

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Juras Budreckas

MATAVIMO SISTEMOS, PAREMTOS LAZERIO
TRIANGULIACIJA, TIKSLUMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

lekt. dr. Kęstas Rimkus

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA**

**MATAVIMO SISTEMOS, PAREMTOS LAZERIO
TRIANGULIACIJA, TIKSLUMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (kodas 621H66001)

Vadovas

lekt. dr. Kęstas Rimkus
2017m. birželiod.

Recenzentas

doc. dr. Gintaras Dervinis
2017m. birželiod.

Projektą atliko

Juras Budreckas
2017m. birželiod.

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTROINIKOS

(Fakultetas)

JURAS BUDRECKAS

(Studento vardas, pavardė)

VALDYMO TECHNOLOGIJOS (621H66001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Matavimo sistemos, paremtos lazerio trianguliacija, tikslumo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. birželio 05 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano Juro Budrecko baigiamasis projektas tema „Matavimo sistemos, paremtos lazerio trianguliacija, tikslumo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Budreckas, Juras. Matavimo sistemos, paremtos lazerio trianguliacija, tikslumo tyrimas. Valdymo sistemų magistro baigiamasis projektas. Vadovas lekt. dr. Kęstas Rimkus; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: Aukščio matavimas, nekontaktiniai matavimai, trianguliacija, linijinis lazeris.

Kaunas, 2017. 60 p.

SANTRAUKA

Darbe aprašomas nekontaktinės matavimo sistemos, paremtos lazerio trianguliacija, veikimo principas. Kadangi pramonėje naudojamiems įtaisams keliami aukšti kokybės reikalavimai, todėl projekte siekiama gauti optimalią, greitaveikos, universalumo ir tikslumo atžvilgiu, sistemą. Atliekama literatūros analizė ir parenkami keli linijos aptikimo algoritmai, kurie yra detaliau tiriama, kad būtų galima nustatyti, kurie metodai turėtų būti taikomi siekiant sukurti greitą ir tikslią sistemą. Darbe pateikiamas įrengimo veikimo principas, parenkama aparatūrinė įranga ir sudaroma sistema, kuri reikalinga atlikti tyrimui. Baigiamajame darbe buvo atlikti programavimo darbai, siekiant įgyvendinti pasirinktus metodus, todėl pateikiami ir paaiškinami algoritmai bei jų veikimo principai. Taip pat dalis algoritmų yra pritaikomi skirtingais metodais siekiant gauti geresnius rezultatus, bet išlaikant jų veikimo principą, kas sąlygoja skaičiavimų greitaveiką.

Budreckas, Juras. The Accuracy Research of the Measurement System Based on Laser Triangulation: Master's thesis in Control Systems. Supervisor assoc. lect. dr. Kęstas Rimkus. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Automation

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: Height measurement, non-contact measurement, triangulation, linear laser module.

Kaunas, 2017. 60 p.

SUMMARY

The Project appointed to describe the non-contact measurement system's, based on laser triangulation, operating principle. Since industry has high requirements for quality, therefore this project aims to obtain optimal speed, versatility and accuracy of the system. During analyze of the literature, a few line detection algorithms were chosen and will be further investigated. This is carried out in order to determine which methods should be used to build a fast and accurate system. In the project operation principles of the machine are explained, the hardware is assessed and assembled. Programming of chosen methods was done during the final project. Therefore, algorithm of line detection presented and explained in the project. Also, part of the algorithms is applied in different methods in order to get better results, while maintaining the same principle of their operation, what influences the speed of calculations.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	8
SANTRUMPŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS	9
ĮVADAS	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA	11
1.1 Problemos aktualumas.....	11
1.1.1 Kontaktiniai matavimo įtaisai.....	11
1.1.2 Nekontaktiniai matavimo įtaisai	12
1.2 Metodai ir jų realizacija.....	14
1.2.1 Įtaisų geometrija	14
1.2.2 Taškinis lazeris	17
1.2.3 Linijinis lazeris	19
1.2.3.1 Atstatymas	19
1.2.3.2 Intensyvumo matrica	19
1.2.3.3 Linijos aptikimas	19
1.2.3.4 Linijos aptikimo algoritmai – LDA	20
1.2.3.5 Lazerio aptikimas Matlab terpėje.....	23
1.2.3.6 Aukščio žemėlapis.....	24
1.2.4 Aplinkos įtaka matavimo tikslumui	26
1.3 Analizės išvados	27
2. TIRIAMA SISTEMA.....	29
2.1 Naudota įranga	29
2.2 Sistema	30
3. BANDYMAI.....	33
3.1 Matuojami objektai.....	33
3.2 Naudoti metodai	34
3.2.1 Maksimalaus piko metodas.....	34
3.2.2 Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija	46
3.2.3 Masės centras	49
3.3 Apibendrinimas	54
4. REZULTATAI IR IŠVADOS	57
5. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	58

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Trianguliacijos skeneris [2]	13
1.2 pav. Trianguliacijos skaitytuvas su linijiniu lazeriu [1]	14
1.3 pav. Lazerio ir kameros išdėstymo būdai [1]	15
1.4 pav. Pagrindinis atstumo matavimo, naudojant taškinį lazerį, principas [3]	17
1.5 pav. Optimalaus linijos profilio skaičiavimas [7].....	20
1.6 pav. Optimalus ir realus projekcinis linijos intensyvumo profilis [7]	22
1.7 pav. Matavimų paklaidos milimetrais – grafinė forma.....	25
1.8 pav. Įtampos pokytis esant skirtingoms aplinkoms [22]	27
2.1 pav. Sistemos schema a – be objekto b – kai objektas atsiranda stebimoje aplinkoje [23].....	30
2.2 pav. Vieno pikselio vertės priklausomybė nuo kameros raiškos.....	32
3.1 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (800x600) a – originali, nubrėžus linijas, b – pritaikius maksimalaus piko algoritmą ir per pikus nubrėžus linijas	34
3.2 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas maksimalaus piko metodu (rezoliucija 640x480).....	35
3.3 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas maksimalaus piko metodu (rezoliucija 800x600).....	36
3.4 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (640x480) a – originali, b – pritaikius maksimalaus piko algoritmą ir per pikus nubrėžus linijas, c – nubrėžtos linijos originalioje nuotraukoje	37
3.5 pav. Išskirta lazerio linija, kai objektas siauras a – 800x600 rezoliucijos atveju b – pakeitus rezoliuciją programiškai – 600x600	37
3.6 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas pirmo maksimumo metodu (rezoliucija 640x480)	39
3.7 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas pirmo maksimumo metodu (rezoliucija 800x600)	39
3.8 pav. Rezultatų pasiskirstymas modifikuotu pirmo maksimumo metodu (640x480).....	40
3.9 pav. Rezultatų pasiskirstymas modifikuotu pirmo maksimumo metodu (800x600).....	41
3.10 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (480x480) a – originali, b – pritaikius maksimalaus piko algoritmą ir per pikus nubrėžus linijas, c – nubrėžtos linijos originalioje nuotraukoje	41
3.11 pav. Rezultatų pasiskirstymas paskutinio maksimumo metodu (640x480)	42
3.12 pav. Rezultatų pasiskirstymas paskutinio maksimumo metodu (800x600)	43
3.13 pav. Degtukų dėžutės nuotrauka (440x480) a – originali, b – nubrėžus tieses per lazerio linijos centrus.....	43
3.14 pav. Rezultatų pasiskirstymas maksimumų centro metodu (640x480)	44
3.15 pav. Rezultatų pasiskirstymas maksimumų centro metodu (800x600)	45
3.16 pav. Maksimalaus piko metodu gautų rezultatų palyginimas.....	45

3.17 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (800x600) a – originali, nubrėžus linijas, b – pritaikius Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija ir per pikus nubrėžus linijas	46
3.18 pav. Rezultatų pasiskirstymas Gauso atotrūkio interpoliacijos metodu (640x480)	47
3.19 pav. Rezultatų pasiskirstymas Gauso atotrūkio interpoliacijos metodu (800x600)	48
3.20 pav. Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacijos gautų rezultatų palyginimas.....	48
3.21 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka a – originali, pilki tonai, b – pritaikius masės centro algoritmą ir nubrėžus linijas, c – gautos reikšmės a nuotraukoje.....	49
3.22 pav. Rezultatų pasiskirstymas masės centro metodu (rezoliucija 640x480)	50
3.23 pav. Rezultatų pasiskirstymas masės centro metodu (rezoliucija 800x600)	51
3.24 pav. Rezultatų pasiskirstymas koreguotu masės centro metodu (rezoliucija 640x480)	52
3.25 pav. Rezultatų pasiskirstymas koreguotu masės centro metodu (rezoliucija 800x600).....	52
3.26 pav. Masės centro metodu gautų rezultatų palyginimas	53
3.27 pav. Naudotų metodų palyginimas (rezoliucija – 640x480).....	55
3.28 pav. Naudotų metodų palyginimas (rezoliucija – 800x600).....	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Trianguliacijos geometrijos išdėstymų būdų palyginimas.....	17
1.2 lentelė. Eksperimentiniai palyginimai [3]	18
1.3 lentelė: Matavimų paklaidos milimetrais [7].....	24
1.4 lentelė. Kubo išmatuotas aukštis [22].....	26
1.5 lentelė. Pėdos parametrų kitimas esant skirtingoms apkrovoms [15]	26
2.1 lentelė. Lazerio specifikacijos.	29
2.2 lentelė. Vaizdo kameros specifikacijos.	29
2.3 lentelė. Asmeninio kompiuterio charakteristikos.	30
2.4 lentelė. Sistemos duomenys.....	31
3.1 lentelė. Bandymui pasirinkti objektai.....	33
3.2 lentelė. Gauti rezultatai – maksimalaus piko metodas (maksimali, minimali vertės)	35
3.3 lentelė. Gauti rezultatai maksimalaus piko metodu (pirmasis maksimumas).	38
3.4 lentelė. Gauti rezultatai modifikavus maksimalaus piko metodą	40
3.5 lentelė. Gauti rezultatai – maksimalaus piko metodas (paskutinis maksimumas)	42
3.6 lentelė. Gauti rezultatai naudojant surastus lazerio linijų centrus	44
3.7 lentelė. Gauti rezultatai pritaikius Gauso atotrūkio maksimumo interpoliaciją	47
3.8 lentelė. Gauti rezultatai atlikus skaičiavimus masės centro metodu	50
3.9 lentelė. Gauti rezultatai naudojant masės centro metodą su koregavimo konstanta	51
3.10 lentelė. Gautų rezultatų palyginimas, matuojant sferinį ir plokščią kūną	54

SANTRUMPŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

PSD (angl. *Position Sensitive Detector*) – Pozicijai jautrus jutiklis

CCD (angl. *Charge–Coupled Device*) – Krūvio sąsajos įtaisas

RGB (angl. *Red, Green, Blue*) – RŽM spalvų modelis. Spalvų modelis, kuriame visos spalvos gaunamos iš trijų pagrindinių spalvų: raudonos, žalios ir mėlynos.

LDA (angl. *Line Detection Algorithm*) – Linijos aptikimo algoritmas

OLP (angl. *Optimal Line Profile*) – Optimalus linijos profilis

PCB (angl. *Printed Circuit Board*) – Spausdintinė plokštė

2D (angl. *Two-Dimensional*) – Dvimatis

3D (angl. *Three-Dimensional*) – Trimatis

IVADAS

Spartėjantis technologijų tobulėjimas įneša įvairių naujovių į mūsų gyvenimą. Siekiant išnaudoti visas jų teikiamas galimybes, žmogus privalo sparčiai žengti į priekį kartu su technologijomis. Taip pat, be žmogaus įsikišimo, pastarųjų plėtra greitai sustotų.

Kartu su moderniosios pramonės plėtra, vis daugiau ir daugiau inžinierių atkreipia dėmesį į matavimo principą, pagrįstą optine trianguliacija, kuris pasižymi privalumų gausa, įskaitant nekontaktinį veikimą, preciziškumą, nesudėtingą automatinį valdymą. Taip pat tai plačiai taikoma objektų profiliavimui, automatiniams procesams įgyvendinti. Nepaisant to, tikslus matavimas visuomet buvo svarbus rodiklis pramoniniams įrenginiams, nes jie buvo sąlygojami jutiklių, paremtų lazerio trianguliacija, detektuojamo objekto charakteristikų ir aplinkos [4,5].

