Kazakevičius, S.; Petroškevičius, P.; Zakarevičius, A. 1999. Lietuvos geodezinio vertikaliojo tinklo sudarymo principai, *Geodezija ir kartografija* 2(25): 47–59.
- Krikštaponis, B. 2000. Matavimų analoginiais ir skaitmeniniais nivelyrais tikslumo tyrimai, *Geodezija ir kartografija* 2(26): 69–72.
- Krikštaponis, B.; Petroškevičius, P. 1996. GPS antrosios klasės tinklo sudarymo darbai, *Geodezija ir kartografija* 1(23): 62–73.
- Krikštaponis, B. 2001. Precizinio niveliavimo paklaidos ir jų įtaka matavimų rezultatams iš *Kvalifikacinio mokslo darbo ataskaitos*, Vilnius. 60 p.
- Krikštaponis, B. 2001. Skaitmeninių nivelių NA3003 kolimacijos paklaidos tyrimai, *Geodezija ir kartografija* 1(27): 36–39.
- Krikštaponis, B. 2002. Skaitmeninio nivelyro Wild NA3003 atskaitos sistemos ypatumų tyrimai, *Geodezija ir kartografija* 2(28): 39–44.
- Krikštaponis, B. 2001. *Geodezinių vertikalių tinklų sudarymo skaitmeniniais nivelyrais analizė*. Daktaro disertacijos santrauka. Vilnius: Technika, 36p.
- Krikštaponis, B.; Tulevičius, V. 2001. Precizinių kodinių niveliavimo matuoklių tyrimai, *Geodezija ir kartografija* 1(27): 13–19.
- Krikštaponis, B. 2001. Vertikaliojo tinklo sudarymo skaitmeniniais nivelyrais metodikos analizė ir kūrimas, iš *Kvalifikacinio mokslo darbo ataskaitos*, Vilnius. 59 p.
- Krikštaponis, B.; Tumelienė, E.; Rekus, D. 2005. Precizinio niveliavimo skaitmeniniais nivelyrais Wild NA3003 metodikos tobulinimas, *Geodezija ir kartografija* 3(31): 97–102.
- Labe, T.; Forstner, W. 2004. *Geometry stability of lowcost digital consumer cameras*, Institute für photogrammetry. Bonn:Commission. 7p.
- Lietuvos valstybinio geodezinio vertikaliojo pirmosios klasės tinklo sudarymas 3 dalis, iš *Mokslo darbo ataskaitos*, Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Geodezijos institutas, 2002. 390 p.
- Linder, W. 2006. *Digital photogrammetry*. Berlin:Springer-Verlag. 214 p. ISBN: 978-3-540-92724-2.
- Maurer, W.; Rosmeier, F. 1983. Calibration of invar rods. *Determination of of heights and heights changes*, Dummer Verlag, Bonn. 141–157.
- Maurer, W. 1995. Laserinterferometry – Ten Years Experience In Calibrating Invar Levelling Staffs, in *Lazer Techniques in Geodesy and mine surveying*, Ljubljana, Sept. 1995, 9p.
- Maurer, W. 2000. First Experiences with a vertical comparator for the calibration of invar rods, in *Precise Levelling*. Dummer Verlag, 2000, Bonn: 155–163.
- Menzel, M. 1999. The Development of levels during the past 25 years, with special emphasis on the Ni002 optical geodetic level and the DiNi 11 digital level, in *The Importance of Heights Geodesy Surveying in the Future, 15–17th of March, 1999*, Gävle, Sweden, 85–93.
- NA2002/NA3003. *Technical report, digital levels*. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 1997. 13 p.
- Nedo. 2002. Technical documentation NEDO code staff. April 2002.