Atsiradus ir vis labiau tobulėjant nekontaktinėms matavimo technologijoms, išvelgiamos labai plačios jų panaudojimo galimybės. Jos ne tik leidžia greitai ir tiksliai nustatyti matmenis, atstumus, bet ir skatina trimačių objektų rekonstrukcijos metodų atsiradimą. Jie vis dažniau pakeičia tradicinį kompiuterinį modeliavimą ir pasižymi galimybėmis greitai ir tiksliai gauti virtualius realaus pasaulio objektų modelius.

Skirtingos įrangos parinkimas, įvairūs dizaino variantai, skirtinga geometrija pritaikoma tam tikriems, konkrečioms atvejams dėl jų specifinių savybių. Visa tai sunkina tikslaus projekto sukūrimą. Šiame magistro baigiamajame projekte yra atliekama literatūros analizė, kurios metu apžvelgiami galimi problemos sprendimo metodai. Darbe nagrinėjami bendri matavimo ir rekonstrukcijos metodai, tačiau didesnis dėmesys skiriamas metodams, teikiantiems didesnę matavimo tikslumą arba išsiskiriantiems greitaveika. Taip pat darbe aprašomi nekontaktinės sistemos sudarymo principai, suprogramuojamas reikalingas kodas ir atliekamas sistemos tikslumo tyrimas.

Darbo tikslas – atlikti nekontaktinės matavimo sistemos, skirtos platiems objektams matuoti, tyrimą.

Darbo uždaviniai: atlikti literatūros analizę, sudaryti tiriamos sistemos maketą, atlikti pasirinktų linijos aptikimo algoritmų tyrimą, tikslumo ir greitaveikos atžvilgiu.

Darbo objektas – nekontaktinė matavimo sistema, paremta lazerio trianguliacijos veikimu.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Problemos aktualumas

Tobulėjant technologijoms, pastarosios užima vis didesnę dalį žmonių gyvenime. Itin aktualios tampa priemonės leidžiančios greitai ir efektyviai išmatuoti objektus, daiktus ir t.t. Populiarėja nekontaktinės technologijos, paremtos stereometrija ir lazerio trianguliacija, kurios leidžia matuoti, įvertinti defektus, atkurti vaizdą. Tai tokios technologijos kaip 3D skeneriai [2,7,15–18], skirti atkurti skenuojamą objektą skaitmeninėje aplinkoje, tai yra – sukurti jo skaitmeninį modelį. Taip pat prietaisai, leidžiantys įvertinti matuojamo objekto geometrinę deformaciją (pvz. rato formos matavimas ir vertinimas [19]), dantų plokštelės formos nustatymas [18] ar žmogaus pėdos matavimas ir įvertinimas, esant skirtingoms sąlygoms, įvertinant svorio kitimą, siekiant pagaminti specialius ortopedinius, sportinius batus [15] ar kitų kūno dalių įvertinimas, kuriant bioninius protezus. Pramonėje gali būti pritaikoma matuoti konvejeriu judančius gaminius, tokius kaip plieniniai strypai, plokštės [20] ar kiti.

Savaime suprantama, kad šie matavimai turi būti itin tikslūs, kitu atveju atkurtas objektas neatitiks matmenų. Siekiant įvertinti tam tikrų reiškinių įtaką, gali atsirasti papildomos paklaidos, modelis bus iškraipytų formų. Taip pat pagal atliktus matavimus, pagaminus dantų plokštelę, ortopedinius ar sportinius batus, jie turi tiksliai atitikti žmogaus poreikius. Kitu atveju bus jaučiamas diskomfortas, technologija neatitiks keliamų reikalavimų ir nebus naudinga. Jeigu sukurtas rato geometrijos matavimo įtaisas neįvertins rato deformacijos ir defektų, atsiras vibracijos, diskomfortas, gali pakenkti saugumui. Šio darbo tikslas ir yra įvertinti sistemos, paremtos lazerio trianguliacijos principu, tikslumą, šių sistemų galimybes ir įvairių reiškinių, aplinkybių įtaką joms.

1.1.1 Kontaktiniai matavimo įtaisai

Kontaktiniai įrenginiai matuoja objekto matmenis fizinio kontakto metu. Tokių prietaisų privalumas – didelis tikslumas, todėl jie dažnai yra naudojami pramoninėje gamyboje. Tačiau dėl savo veikimo principo, tokie įrenginiai turi ir neigiamų savybių. Matavimo metu gali būti pažeistas arba deformuojamas matuojamas objektas [2]. Toks veikimo principas yra sąlyginai lėtas, jei lyginsime jį su kitais matavimo metodais. Taip pat mechaninės sistemos, kurios remiasi kontaktiniu matavimu gali paveikti produkto paviršių inspektavimo metu, tai yra jį pažeisti, įbrėžti ar kitaip pakenkti prekinei išvaizdai.

1.1.2 Nekontaktiniai matavimo įtaisai

Tradiciskai nekontaktiniai matavimai yra klasifikuojami į dvi grupes: pasyvius, kurie reikalauja tik aplinkos šviesos apšviečiant paviršių ir aktyvius, kuriuose koncentruota šviesa yra nukreipiama ant matuojamo objekto paviršiaus. Šie metodai taip pat gali būti klasifikuojami remiantis erdvės arba laiko domenais, kuriuose tiriamasis objektas yra padėtas [20]. Vienas populiariausių pasyvaus matavimo metodų yra paremtas stereometrija. Šis metodas naudoja dvi kameras, į kurių objektyvus lygiagrečiai krenta šviesos srautas, atsispindėjęs nuo objekto paviršiaus. Trijų dimensijų informacija gaunama surandant ir sutapatinant atitinkamus vaizdus gautuose kadruose.

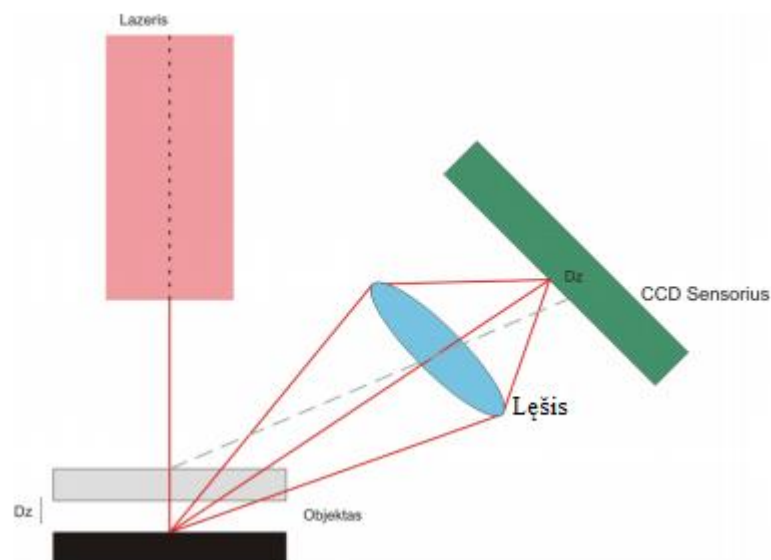
Nekontaktinių aktyviųjų matavimo prietaisų veikimas yra pagrįstas elektromagnetinių bangų spinduliavimu į tiriamąjį objektą ir atspindžių nuo jo nustatymu. Šios bangos gali būti tiek šviesa, tiek rentgeno spinduliai ar ultragarsas. Tačiau bene labiausiai paplitę matavimo įtaisai pagrįsti lazerio skleidžiamos šviesos atspindžio aptykimu. Šių prietaisų pagrindinis komponentas – lazerio šviesos atspindžio detektorius. Pastarasis matuoja laiką, per kurį šviesa pasiekia tiriamąjį objektą ir atsispindėjusi grįžta atgal. Žinant šviesos greitį c , apskaičiuojamas atstumas iki objekto paviršiaus, o vieno konkretaus taško *atstumas* $= \frac{c \cdot t}{2}$. Tokiu būdu, vienu metu yra matuojamas atstumas iki vieno paviršiaus taško, todėl reikia peržiūrėti visą paviršių nuosekliai. Tokio tipo įrenginiai yra pritaikomi objektams, esantiems dideliu atstumu nuo paties įtaiso, skaitmenizuoti. Todėl jie dažnai naudojami matuoti dideles struktūras, pavyzdžiui pastatus. Veikdamas dideliais atstumais aparatas praranda tikslumą. Dėl šio trūkumo skenuojamo objekto kampai yra sunkiai atpažįstami, nes šiose srityse padidėja šviesos išsklaidymas.

Vystantis pramonei, vis daugiau dėmesio skiriama matavimams, pagrįstiems optikos trianguliacija, kurie turi daug privalumų, įskaitant bekontaktį veikimą, didelį tikslumą (iki 0,1 μm [24]), lengvai įgyvendinamą automatikos kontrolę [3]. Taip pat jie plačiai taikomi objektams profiliuoti, automatiniams procesams. Nepaisant to, tikslus matavimas visuomet buvo svarbus pramonės įrenginių rodiklis, o tikslūs matavimai buvo nulemti jutiklių, paremtų lazerio trianguliacija, detektuojamo objekto charakteristikų ir aplinkos [5,6]. Trianguliacijos metodas yra klasifikuojamas kaip nekontaktinis aktyvusis matavimo metodas. Yra daug organizacijų, pavyzdžiui: Tiandžino universitetas (angl. *Tianjin University*), Kinijos mokslo ir technologijų universitetas (angl. *China University of science and technology*), kurie atlieka tyrimus, susijusius su šia problematika. Be to, Hefėjaus pažangių mašinų institutas (angl. *Hefei Institute Intelligent Machines*) ir Kinijos mokslų akademija (angl. *Chinese Academy of Science*), studijavo lazerinius atstumo jutiklius, kurių tikslumas siekia daugiau negu 0,5 proc., o linijos nuokrypis 0,1 proc [3]. Lazeriniai atstumo jutikliai naudojami PSD (angl. *Position Sensitive Detector*) kaip fotoelektriniai

keitikliai. Pekino fotonikos institutas taip pat studijavo lazerio trianguliacija paremtas matavimo priemones su 0,5 proc. tikslumu [3]. Šiuo metu keletas užsienio bendrovių, atstovaujančios „Mitsubishi“ ir „National instruments“, sukūrė lazerio trianguliacijos jutiklius, veikiančius tiesioginiu būdu ir paremtus atspindžiu. Vidaus rinką užima NCDT serijos lazerio trianguliacijos prietaisai gaminami Vokietijoje, „Micro-Epsilon“ bendrovės ir LK serijos lazeriniai trianguliacijos prietaisai, pagaminti Japonijos įmonės „KEYENCE“. Šie lazerio trianguliacijos įrenginiai turi bendrų savybių, kurios greitai ir realiu laiku kompensuoja paklaidą, atsirandančią dėl matavimo paviršiaus specifikos [11–14].

Nepaisant kelių dešimtmečių intensyvių tyrimų, dauguma lazerio trianguliacijos sistemų dar negali būti tiksliai nuspėjamos. Be to, tradicinės lazerio trianguliacijos sistemos analizė parodė, kad joje yra daug trūkumų, įskaitant paklaidos netiesiškumą tarp įvesties ir išvesties, tarpusavio apribojimų tarp rezoliucijos ir matavimo diapazono. Taip pat kyla sunkumų siekiant plataus diapazono ir didelio tikslumo matavimų dėl CCD (angl. *charge-coupled device*) tobulinimo apribojimų.

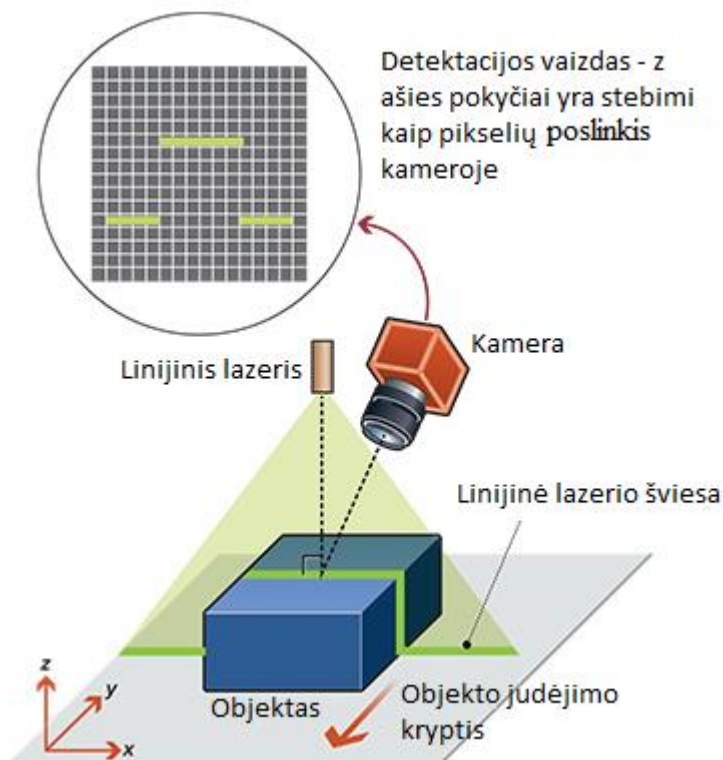
Šiame darbe bus tiriama matavimo sistema, pagrįsta tradiciniu lazerio trianguliacijos principu. Nagrinėjama sistema paremta linijiniu lazeriu matuojant atstumą su viena kamera. Tyrimo tikslas – nustatyti tokios sistemos tikslumą. Linijinis lazeris pasirinktas todėl, kad tokia sistema paprastesnė. Nereikia tikrinti kiekvieno taško atskirai, o iškart gaunamas linijos profilis.



1.1 pav. Trianguliacijos skeneris [2]

Trianguliacija paremti įtaisai yra sudaryti iš lazerio, lęšių sistemos ir skaitmeninės kameros. Priklausomai nuo to, kurioje vietoje lazerio spindulys atsимуša į skenuojamą paviršių, atsispindėjęs jis fiksuojamas skirtingose kameros matymo lauko vietose. Tokia metodika vadinama trianguliacija, nes lazeris, jo spindulio taškas ant skenuojamo paviršiaus ir kamera

sudaro trikampį (žr. 1.1 pav.). Atstumas tarp lazerio ir kameros bei kampai, priklausomai nuo konstrukcijos, yra žinomi. Trikampio kampas, kuriame yra kamera, gali būti nustatytas pagal tai, kurioje vietoje yra lazerio spindulio taškelis kameros matymo lauke. Ši informacija yra pakankama norint nustatyti trikampio dydį ir formą bei tam, kad fiksuoti skenuojamo objekto paviršiaus tašką erdvėje. Dažniau yra naudojamas linijinis lazeris vietoj taškinio (žr. 1.2 pav.). Tokiu būdu yra paspartinamas skenavimo procesas. Įvertinus matavimo metodų savybes, jų veikimo principus, šiame darbe naudojama matavimo sistema, paremta trianguliacija, nes labiausiai atitinka nagrinėjamos problemos pobūdį.

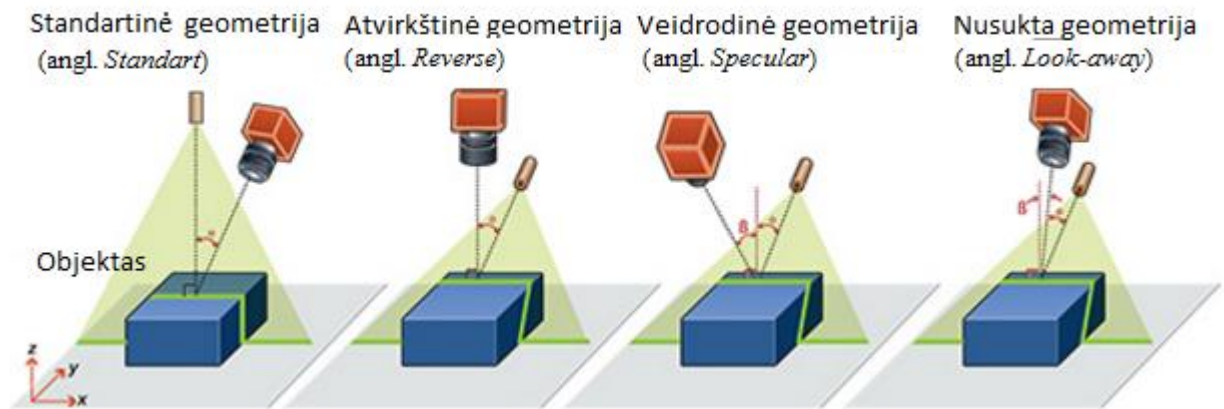


1.2 pav. Trianguliacijos skaitytuvas su linijiniu lazeriu [1]

1.2 Metodai ir jų realizacija

1.2.1 Įtaisų geometrija

Lazerio ir kameros padėčių parinkimas lemia matavimo kokybę. Linijinio lazerio projekcijos sistema gali būti išdėstyta keliais skirtingais būdais [1], kurių kiekvienas turi savo unikalias charakteristikas, privalumus ir trūkumus. Keturi labiausiai paplitę geometrijos išdėstymo būdai yra parodyti 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Lazerio ir kameros išdėstymo būdai [1]

Standartiniu geometrijos atveju, kuris yra dažniausiai taikomas metodas, lazerio linija yra projektuojama statmenai nominaliai matavimo (x, y) plokštumai. Svarbiausias šios konfigūracijos bruožas yra tai, kad objekto aukščio svyravimai pagal projektuojamą liniją nedaro įtakos linijos y koordinatės vertei. Tai supaprastina vėlesnius skaičiavimus, reikalingus gauti objekto formą, todėl tokia sistema yra greitesnė, tikslesnė ir lengviau kalibruojama realizavimo metu.

Vienas trūkumas standartinės geometrijos yra tai, kad kamera fiksuoja objektą kampu. Taip padidėja fiksuojamo lauko gylis, į kurį pastarasis turi tilpti, kai objekto aukštis svyruoja. Tai taip pat reiškia, kad objektyvas sukuria didesnę didinimą, kai objekto aukštis (taigi taip pat atstumas nuo objektyvo) keičiasi. Taigi bandomas objektas turi būti kalibruojamas, siekiant gauti tikslius matavimo rezultatus šia sistema.

Taip pat, naudojant šią geometriją, atsiranda okliuzijos tikimybė. Tiksliau, kai kamera filmuoja objektą kitu kampu negu statmenai į inspektavimo paviršių, ten atsiranda keletas linijos dalių, kurios yra blokuojamos arba uždengiamos iš kameros pusės, nes joks objektas nėra visiškai plokščias. Tai sukuria būdingą šio dizaino trūkumą, nes kai matuojamo aukščio raiška didėja standartinės geometrijos atveju didinant kampą, taip pat didėja okliuzijos tikimybė. Plyšio skeneriuose dažniausiai naudojamas 30° kampas. Bendroju atveju, kai trianguliacijos kampas didėja, jutiklio laukas mažėja ir raiška didėja. Pramoninių matavimų sistemų modeliavimas ir eksperimentavimas parodė, kad optimalus trianguliacijos kampas yra 45° [20]. Toks kampas leidžia pasiekti didžiausią skiriamąją gebą panaikinant galimybę prarasti duomenis dėl jutiklio okliuzijos.

Sukeičiant lazerio šaltinį ir kameros pozicijas gaunama atvirkštinė geometrija. Šiuo atveju gaunama didesnė aukščio rezoliucija nei standartinės konfigūracijos, nes lazerio apšvietimo įstrižas kampas reiškia, kad objekto aukštis daro didesnę pokytį lazerio linijos padėčiai. Kadangi kamera yra statmena matavimo plokštumai, išvengiama okliuzijos.

Tačiau atvirkštinės geometrijos konfigūracijos atveju, objekto aukščio pokytis sukelia pokytį y koordinacių ašyje, todėl tampa sudėtingiau interpretuoti rezultatus. Todėl šis metodas paprastai yra naudingiausias dirbant su plokščiais objektais.

Veidrodinės geometrijos konfigūracijoje tiek lazeris, tiek ir kamera yra neįprastu kampu į paviršių. Kadangi abi projekcijos yra pasvirusios, todėl matymo kampas suteikia didesnę aukščio rezoliuciją nei anksčiau aprašyti metodai. Tačiau, šiuo atveju yra įmanoma, kad kamera užfiksuos veidrodinį arba artimą veidrodiniam, lazerio atspindį. Tai gali sukelti matavimo paklaidų, jei šie atspindžiai pateks į detektoriaus židinį. Kita vertus, didesnis atspindys gali būti naudojamas siekiant padidinti signalo lygį nuo tamsių objektų, nes tamsūs objektai atspindi mažiau šviesos, todėl matavimo signalo lygis mažesnis – kitaip tariant, jutiklis užfiksuoja mažiau šviesos.

Darbas netoli veidrodinio atspindžio kampo paprastai teikia aukščiausio lygio atspindį nuo glotnių objektų. Tokiu atveju, kai matuojami tamsūs, glotnūs objektai, ši geometrija gali būti naudinga. Tačiau, jei objektas yra labai iškilus, darbas veidrodiniu kampu neduos žymaus atspindžio padidėjimo. Priklausomai nuo objekto spalvos ir tekstūros, gali būti naudinga dirbti netoli veidrodinio kampo, tačiau ne visuomet.

Paminėtina tai, kad veidrodinio geometrijos konfigūracijos atveju, objekto aukščio pokytis daro įtaką y koordinatės vertės pokyčiui, todėl tampa sudėtinga interpretuoti rezultatus. Taigi, šį būdą yra geriausia naudoti, kai siekiama gauti plokščių objektų atvaizdus. Pasviras kameros kampas taip pat veda prie tam tikros okliuzijos.

Nusuktos geometrijos konfigūracijoje tiek kamera, tiek ir linijinis lazeris yra pastatomi toje pačioje objekto pusėje. Tai žymiai sumažina veidrodinio atspindžio galimybę, išskyrus kai daiktas yra itin nelygus. Tačiau ši geometrija taip pat sumažina aukščio rezoliuciją, nes kameros kampas panašus į projektoriaus. Šiuo atveju taip pat vyksta okliuzija.

Žinoma, yra ir kitų galimų būdų kaip konfigūruoti trianguliacijos stebėjimo sistemą, kuri naudoja linijinį lazerį kaip šaltinį. Tačiau kiti metodai paprastai yra šių keturių pagrindinių geometrijos variantų variacijos. Tokie alternatyvūs metodai paprastai turi tokias pačias charakteristikas, kurias turi pagrindinis geometrijos atvejis ir kurio pagrindu jie yra gaunami. Aptartų išdėstymų palyginimas pateiktas 1.1 lentelėje.

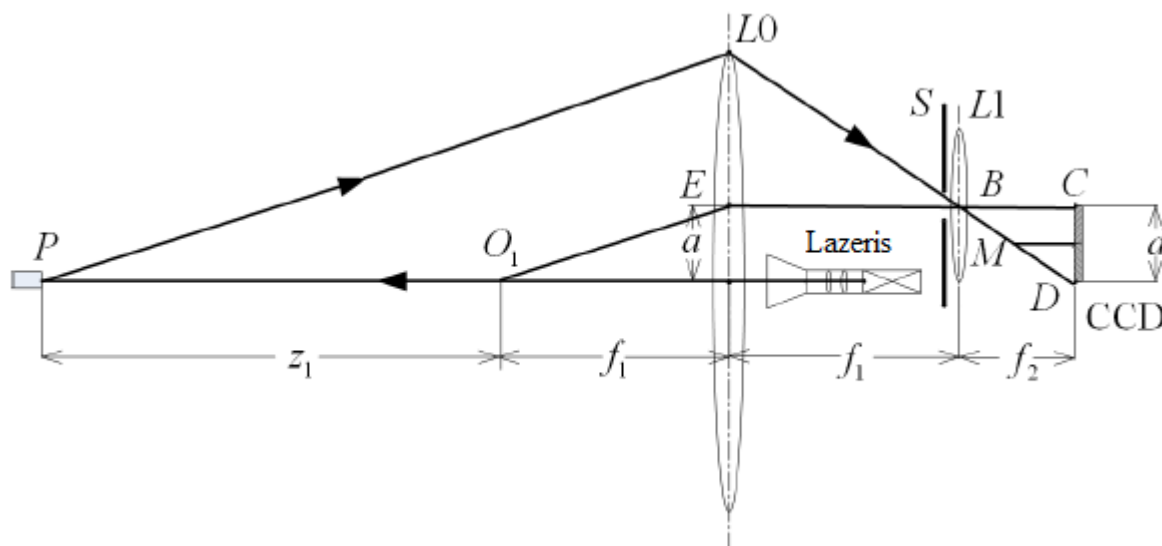
1.1 lentelė. Trianguliacijos geometrijos išdėstymų būdų palyginimas

	Standartinė geometrija	Atvirkštinė geometrija	Veidrodinė geometrija	Nusukta geometrija
Pagrindinis privalumas	Lengvi skaičiavimai	Padidėjusi aukščio rezoliucija	Naudinga tamsiems objektams	Gaunama didžiausia matavimo rezoliucija
Pagrindinis apribojimas	Reikalauja didelio objektyvo ryškumo į gylį	Sudėtingi skaičiavimai	Atspindžiai gali lemti matavimo paklaidas	Okliuzija
Pritaikymas	Bendruoju atveju	Siekiant didelio tikslumo	Tamsiems arba netolygiems objektams	Objektams su atsispindinčiu paviršiumi (stiklas, metalas, t.t.)