- Pictran. *Program description and user manual*. Berlin. 2004. 105p.
- Putrimas, R. 1999. Vertikaliosios refrakcijos eliminavimo metodika nematavus temperatūros gradiento, *Geodezija ir kartografija* 2(25): 88–90.
- Richards, J.A.; Xiuping, J. 2006. *Remote sensing digital image analysis*. Berlin: Springer–Verlag. 439p. ISBN 978-3-540-25128-6.
- Ringpheil, H. 1985. Metallkundliche Grundlagen der Wirksamkeit von Thermometallen, *Proceedings der 1 Polytechnik*. Dresden, 137–142.
- Reighofer, H. 1993. Überprüfung des digitalnivelliersystems Wild NA3003/GPCL. *Mitteilungen der geodatischen*, Institute der Technischen Universität Graz, Folge 78: 284–289.
- Reighofer, H. 1996. Calibration of digital levelling systems. *Osterreichischen Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 74: 284–289.
- Rekus, D.; Aksamitauskas, Č.; Giniotis, V. 2008. Application of digital automatic levels and impact of their accuracy on construction measurements, in *The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008)*: selected papers, June 26–29, 2008 Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 625–631.
- Robinson, A. H.; Morrison, J. L.; Muehrcke, P. C.; Kimerling, A. J.; Guptill, S. C. 1995. *Elements of cartography*. USA: John Wiley and Sons. 674p. ISBN: 978-0-471-55579-7.
- Rueger, J. M. 2000. The Topcon DL- Digital level. *The Australian Surveyor* 45: 62–70.
- Rueger, J. M.; Brunner, F. K. 2000. On system calibration and tape testing of digital levels. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 125: 120–130.
- Ruzgienė, B. 2008. *Fotogrametrija*. Vilnius: Technika, 204p. ISBN: 978-9955-28-310-2.
- Sakalauskas, V. 2003. *Duomenų analizė su statistika*. Vilnius: Margi raštai. 236p.
- Seilius, A. 2001. *Elektroninių matavimų metrologijos pagrindai*. Vilnius: Technika. ISBN: 9986-05-434-6.
- Skeivalas, J. 1995. *Koreliuotų geodezinių matavimų rezultatų matematinis apdorojimas*. Vilnius: Technika, 272 p.
- Skeivalas, J.; Putrimas, R.; Krikštonis, B. 1999. Precizinio niveliavimo klaidų kovariacinė analizė, *Geodezija ir kartografija* 4(25): 146–149.
- Skeivalas, J.; Giniotis, V. 2000. Elektroninių nivelių atskaitymo sistemos tikslumo analizė, *Matavimai* 1(13): 30–32.
- Skeivalas, J. 2000. Refrakcijos įtakos nustatymas atliekant niveliaciją, *Geodezija ir kartografija* 4(26): 160–163.
- Skeivalas, J.; Aksamitauskas, Č. 2001. Matavimo elektroniniais tolinačiais rezultatų koreliacijos analizė, *Geodezija ir kartografija* 1(27): 9–12.
- Skeivalas, J.; Giniotis, V. 2003. Analysis of accuracy of measurement by Doppler laser meters, *Optical Engineering* 7(42): 1–7.
- Skeivalas, J. 2005. Determination of the refraction influence in precision leveling, *Optical Engineering* 1(44): 1–5.
- Skeivalas, J.; Giniotis, V. 2005. Accuracy and performance analysis of digital levels, *Optical Engineering* 2(44): 1–6.