1.2.2 Taškinis lazeris

Kinijos inžinieriai: Y. Zhang, C. Wang ir T. Xing tyrė nekontaktinę optinės atstumo matavimo sistemą pasitelkiant taškinį lazerį [3].

Iš pradžių buvo analizuojama tik viena vaizdo gavimo objektyvo padėtis (žr. 1.4 pav.). Lazerio spindulis per objektyvą išilgai optinės ašies LO apšviečia tašką P nustatytame objekte, ir tada, išsklaidyta šviesa pasiekia aptikimo prietaisą – CCD , per objektyvo lęšį $L0$ ir $L1$. Atstumas Z_1 tarp P ir fokusavimo taško yra aptinkamas D taške (šviesos taškas ant CCD). Remiantis geometrine optika, mes žinome, kad lygiagretūs šviesos pluoštai, kurie turi tam tikrą kampą su optine ašimi, konverguoja atvaizdo židinio plokštumoje, objektyve. Todėl reikės užtikrinti, kad konvergencijos lęšis būtų padėtas objektyvo židinio plokštumoje $L0$, tam kad pluoštas iš P , lygiagrečiai su tiesia linija konverguotų taške B , o vaizdas D – CCD .



1.4 pav. Pagrindinis atstumo matavimo, naudojant taškinį lazerį, principas [3]

Pasinaudojant trikampių teorija:

$$\frac{d}{FE} = \frac{f_2}{f_1} \quad (1)$$

$$\frac{FE}{z_1} = \frac{a}{f_1} \quad (2)$$

Sudauginus formule (1) su formule (2) ir atlikus pakeitimus:

$$d = \left(\frac{af_2}{f_1^2}\right)z_1 \quad (3)$$

$$z_1 = \frac{df_1^2}{af_2} \quad (4)$$

Tada sistemos teorinė rezoliucija diferencialui z_1 gaunama:

$$\partial z_1 = \partial d \frac{f_1^2}{af_2} \quad (5)$$

$$k = \Delta d \frac{f_1^2}{af_2} \quad (6)$$

Čia: f_1 yra židinio nuotolis lęšio $L0$, f_2 yra židinio nuotolis lęšio $L1$; Δd yra CCD pikselio dydis. Jutiklio raiška yra sąlygojama dydžio a , kuris yra optinė ašies kompensacija, kuri palygina $L1$ lęšio konvergenciją su lęšiu $L0$.

Šiuo būdu eksperimentiškai gautų rezultatų palyginimas su dvejojpo dažnio lazeriniu interferometru yra pateiktas 1.2 lentelėje [3].

1.2 lentelė. Eksperimentiniai palyginimai [3]

Bandymo Nr.	Suprojektuota sistema (mm)	H_p interferometras (mm)	Paklaida (μm)
1	304,177	304,1273	50
2	454,885	454,8401	45
3	587,881	587,8362	45
4	669,788	669,7443	44
5	724,274	724,2311	43
6	807,973	807,9301	43
7	978,855	978,8117	44
8	1108,386	1108,3416	45
9	1307,265	1307,2217	44
10	1454,446	1454,4004	46
11	1575,688	1575,6406	48
12	1781,562	1781,5156	47

Matavimo paklaida yra mažiau nei 51 μm ir suprojektuotos sistemos skiriamoji geba yra mažiau nei 42 μm . Sukurta sistema yra pasiekiamas mašininis mechaninis tikslumas.

1.2.3 Linijinis lazeris

Šiame skyriuje bus nagrinėjamas sistemos veikimas ir atstatymo procesas, kuomet naudojamas linijinis lazeris. Taip pat aprašomi linijos rekonstrukcijos žingsniai.

1.2.3.1 Atstatymas

Atstatymo procesas apima lazerio linijos išskyrimą iš jutiklio duomenų ir santykinio aukščio informacijos gavimą. Darant prielaidą, kad jutiklis yra kamera, poslinkis yra atpažįstamas kaip lazerio linijos pikselių perėjimas 2D vaizde. Siekiant optimalios rekonstrukcijos, aptiktos linijos storis turi būti didesnis už vieną pikselį. Papildomi keli optiniai reiškiniai (pvz.: paviršiaus sklaida ir (pasklidę) atspindžiai) gali turėti neigiamos įtakos gautame vaizde [6] ir todėl turėtų būti apdorojamas rekonstrukcijos algoritmu. Taip pat siekiant gauti geresnį signalo–triukšmo santykį prasminga naudoti optinius filtrus [20], atsižvelgiant į naudojamo lazerio šviesą ir jos bangos ilgį. Tolesniuose skyriuose yra aptarti rekonstrukcijos žingsniai.

1.2.3.2 Intensyvumo matrica

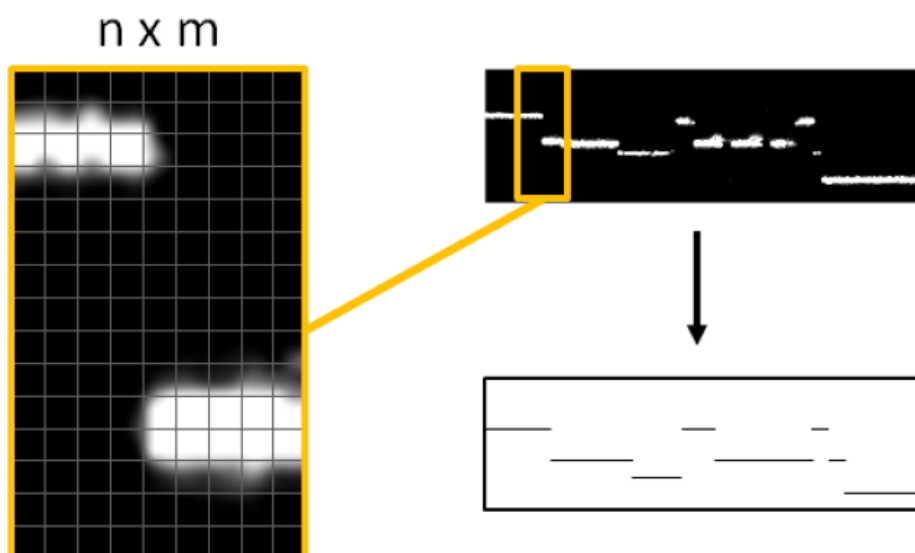
Pirmasis žingsnis rekonstrukcijoje yra linijos padėties nustatymas ir išskyrimas. Prieš taikant bet kokį linijos aptikimo algoritmą, intensyvumo matrica \hat{I} generuojama iš įrašyto vaizdo. Jei vaizdo duomenys turi RGB spalvų kanalus, jų derinys gali būti panaudotas, siekiant gauti intensyvumo matricą. Torsten Koch, Matthias Breier and Wei Li tyrimai parodė, kad kvadratinė kombinacija iš raudonos ir žalios spalvų kanalų suteikia geriausias rezultatus tolesniam apdorojimui [7]:

$$\hat{I} = (R + G)^2 \quad (7)$$

1.2.3.3 Linijos aptikimas

Linijos aptikimas gali būti realizuojamas naudojant linijos aptikimo algoritmą (*LDA* angl. *line detection algorithm*), kuris nustato linijos poziciją stebimoje vietoje. *LDA* algoritmai veikia kiekviename stulpelio vektoriuje $\mathbf{i}(x) = \hat{I}(x, c)$ intensyvumo matricoje \hat{I} (1.5 pav.), kur c yra

stulpelio indeksas. Po linijos nustatymo kiekviename paveiksle, optimalus linijos profilis (*OLP* angl. *optimal line profile*) yra nustatomas. Preliminarus aukščio žemėlapis gali būti nustatytas, derinant *OLP* atsižvelgiant į vaizdų seką.



1.5 pav. Optimalaus linijos profilio skaičiavimas [7]

1.2.3.4 Linijos aptikimo algoritmai – LDA

1. Maksimalaus piko: greičiausias ir paprasčiausias būdas yra naudoti maksimumo algoritmą. Jis grąžina aukščiausios intensyvumo vertės poziciją kiekviename stulpelyje [7]:

$$p_{max} = \arg\{\max\{i(x)\}\} \quad (8)$$

2. Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija: Atotrūkio maksimumas naudoja didžiausią piką b ir abi gretutines intensyvumo vertes a ir c , kurios yra gretimos toje pačioje skiltyje. Daroma prielaida, kad optimalus maksimumo pikas yra tarp dviejų diskretinių imčių ir apskaičiuoja sub-pikselyje maksimumą [25]:

$$p_{opt} = \left(p_{max} - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln(c) - \ln(a)}{\ln(a) + \ln(c) - 2\ln(b)} \right) \right) \quad (9)$$

Kur p_{max} yra maksimalios piko vertės b pikselio pozicija.

3. Masės centras: Šis algoritmas yra grindžiamas masės vidurkio metodu stulpelyje vektoriaus $i(x)$ ir grąžina masės centro poziciją [6,25]:

$$p_{opt} = \frac{\sum_{x=k}^l i(x)x}{\sum_{x=k}^l i(x)}, \quad l > k \quad (10)$$

Priimame prielaidą, kad lazerio linijos intensyvumo profilis atitinka tik vieną Gauso pasiskirstymą su aiškiu maksimumu. Priešingu atveju masės centras gali būti apskaičiuotas tarp dviejų skirtingų maksimumų. Modifikuotu atveju, intervalas $[k, l]$, kur $k < p_{max} < l$ ir p_{max} yra didžiausio intensyvumo piko pozicija, yra parenkamas masės centro apskaičiavimui.

Hiroshi Akima siūlo atkreipti dėmesį į tai, kad šis metodas turi kelias specifines savybes [21]. Šis metodas atsižvelgia į „šešėlius“, kuriuos paveikia artimiausi taškai esantys šalia, ta pačia kryptimi. Tai iššaukia pagrįstus slopinimus gaunamuose duomenyse. Tačiau jis neatkuria plokštumos, kai visi pateikti taškai krenta pasvirusioje plokštumoje. Ši savybė yra laikoma rimtu trūkumu.

4. Blais ir Rioux filtrai: tiesiniai filtrai paremti skaitinėmis išvestinėmis linijos nustatymui, buvo pristatytos Blais'o ir Rioux'o [9]. Jie gali būti sukurti skirtingų ilgių, siekiant iš anksto pašalinti signalo triukšmus. Čia 4-tos ir 8-tos eilės filtrai yra pateikti:

$$\begin{aligned} f_4 &= f(x-2) + f(x-1) - f(x+1) - f(x+2) \\ f_8 &= f(x-4) + f(x-3) - f(x-1) + f(x-1) - f(x+1) - f(x+2) \\ &\quad - f(x+3) - f(x+4) \end{aligned} \quad (11)$$

Didžiausias filtro atsakas po intensyvumo vektoriaus susukimo $i(x)$ su šiais filtrais rodo geriausią lazerio linijos padėtį:

$$p_{opt} = \arg\{\max\{f_n(x) * i(x)\}\}, \quad n \in \{4,8\} \quad (12)$$

5. Parabolinė Taylora aproksimacija: ši aproksimacija grindžiama Teiloro eilutės signalo intensyvumo piko skleidimu [6]. Priimant sub-pikselių maksimumą, padėtis gali būti apskaičiuojama taip:

$$i'(x + \delta) = 0 = i'(x) + \delta i''(x) + O(\delta^2) \quad (13)$$

Diskretūs skaičiavimai atliekami neįvertinant aukštesnių eilių $O(\delta^2)$ ir gali nesudėtingai būti atlikti skaičiuojant išvestines [9].

$$\delta = -\frac{i'(x)}{i''(x)} = \frac{i(x+1) - i(x-1)}{2(i(x+1) - 2i(x) + i(x-1)))} \quad (14)$$

$$p_{opt} = p_{max} + \delta p_{opt} \quad (15)$$

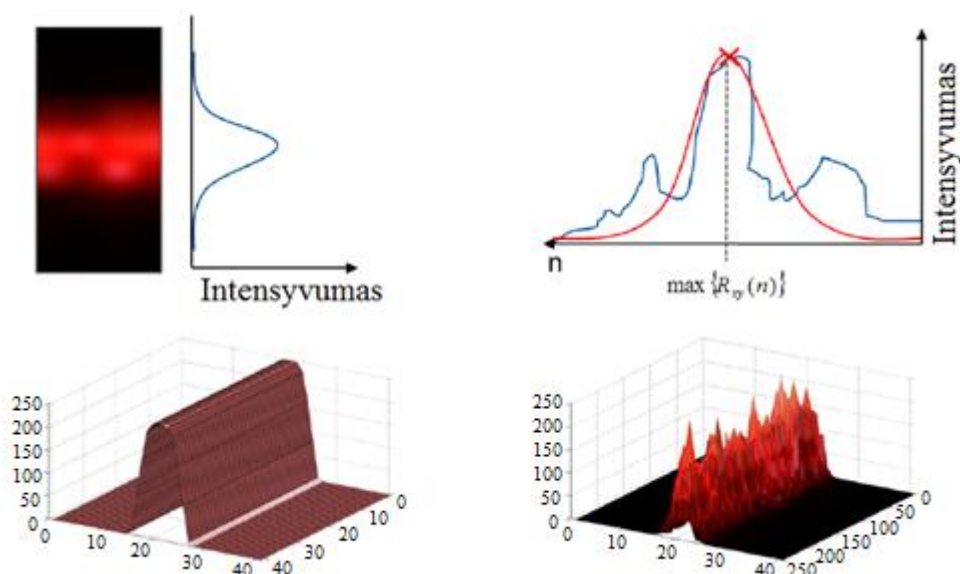
6. Koreliacija su Gauso intensyvumo profiliu. Tai dar vienas stabilus ir tikslus metodas, kuris yra paremtas koreliacija. Darant prielaidą, intensyvumo reikšmės pasiskirsčiusios pagal Gauso taisyklę, koreliacija virš intensyvumo vektoriaus su intensyvumo profiliu modeliuotu pagal Gausą išreiškiama 16 formule [6,9].

$$g(x)\exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

Pastaroji duoda optimalią linijos poziciją:

$$p_{opt} = \arg\{\max\{i(x) * g(x)\}\} \quad (17)$$

1.6 paveiksle tai yra iliustruota paveikslo viršuje. Šiuo koreliacijos algoritmo modifikuota versija naudoja matavimo intensyvumo pasiskirstymą kaip modelį (žr. apatinę dešinę iliustraciją 1.6 pav., kur apatinis kairys paveikslas iliustruoja Gauso modelį).



1.6 pav. Optimalus ir realus projekcinis linijos intensyvumo profilis [7]

7. Akima aproksimacijos metodas. Metalų plokščių matavimui buvo pasirinktas šis metodas [20], dėl gaunamo didesnio glotnumo, lyginant su tiesiniais ir kvadratiniais linijos segmentavimais. Taip gauti segmentai buvo tinkamiausi, projektuojant lazerio liniją ant plokščių [21,26]. Taip pat triukšmo aptikimas ir pašalinimas buvo nesudėtingai įgyvendintas, naudojant Akima aproksimaciją.

Akima aproksimacija yra nuolat kintančių sub-splainų interpoliacija. Ji sudaryta iš *piecewise* trečiosios eilės polinomų [21]. Siekiant nustatyti interpoliacijos polinomo koeficientus, naudojami tik duomenys iš gretimų taškų. Nereikia spręsti didelių lygčių sistemų ir todėl šis interpoliacijos metodas labai veiksmingas skaičiavimuose. Kadangi nėra priimama jokia funkcijos forma kreivei ir atsižvelgiama tik į nedidelį taškų kiekį, šis metodas leidžia išvengti nenatūralių

iškraipymų galutinėje kreivėje. Duomenų kiekio monotoniškumas yra nebūtinai išlaikomas gautoje interpoliavimo funkcijoje. Su papildomais apskaičiuotų išvestinių apribojimais galima sukurti monotoniškumą išsaugančią interpoliacijos funkciją.

1.2.3.5 Lazerio aptikimas Matlab terpėje

Šiame skyriuje bus nagrinėjamas lazerio išskyrimo algoritmas, kuris buvo pritaikytas roboto orientacijai aplinkoje [10]. Kuriant lazerinio jutiklio programą, kuri veikia kompiuteryje, o ne mikro–valdiklyje, siūloma naudoti „Matlab“ programavimo paketą. Atsižvelgiant į tai, kad šis paketas veikia lėtai kompiliuojant iteracijas ar uždarus kontūrus, lyginant su kitomis programavimo kalbomis, yra panaudojamos C kalbos funkcijos [29]. Iš padaryto vaizdo kadro, linija gali būti išskiriama ir apdorojama kelias etapais:

- I. Vaizdas yra koduojamas *RGB* matricoje. Atsižvelgiant į naudojamo lazerio šviesos bangos ilgį, reikia išskirti atitinkamą dedamąją iš pastarosios matricos.
- II. Atsižvelgiant į tai, kokios spalvos intensyvumas talpinamas matricos nariuose, reikia atimti x dydį iš kiekvienos vertės (šaltinis siūlo 200). Tokiu būdu gaunama matrica, kurios reikšmės lygios 0 ir kurios nesusijusios su lazerio projekcija.
- III. Siekiant supaprastinti gautą matricą, *bwareaopen()* funkcija yra panaudojama iš „Matlab“ bibliotekos. Ši funkcija pakeičia matricą į dvejetainę, t.y. vertės lygios 0 lieka nepakitusios, o visos kitos tampa lygios 1.
- IV. Pasinaudojama *orglaser.c MEX* funkcija iš bibliotekos. Ji leidžia suspausti anksčiau gautą matricą į $n \times m$ masyvą. Kiekvienai eilutės pozicijai, pirmasis stulpelio indeksas, kuris reiškia ne nulinę vertę, yra gražinamas.
- V. Panaudojama *realDistance.c MEX* funkcija apskaičiuoti tikruosius atstumus. Čia ištiesinimas yra reikalingas, nes vaizdo kamera gaunamas vaizdas yra iškreiptas. Reikia sutapatinti realų atstumą su kiekvienu stulpeliu ir rasti tarp jų ryšį. Šaltinis tyrimo metu nustatė eksponentinį ryšį [10].
- VI. Dėl matricos supaprastinimo reikia įvertinti tarpus atkurtoje lazerio linijoje (lazerio linijos ne vientisumą). Tam panaudojama *obstacle.c MEX* funkcija, kuri gražina penkis lygiagrečius masyvus. Jie nurodo kiek vientisų linijų yra, trūkių atstumus (iš kairės ir dešinės kreivės pusės), poziciją (skaičiuojant iš kairės ir dešinės) bei vertę, kuri įvertina ar liniją yra vientisa, ar ne.

1.2.3.6 Aukščio žemėlapis

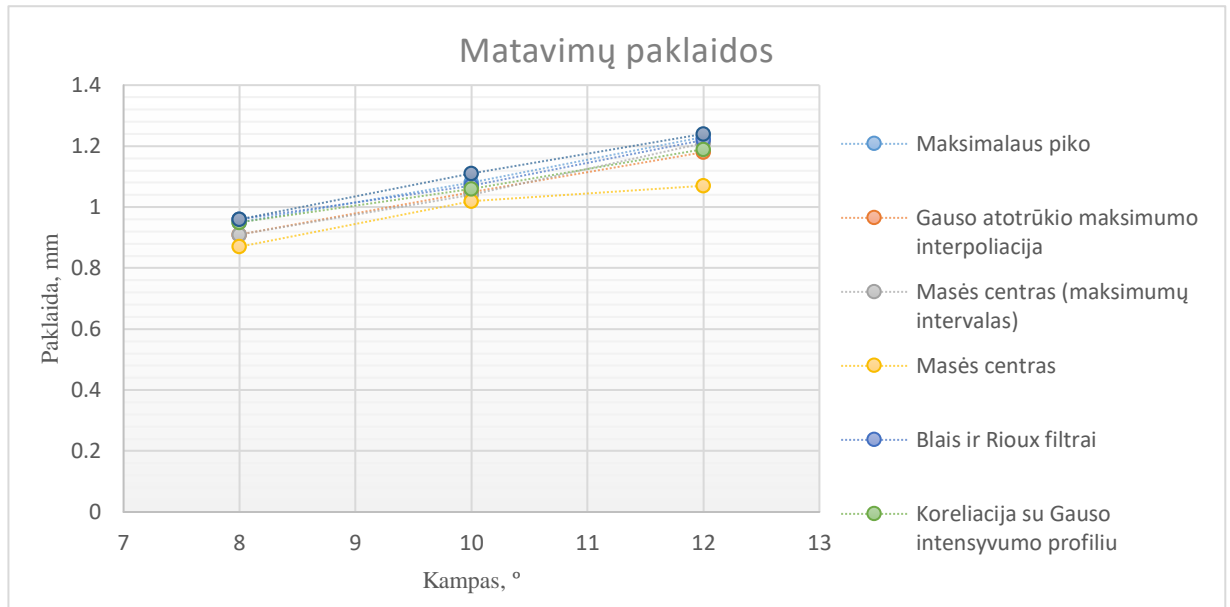
Rekonstruotas bandomo objekto aukščio žemėlapis yra aukščio profilis, išreikštas pikseliais, grindžiamas poslinkio aptikimu. Transformacija į absoliutines aukščio reikšmes gali būti padaryta, naudojant mastelio koeficientą ξ . Nepaisant to, kalibravimas turėtų būti atliktas naudojant žinomo aukščio objektą H_{abs} milimetrais (mm), pvz.: naudojant kubą. Absoliutinis aukštis $h(n)$ gali būti apskaičiuojamas, remiantis aukščiu, išreikštu pikseliais $\lambda_{h(n)}$ ir išmatuotu kalibruojamu aukščiu $\lambda_{kalibravimo}$ pagal formulę:

$$h(n) = \xi \lambda_{h(n)} = \frac{H_{abs}}{\lambda_{kalibravimo}} \lambda_{h(n)} \quad (18)$$

Metodai yra įvertinami, remiantis atliktais kitų šaltinių tyrimais [3,7,27]. 1.3 lentelė vaizduoja atstatymo rezultatus, naudojant skirtingus algoritmus ir kampus. Buvo naudojamas lazeris, kurio sklaidžiamos šviesos bangos ilgis – 660 ± 10 nm (raudonos spalvos). Kameros rezoliucija: 1600×150 pikselių. Su visais algoritmais geresni rezultatai gaunami, naudojant mažesnius kampus. Variacijos tarp jų yra mažos ir visi rezultatai išsidėstę apie 1mm paklaidos vidurkį. Šaltinis nenurodo, kokią plokštę naudoja tyrimo metu, tačiau turint omeny, kad standartinės PCB plokštės matmenys yra 2600×3600 mm, galima teigti, kad gaunama 0,04% paklaida. Gaunami tokie rezultatai [7]:

1.3 lentelė: Matavimų paklaidos milimetrais [7]

Algoritmas	Kampas		
	8°	10 °	12 °
Maksimalaus piko	0,95	1,08	1,23
Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija	0,91	1,05	1,18
Masės centras (maksimumų intervalas)	0,91	1,04	1,21
Masės centras	0,87	1,02	1,07
Blais ir Rioux filtrai	0,96	1,07	1,22
Koreliacija su Gauso intensyvumo profiliu	0,95	1,06	1,19
Parabolinė Taylora aproksimacija	0,96	1,11	1,24



1.7 pav. Matavimų paklaidos milimetrais – grafinė forma

Tiriant pėdos formos nustatymo sistemą [15], linijos išskyrimo uždavinys buvo padalintas į du etapus. Pirmasis žingsnis yra juostos išlinkio (krypties) aptikimas. Fono triukšmas yra eliminuojamas ir vaizdas skaitmeninamas. Skaitmeninta juosta yra suspaudžiama pagal X ir Y ašis, išlaikant vientisą formą. Antrasis žingsnis yra susijęs su sub-pikselių centro aptikimu. Tikslus kiekvienos kreivės pikselių centras yra skaičiuojamas pagal (19) ir (20) lygtis.

$$\bar{x} = \frac{\sum_i x_i c_i}{\sum_i c_i} \quad (19)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i c_i}{\sum_i c_i} \quad (20)$$

kur x ir y yra horizontali ir vertikali koordinatės, c yra koordinatės pilkosios skalės vertė.

Kalibravimui naudojamos lygtys, kurios susieja realią plotmę su gauto paveikslo plotme. Ši sąsaja gali būti nustatoma sekančiomis lygtimis:

$$x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} A_{ij} u^i v^j \quad (21)$$

$$y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} B_{ij} u^i v^j \quad (22)$$

Čia A_{ij} ir B_{ij} yra polinomų koeficientai, u ir v yra paveikslo erdvės koordinatės, x ir y koordinatės realioj erdvėj. A_{ij} ir B_{ij} gali būti išskaičiuoti Libingo metodu [22].