- Skeivalas, J.; Putrimas, R.; Būga, A. 2006. Information variation during the measurement process, *Measurement* 39: 532–535.
- Skeivalas, J.; Gečytė, S.; Aleknienė, E.; Zigmantienė, E. 2007. Geodezinio vertikaliojo tinklo klaidų analizė taikant skirtingus išlyginimo modelius, *Geodezija ir kartografija* 2(33): 55–60.
- Skeivalas, J.; Paršeliūnas, E.; Putrimas, R.; Šlikas, D. 2009. Kodinių niveliavimo matuoklių kalibravimo tikslumas, taikant kovariacines funkcijas, *Geodezija ir kartografija* 2(35): 39–43.
- Shlemmer, H. 1985. A new technique to produce precise graduations on invar tape. *Precise levelling*. Dümmler Verlag, Bonn: 119–125.
- Shlemmer, H. 1987. *Zur digitale Ablesung an nivellierlatten*. Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften. Munchen. 326 p.
- Sužiedelytė-Visockienė, J. 2007. Skaitmeninės matuojamosios fotokameros kalibravimo parametrų įtaka nuotraukas transformuojant į plokštumą, *Geodezija ir kartografija* 1(28): 26–30.
- Takalo, M. 1992. Accuracy of Wild NA 2000, *Surveying Science in Finland* 2(10): 34–58.
- Takalo, M. 1994a. Determination of the accuracy of the Wild NA2000 using the method of simultaneous setup observations, *Surveying Science in Finland* 2(12): 38–50.
- Takalo, M. 1994b. Heights in the Klaukkala test field, *Surveying Science in Finland* 2(12): 17–37.
- Takalo, M. 1996. On the digital levelling instruments, *Surveying Science in Finland* 1(14): 69–85.
- Takalo, M. 1997. *Experiences of Automated Calibration of Levelling Roads in Finland*. Finnish Geodetic Institute. Helsinki. 11 p.
- Takalo, M. 1999. *A Verification of Automated Calibration of Levelling Roads in Finland*. Finnish Geodetic Institute. Helsinki. 36 p.
- Takalo, M. 1999. On behaviour of invar rods with aluminium frame used in Third Levelling of Finland, in *The Importance of Heights Geodesy Surveying in the Future, 15-17th of March, 1999*, Gävle, Sweden, 229–238.
- Takalo, M. 2002. On the systematic behavior of the digital levelling system Zeiss DiNi12. *Proceedings XXII Congress FIG, Comm. 6*. Washington, USA. 233–236.
- Topcon. 1993. Electronic levelling apparatus and levelling staff used with the same. European Patent Application. No. 0-5765-004-A1: 30p.
- Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Žiburio leidykla. 380 p.
- Wild NA2002/NA3000. *User manual*. Leica AG. Switzerland, 1993. 109 p.
- Wild NA2002/NA3003. *Information about digital levels*. Leica Geosystems AG. Switzerland, 1994. 10 p.
- Widmark, J.; Becker, J. M. 1984. The motorized levelling technique, in *The Swedish experience*, Gävle. 26 p.
- Wolf, P. R.; Dewitt, B. A. 2000. *Elements of photogrammetry*. USA: The McGraw-Hill. 608p.

- Wolf, P. R.; Ghilani, C. D. 2006. *Elementary surveying*. New Jersey: Pearson education. 916p.
- Wechmann, W. 1999. Experience with various digital levels in both motorised and conventional „on foot” precise levelling in east Germany, in *The Importance of Heights Geodesy Surveying in the Future, 15–17th of March, 1999*, Gävle, Sweden, 95–106.
- Wellenhof, B. H.; Moritz, H. 2006. *Physical geodesy*. New York: Springer. 406p. ISBN: 3-211-33544-7.
- Zakarevičius, A.; Baškienė, R. 2002. Matavimai skaitmeniniais nivelyrais :paklaidų analizė ir jo mažinimo galimybės, *Geodezija ir kartografija* 3(28): 83-87.
- Zetsche, H. 1966. Beiträge zur Konstruktion von Geodätischen Feldinstrumenten mit digitaler Date-nausgabe, *DGK Reihe C* 88.
- Скейвалас, Й.; Закарявичюс, А.; Аксамитаускас, Ч. 2004. Ковариационный анализ ошибок прецизионного нивелирования, *Інженерна геодезія* 50, Київ, 201–207.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Aksamitauskas, Č.; Rekus, D.; Čirba, S. 2010. Investigation error source measuring deformations of engineering structures by geodetic methods, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 5(4): 185–190. ISSN 1822-7275 (ISI Web of Science).

Aksamitauskas, Č.; Rekus, D. 2009. Niveliacijos matuoklių kodinių skalių tikslumo tyrimai pagal jų skaitmenines nuotraukas, *Geodezija ir kartografija* 4(35): 140–143. ISSN 1392-1541 (Compendex).