Šiuo būtu atliktame tyrime buvo gauta 0,6% maksimali paklaida, matuojant 80 mm briaunos kubo formos objektą. Tyrimas buvo atliktas 10 kartų, rezultatai pateikti 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Kubo išmatuotas aukštis [22]

Matavimo Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aukštis (mm)	80,47	80,48	80,46	80,48	80,43	80,45	80,44	80,42	80,42	80,44

Šio tyrimo metu taip pat buvo analizuojama objekto svorio įtaka matavimui. Dėl padidėjusios masės tenkančios objektui (pėdai), jis išlinksta, susispaudžia ir todėl kinta matmenys. Matmenų kitimas, didėjant apkrovos svoriui, pateiktas 1.5 lentelėje [15].

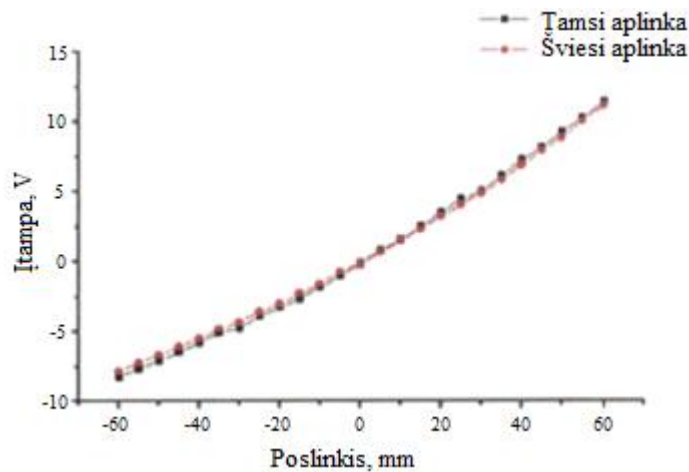
1.5 lentelė. Pėdos parametrų kitimas esant skirtingoms apkrovoms [15]

Apkrova	3kg	22kg	48kg	54kg	63kg
Pėdos ilgis (mm)	253,9	254,0	254,5	254,6	254,8
Kulkšnies plotis (mm)	94,7	98,6	100,2	101,1	101,2
Kulno plotis (mm)	73,4	76,7	78,5	79,2	80,4
Kulkšnies apimtis (mm)	244,7	248,8	252,5	258,2	258,8
Piršto aukštis (mm)	44,5	41,5	41,5	41	39,5
Pėdos išlinkio aukštis (mm)	17	17	16,5	16	16

Kaip matyti iš rezultatų, didėjant apkrovai, išmatuoti objekto matmenys taip pat didėja. Tai reikėtų įvertinti, naudojant lazerio trianguliacija paremtą sistemą, matuojant konvejeriu judančius objektus. Jeigu objektai yra skirtingos masės ir matmenų, tai paklaida gali kisti, suklibavus sistemą prie vieno dydžio objekto, bet matuojant kito dydžio bei masės objektą. Tai lemia pats objektas ir dėl jo masės nežymiai kintantis konvejerio įgaubimas.

1.2.4 Aplinkos įtaka matavimo tikslumui

Matuojant objektus yra svarbu atsižvelgti į aplinkos poveikį matavimo tikslumui. Foto elektroniniai detektoriai yra paremti šviesos signalo konvertavimu į elektrinį signalą. Taigi jutiklis veiks, esant bet kokiam apšvietimui. Todėl naudinga lazerio šviesa bus paveikta triukšmo dėl kitų šviesos šaltinių, esančių aplinkoje. Kinijos mokslininkai atliko aplinkos įtakos objekto matavimui tyrimą [22]. Gauti rezultatai pateikti 1.8 paveiksle.



1.8 pav. Įtampos pokytis esant skirtingoms aplinkoms [22]

Pateiktame paveiksle matyti, kad gaunamas atsakas yra panašus abiem atvejais. Žinoma, duomenys, esant tamsiai aplinkai, yra gaunami šiek tiek geresni. Tai mažai sąlygoja matavimą, todėl atliekant tyrimą šio poveikio bus nepaisoma.

1.3 Analizės išvados

Aukščiau apžvelgtos literatūros analizė atskleidė, kad trianguliacijos naudojimas paviršiams rekonstruoti ir matmenų nustatymui turi privalumų lyginant su kitais rekonstravimo ir matavimo būdais. Skirtingos įrangos parinkimas, įvairus jos išdėstymas, skirtinga geometrija pritaikoma tam tikriems, konkreitiems atvejams dėl jų specifinių savybių: geriau atpažįstami tamsūs arba skaidrūs, blizgūs objektai. Taip pat gaunamas didesnis tikslumas, tačiau naudojant šiuos metodus sudėtingėja skaičiavimai, ko pasekoje nukenčia greیتaveika. Taip pat reikia įvertinti veidrodičius atspindžius, dėl kurių sistema reikalauja tikslaus suderinimo ir keliami aukšti reikalavimai konstrukcijai. Praktiškai pritaikant trianguliaciją, galima rinktis iš didelės metodų ir algoritmų gausos.

Trianguliacijos metuose greیتaveikos problema taip pat yra aktuali. Dažnai reikalaujama, kad sistema dirbtų realiu laiku: nusiųsti duomenis per grįžtamąjį ryšį valdikliams ir atvaizduoti matavimus operatoriui. Laiko kriterijų šioms sistemoms apsprendžia dalių judėjimas gamybos metu. Matavimai pramonėje yra tikslingi, jeigu spėjama matuoti konvejeriu judančias dalis, t.y. matavimas tiesiogiai susijęs su konvejeriu judančios dalies greičiu. Greitesni ir tikslesni matavimai leidžia sparčiau nustatyti dalių galimas deformacijas. Tačiau aktualesnė problema yra naudojamų matavimo metodų tikslumas. Tai sąlygoja pasirinkta įranga. Todėl juos renkant svarbu atsižvelgti, kokių tikslu sistema yra projektuojama. Jeigu suprojektuota sistema bus nepakankamai tiksli, tuomet matuojant objektus atsiras paklaida, kuri nulems vėliau atsirandančius nuostolius, diskomfortą, sumažėjusį saugumą ar kitaip kritiškai paveiks sistemos panaudojimą.

Nors jau labai daug tyrimų atlikta trianguliacijos srityje, tačiau manau, kad šie paviršiaus matavimo metodai yra perspektyvūs ir galima juose atlikti pakeitimų, kurie padidintų veikimo efektyvumą, tikslumą. Savo darbe aš tiriu matavimo sistemą, panaudojant linijinį lazerį ir kamerą. Ši sistema yra paremta atvirkštinės trianguliacijos geometrija. Buvo pasirinkti maksimalaus piko, Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacijos ir masės centro algoritmai dėl tikslumo [7] arba sąlyginiai nesudėtingų skaičiavimų.

Literatūros analizės metu buvo iškelta problema, apžvelgti galimi jos sprendimo metodai, kurie paremti kitų šalių mokslininkų patirtimi. Taip pat pasirinktas sistemos tipas (linijinis lazeris) ir keli linijos aptikimo ir atstatymo metodai, kurių tikslumas siekia iki 0,6% matmens.

Kituose skyriuose bus pateikiamos pasirinktų įtaisų specifikacijos, sistemos sudarymo eiga ir kalibravimas. Taip pat turės būti atlikti bandymai siekiant nustatyti sukonstruotos sistemos tikslumą ir palyginti gautus rezultatus su aukščiau aptartais. Projekto metu galima atsižvelgti į lazerio skleidžiamos šviesos bangos ilgio įtaką sistemos charakteristikoms, nes literatūros šia tema nepavyko rasti, o tai irgi yra aktualu šio tipo sistemoms.

2. TIRIAMA SISTEMA

Šiame skyriuje aprašoma tyrimui naudota aparatūrinė ir programinė įranga bei pasirinktas sistemos dizainas. Taip pat pateikiami sudarytos sistemos parametrai ir skaičiavimo principai.

2.1 Naudota įranga

Matavimo sistemą sudaro:

1. Linijinis lazerio modulis;
2. Kompiuterinė vaizdo kamera;
3. Maitinimo šaltinis (3,5V);
4. Nešiojamas kompiuteris, informacijos apdorojimui.

2.1 lentelė. Lazerio specifikacijos.

Galia	5 mW
Fokusuojamas spindulys	Linija
Maitinimas	3,5V~4,5V
Korpusas	Metalas
Skleidžiama šviesa	Raudona ($\lambda=650\text{nm}$)
Matmenys	12,0x35mm
Srovė	40mA (maksimali)

Nuotraukoms fiksuoti buvo naudojama Creative VF0330 kompiuterinė vaizdo kamera. Jos specifikacijos pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Vaizdo kameros specifikacijos.

Modelis	Creative VF0330
Maksimali nuotraukos raiška	800x600
Maksimali vaizdo įrašo raiška	800x600@15fps
Fizinė sąsaja	USB 1.1 (palaiko USB 2.0)
Papildomos savybės	Rankiniu būdu reguliuojamas fokusavimo žiedas

Informacijos apdorojimui buvo naudojamas asmeninis kompiuteris *DELL Precision 3510*. Kadangi tai yra asmeninis kompiuteris, kuriame veikia daugelis procesų, nesusijusių su tiriamos sistemos veikimu, tai sąlygoja skaičiavimų greitaveiką. Darbo metu programos vykdymo laikas nustatomas, įskaitant vėlavimą ir resursų prieinamumo laukimą (angl. *wall-time*). Asmeninio kompiuterio charakteristikos pateiktos 2.3 lentelėje.

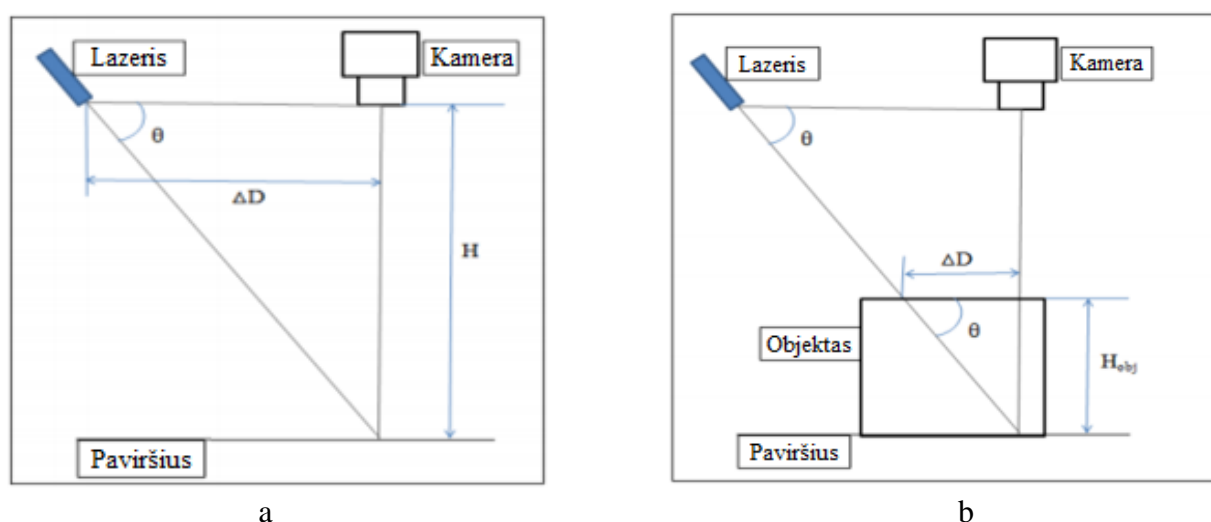
2.3 lentelė. Asmeninio kompiuterio charakteristikos.

Nešiojamo kompiuterio modelis	DELL Precision 3510
Procesorius ir dažnis	Intel i7–6820HQ, 2.7GHz
Operatyvioji atmintis	8GB DDR4, 2133MHz
Duomenų kaupiklis	SSD Samsung NVMe 256GB PM951
Operacinė sistema	Windows 10 Pro 64–bit
Naudotas programinis paketas	MATLAB R2013a

2.2 Sistema

Sistema sudaryta iš 2.1 skyriuje paminėtų įrenginių. Šiame skyriuje apžvelgiama sudaryta matavimo sistema, skaičiavimo principas.

Lazerio ir kameros padėčių parinkimas lemia matavimo kokybę. Buvo pasirinktas atvirkštinės geometrijos išdėstymas, kuris gaunamas kuomet kamera yra statmenai matuojamam objektui, o lazeris pakreiptas kampu θ (2.1 pav.). Šis metodas buvo pasirinktas, nes gaunama didesnė aukščio rezoliucija nei standartinės konfigūracijos, nes lazerio apšvietimo įstrižas kampas reiškia, kad objekto aukštis daro didesnį pokytį lazerio linijos padėčiai. Kadangi kamera yra statmena matavimo plokštumai, išvengiama okliuzijos, t.y. kai kamera filmuoja objektą kitu kampu, negu statmenai į inspektavimo paviršių, atsiranda keletas linijos dalių, kurios yra blokuojamos arba uždengiamos iš kameros pusės, kadangi joks objektas nėra visiškai plokščias [1]. Taip pat šis metodas buvo pasirinktas, nes remiantis literatūra, jis minimas kaip tinkamiausias matuoti plokštiems objektams [20].



2.1 pav. Sistemos schema a – be objekto b – kai objektas padedamas stebimoje aplinkoje [23]

2.1 paveiksle kamera yra statmenai paviršiui, o lazeris pakreiptas kampu. Atstumas tarp lazerio ir kameros pažymimas ΔD , o atstumas tarp kameros ir paviršiaus – H . Lazeris yra pakreiptas kampu θ horizontalios ašies atžvilgiu. Iš čia išplaukia sekanti formulė [23].

$$H = \Delta D \times \tan(\theta) \quad (28)$$

Remiantis 28 formule ir 2.1b pav. gaunama:

$$H_{obj} = \Delta D \times \tan(\theta) \quad (29)$$

Šiuo atveju, lazerio linijos poslinkis yra nustatomas iš kameroje gauto vaizdo (Δd). Tačiau kamera gražina atstumą pikseliais, todėl reikia įsivesti proporcingumo konstantą (K), kuri naudojama konvertuoti dydį pikseliais Δd į realų dydį milimetrais ΔD .

$$H_{obj} = (K \times \Delta d) \times \tan(\theta) \quad (30)$$

Proporcingumo konstanta K gaunama kalibravimo metu, matuojant žinomo objekto aukštį.

Toliau buvo sudaroma reali sistema, išmatuotas atstumas nuo kameros iki paviršiaus H ir atstumas nuo kameros iki lazerio ΔD . Remiantis trigonometrinėmis formulėmis apskaičiuojamas lazerio posvyrio kampas θ . Gauti parametrai pateikti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Sistemos duomenys

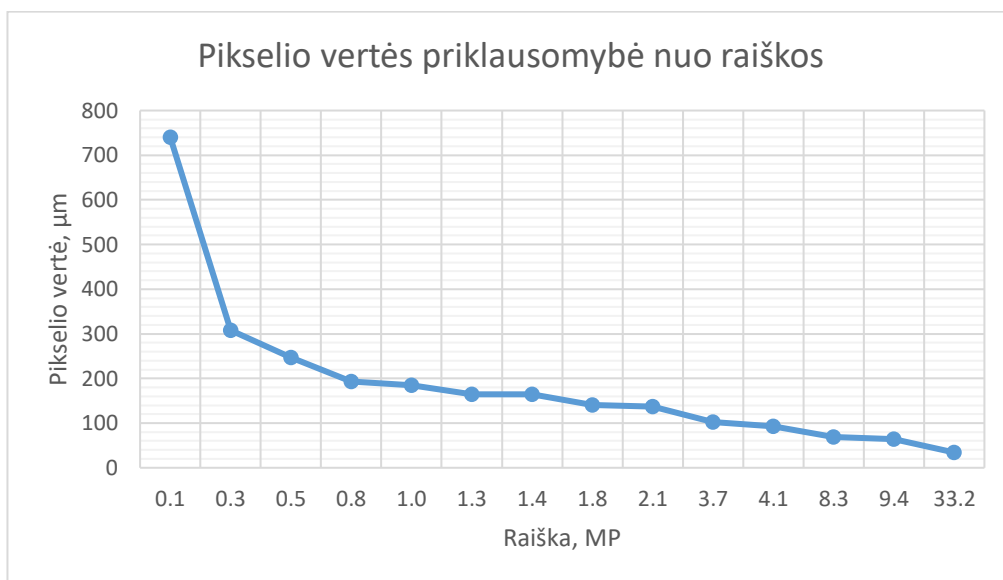
Matmuo	Reikšmė
ΔD	351,2 mm
H	337,2 mm
θ	43,83 °

Nustatant sistemos duomenis atsiranda galimos paklaidos, kurios turės įtakos sistemos veikimo tikslumui. Galimos paklaidų atsiradimo priežastys:

- Sudaryta sistema nėra absoliučiai stabili, todėl aplinkos vibracijos turi įtakos tikslumui.
- Žmogiškasis faktorius. Netikslus duomenų įvertinimas. Kadangi sistema nėra visiškai stabili, tai šio faktoriaus įtaka padidėja.
- Matuojant atstumą ΔD , sunku įvertinti kur yra lazerio šviesos šaltinis.
- Matuojant atstumą H , sunku įvertinti kur yra vaizdo kameros fokusavimo židiny.
- Netiksliai nustatytus ΔD ir H dydžius, atsiranda paklaida skaičiuojant posvyrio kampą θ .

Taip pat didelės įtakos sistemos tikslumui turi pasirinkta kamera, kadangi nuo kameros raiškos priklauso paklaidos dydis, išskiriant lazerio liniją. Naudojant didesnės raiškos kamerą, tiksliau įvertinamas proporcingumo koeficientas K bei sumažinama paklaida dėl lazerio spindulio išsikraipymo esant netolygiems paviršiams. Vieno pikselio vertės priklausomybė nuo standartinių

rezoliucijų [8] (priimant prielaidą, kad fotografuojamas plotas artimas A5 lapo dydžiui) pateikta 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Vieno pikselio vertės priklausomybė nuo kameros raiškos

Kaip matyti iš 2.2 pav., iš pradžių kameros raiškos kokybės didėjimas turi didelės įtakos absoliutinei pikselio vertei, tačiau vėliau įtaka ne tokia sviri. Dėl šios priežasties, kuriant sistemą reiktų įvertinti, koks matavimo tikslumas yra užsibrėžtas ir kaip tai lems bendruosius projekto kaštus.

3. BANDYMAI

Šiame skyriuje aprašomi atlikti eksperimentai bei pateikiami gauti jų rezultatai. Eksperimentuose nagrinėjamas dalis iš 1.2.3 skyriuje pateiktų algoritmų veikimas. Eksperimentais siekiama nustatyti:

- Koku greičiu nustatomas matuojamo objekto aukštis.
- Kaip kinta duomenų apdorojimo greitis, didėjant nuotraukos rezoliucijai.
- Įvertinti pasirinktų metodų tikslumą.

3.1 Matuojami objektai

Bandymams buvo pasirinkti dešimt objektų. Dalis objektų buvo to paties tipo, tiesiog sudėti vienas ant kito, siekiant gauti didesnę bendrą matuojamo objekto aukštį. Vienas objektas pasirinktas visiškai atsitiktinai (sferinis kūnas), siekiant įvertinti jo poveikį sistemai. Duomenų bazę sudaro keturi šimtai nuotraukų (dešimt objektų, po dvidešimt nuotraukų kiekvienam objektui dvejomis skirtingomis rezoliucijomis). Duomenų bazę sudaryta tamsioje aplinkoje, siekiant gauti ryškesnę lazerio liniją.

3.1 lentelė. Bandymui pasirinkti objektai

Objektas	Lęšių dėžutė	Dvi lęšių dėžutės	Degtukų dėžutė	Dvi degtukų dėžutės	Tris degtukų dėžutės
Išmatuotas aukštis, mm	13,39	26,24	15,21	30,82	46,20
Objektas	Keturios degtukų dėžutės	Medinė dėžutė	Dvi medinės dėžutės	Saldainių dėžutė	Kamuoliukas
Išmatuotas aukštis, mm	61,80	28,00	57,00	41,80	61,20

3.1 lentelėje pateiktų objektų aukštis, jeigu jis mažesnis už 25 mm, buvo išmatuotas naudojantis mikrometru, kurio tikslumas siekia 0,01 mm. Visų kitų objektų aukštis buvo matuojamas slankmačiu, kurio tikslumas siekia 0,02 mm.

3.2 Naudoti metodai

Linijos aptikimas gali būti realizuojamas, naudojant linijos aptikimo algoritmą *LDA*, kuris nustato linijos poziciją stebimoje vietoje. *LDA* algoritmai veikia kiekviename stulpelio vektoriuje $\mathbf{i}(x) = \hat{I}(x, c)$ intensyvumo matricoje \hat{I} , kur c yra stulpelio indeksas [7]. Po linijos nustatymo kiekviename paveiksle, optimalus linijos profilis *OLP* yra nustatomas. Preliminarus aukščio žemėlapis gali būti nustatytas derinant *OLP* atsižvelgiant į vaizdų seką.

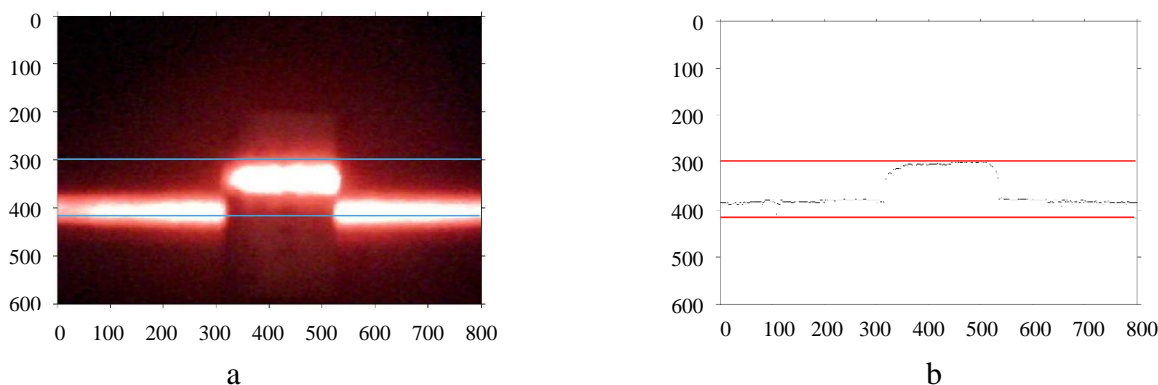
Baigiamasis projektas orientuotas į pramonėje naudojamus matavimus, gamybą. Dėl šios priežasties, nepakanka sukalibruoti ir užfiksuoti lazerio linijos ant pagrindo, kaip žinomo dydžio. Taip yra todėl, kad dėl judančių mechaninių dalių, pvz. konvejerio ir aplinkinių įrenginių, atsiranda vibracijos, kurios gali turėti įtakos lazerio posvyrio kampui, kameros padėčiai ir taip padidinti matavimų paklaidą. Siekiant to išvengti, reikia išskirti tiek lazerio liniją ant objekto, tiek ant pagrindo. Tokiu atveju atstumas išreikštas pikseliais Δd bus tikslesnis ir mažiau veikiamas aplinkos bei vibracijų.

3.2.1 Maksimalaus piko metodas

Pasirinktas maksimalaus piko metodas, kadangi tai vienas iš greičiausių ir paprasčiausių būdų linijos išskyrimui. Jis grąžina aukščiausios intensyvumo vertės poziciją kiekviename stulpelyje [4,5]:

$$p_{max} = \arg\{\max\{\mathbf{i}(x)\}\} \quad (31)$$

Radus maksimalius pikus, linija išbrėžiama, randant gauto masyvo maksimalią bei minimalią vertes.