Giniotis, V.; Rekus, D.; Aksamitauskas, Č. 2007. Accuracy calibration of the bars of levelling meters, *Geodezija ir kartografija* 4(33): 102–105. ISSN 1392-1541 (Compendex).

Straipsniai kituose leidiniuose

Aksamitauskas, Č.; Rekus, D.; Wasilewski, A. 2007. Impact of digital level Wild NA3003 error investigations on construction engineering measurements, in *Proc. of the 9th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques*

held on May 16–18, 2007 Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 1–5. ISBN 978-99-5528-131-3 (*Thomson ISI Proceedings*).

Giniotis, V.; Rekus, D.; Aksamitauskas, C. 2008. Calibration of coded levelling staffs, in *The 7th International Conference "Environmental engineering": selected papers*, Vol. 3, May 22–23, 2008 Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 1310–1313. ISBN 978-9955-28-265-5 (*Thomson ISI Proceedings*).

Rekus, D.; Aksamitauskas, Č.; Giniotis, V. 2008. Application of digital automatic levels and impact of their accuracy on construction measurements, in *The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2008): selected papers*, June 26–29, 2008 Vilnius, Lithuania. Vilnius: Technika, 625–631. ISBN 978-9955-28-329-4 (*Thomson ISI Proceedings*).

Aksamitauskas, Č.; Rekus, D.; Wasilewski, A. 2010. Investigation of error source measuring deformation of engineering structures by geodetic methods, in *Proc. of the 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques held on May 19–21, 2010 Vilnius, Lithuania*. Vilnius: Technika, 1071–1076. (*Thomson ISI Proceedings*).

Rekus, D. 2006. Skaitmeninio niveliavimo paklaidų tyrimai. *Straipsnių rinkinys „Matavimų inžinerija ir GIS“ Mastaičiai*, 56–59. ISBN 9955-586-97-4.

Rekus, D. 2007. Skaitmeninio nivelyro Wild NA 3003 paklaidų tyrimų įtaka statybiniams inžineriniams matavimams. *Straipsnių rinkinys „Matavimų inžinerija ir GIS“ Mastaičiai*, 71–74. ISBN 978-9955-27-033-1.

Rekus, D.; Aksamitauskas, V. Č. 2008. Skaitmeninių nivelių paklaidų tyrimų įtaka statybiniams inžineriniams matavimams, iš *Respublikinė studentų, magistrantų, doktorantų konferencija „Statyba ir architektūra“ pranešimų medžiaga*. Kaunas, 47–57. ISBN 978-9955-25-605-2.

Rekus, D.; Aksamitauskas, V. Č. 2009. Niveliacijos matuoklių kodinių skalių tikslumo tyrimai. *Straipsnių rinkinys „Matavimų inžinerija ir GIS“ Mastaičiai*, 36–40. ISBN 978-9955-27-133-81.

Patentas

Giniotis, V.; Rekus, D.; Petroškevičius, P.; Skeivalas, J.; Aksamitauskas, Č.; Bručas, D. 2009. Niveliavimo matuoklių brūkšnių padėties tikslumo kalibravimo įrenginys. Lietuvos patentas LT 5559 B.

Priedai

Priedai pateikti skaitmeninėje laikmenoje

A PRIEDAS. Fotometrinio niveliavimo matuoklių skalių žymų briaunų kalibravimo programos PIKSELIS tekstas

B PRIEDAS. Išradimo patentas LT 5559 B „Niveliavimo matuoklių brūkšnių padėties tikslumo kalibravimo įrenginys“

C PRIEDAS. Kodinių skalių žymų briaunų matavimų rezultatai.

Donatas REKUS

NIVELIAVIMO MATUOKLIŲ SKALIŲ FOTOMETRINIS KALIBRAVIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
matavimų inžinerija (10T)

Donatas REKUS

PHOTOMETRIC CALIBRATION OF LEVELLING STAFFS SCALES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Measurement Engineering (10T)

2010 12 17. 7,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01112 Vilnius