3.1 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (800x600) a – originali, nubrėžus linijas, b – pritaikius maksimalaus piko algoritimą ir per pikus nubrėžus linijas

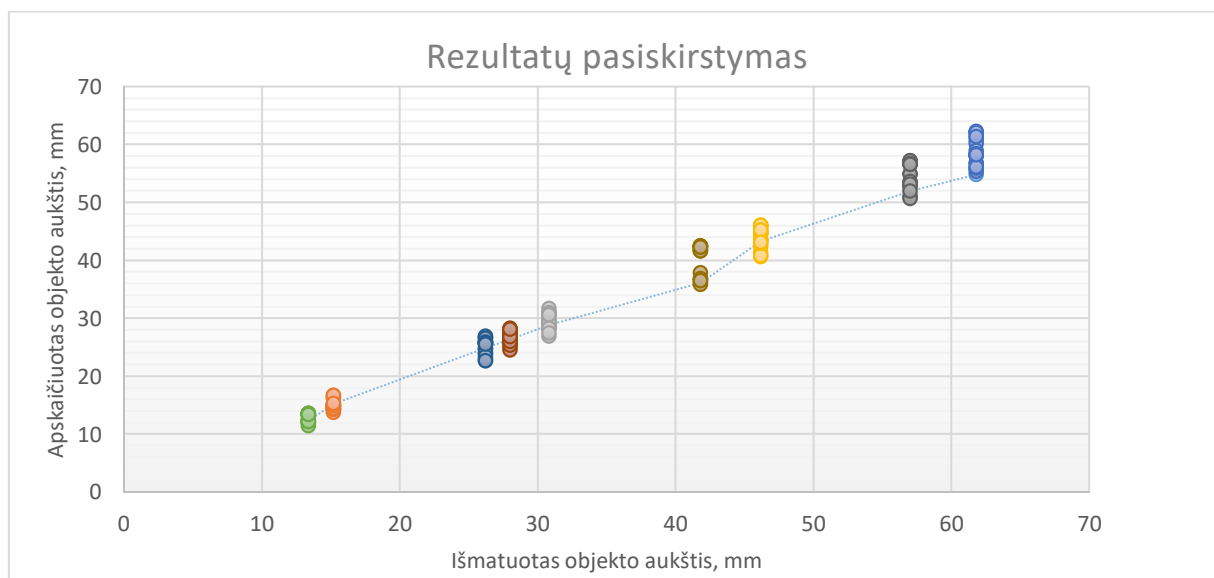
Kaip matyti iš nuotraukų (žr. 3.1 pav.), toks metodas yra netikslus, nes vertinamos kraštutinės pavienės reikšmės, kurios įveda žymią paklaidą – linija išbrėžiama ne ties ta vieta, kur pasiskirstę dauguma maksimalių pikų (žr. 3.1b pav.). Šiuo metodu gautų rezultatų vidurkiai, vidutinės absoliutinės ir santykinės paklaidos pateiktos 3.2 lentelėje. Rezultatai šioje ir tolimesnėse lentelėse suapvalinti šimtųjų tikslumu.

3.2 lentelė. Gauti rezultatai – maksimalaus piko metodas (maksimali, minimali vertės)

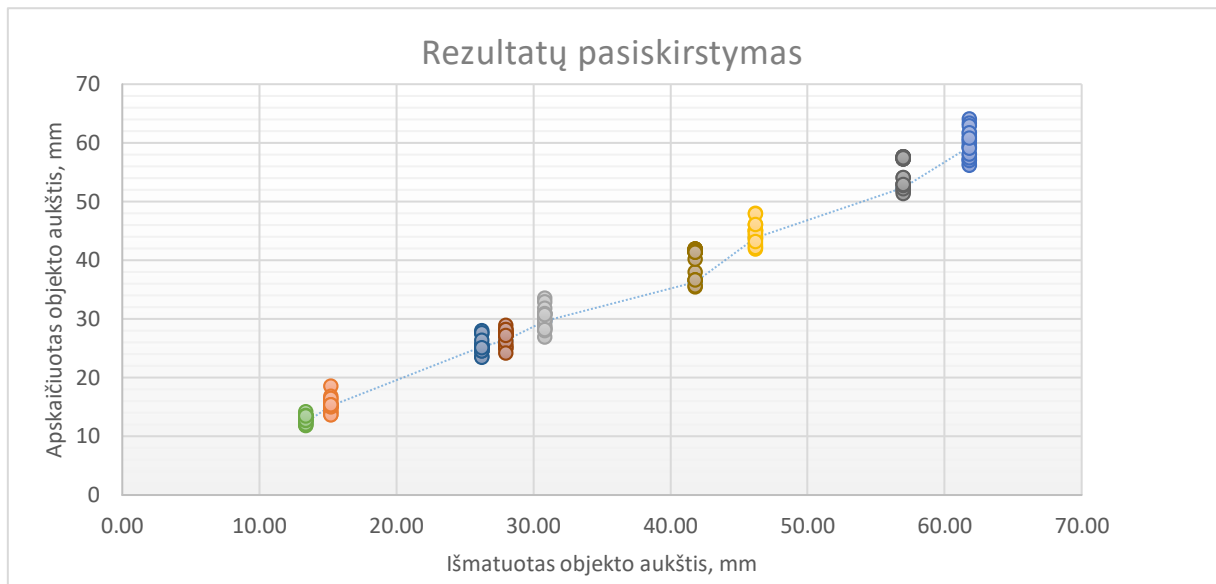
Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	14,95	0,26	4,99%	15,21	15,34	0,13	4,58%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	29,48	1,34	4,75%	30,82	30,03	0,79	4,54%
Tris degtukų dėžutės	46,20	44,10	2,10	4,54%	46,20	44,59	1,61	4,25%
Ketrios degtukų dėžutės	61,80	58,94	2,86	4,85%	61,80	59,61	2,19	4,34%
Lėšių dėžutė	13,39	12,90	0,49	4,33%	13,39	13,03	0,36	4,08%
Dvi lėšių dėžutės	26,24	25,10	1,14	5,02%	26,24	25,37	0,87	5,06%
Medinė dėžutė	28,00	26,80	1,20	4,44%	28,00	26,94	1,06	4,32%
Dvi medinės dėžutės	57,00	54,56	2,44	4,34%	57,00	55,06	1,94	4,15%
Saldainių dėžutė	41,80	40,24	1,56	4,96%	41,80	40,02	1,78	4,34%

Vidutinė greita veika: 7,9ms – 640x480 rezoliucija, 11,7ms – 800x600 rezoliucija.

Kaip matyti iš 3.2 lentelės duomenų, mažiausia gauta vidutinė paklaida lygi 4,08%. Gautų rezultatų pasiskirstymas apie vidutines vertes pateiktas 3.2, 3.3 paveiksluose.



3.2 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas maksimalaus piko metodu (rezoliucija 640x480)



3.3 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas maksimalaus piko metodu (rezoliucija 800x600)

Aukščiau pateiktuose grafikuose matyti, kad gaunamos vertės stipriai varijuoja aplink vidutinę vertę. Nuokrypa didėja proporcingai matuojamo objekto aukščiui. Dėl santykinai didelių paklaidų, kadangi metodas įvertina pavienes reikšmes ir rezultatų išsibarstymų, toks skaičiavimo būdas yra netinkamas ir toliau nenagrinėjamas.

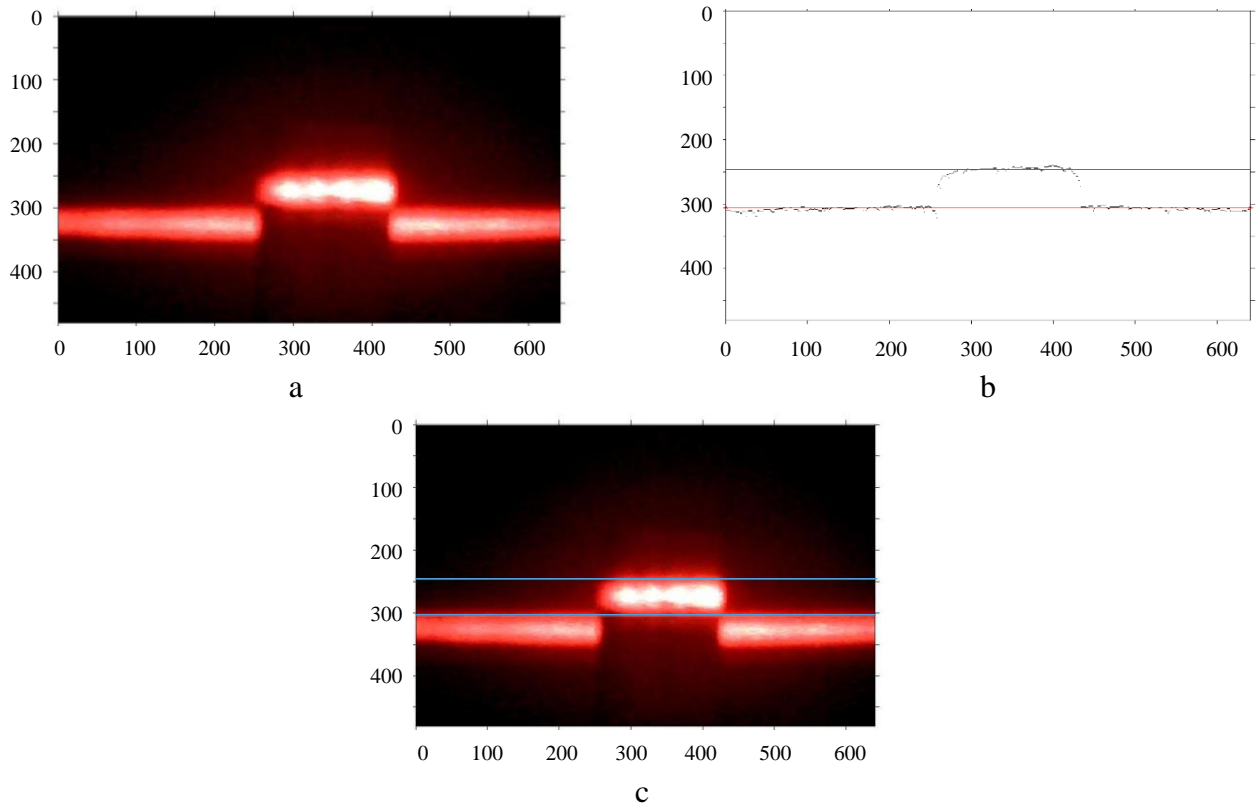
Kitas metodas – pritaikius maksimalaus piko algoritimą, kai linija išbrėžiama randant gauto masyvo modą bei antrą dažniausiai pasikartojančią reikšmę.

```
[M,F1] = mode(m); % M dažniausiai pasikartojanti reikšmė
counts = accumarray( m(:)+1, ones(numel(m),1)) ;
N = find( counts(1:M-1) == max(counts(1:M-1))); % N antra dažniausiai pasikartojanti reikšmė
```

Šis metodas išskaidomas į tris dalis:

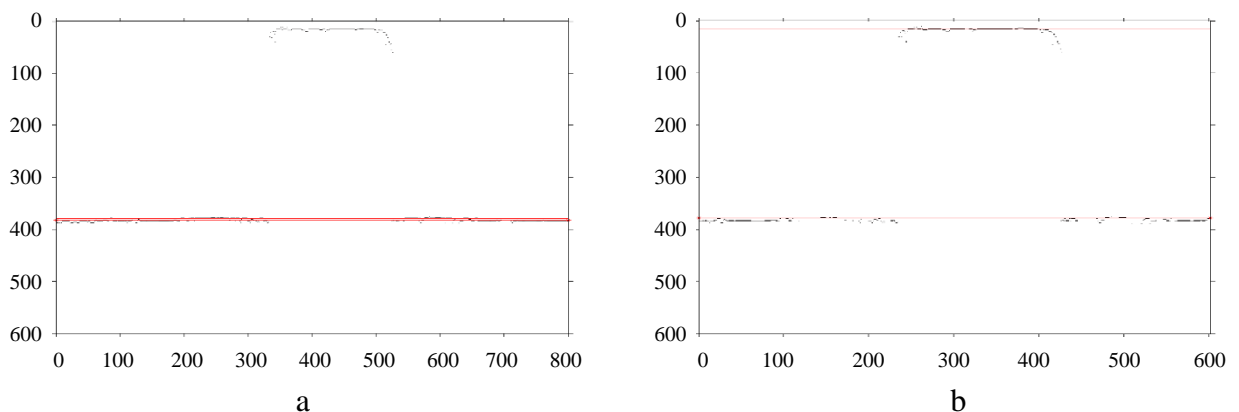
1. Pirmo maksimumo radimas
2. Paskutinio maksimumo radimas
3. Linijos centro radimas

Pirmasis metodas – pirmojo maksimumo radimas. Algoritmo pritaikymas, reikšmių radimas ir per jas brėžiamos linijos pavaizduotos 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (640x480) a – originali, b – pritaikius maksimalaus piko algoritmą ir per pikus nubrėžus linijas, c – nubrėžtos linijos originalioje nuotraukoje

Kuomet objektas yra santykinai siauras (užima mažiau nei 25% kadro pločio), taip pat ir lazerio linija ant objekto siaura, antra dažniausiai pasikartojanti reikšmė gaunama ne lazerio projekcijoje ant objekto, tačiau ant pagrindo šalia pirmosios linijos. Todėl, dirbant su siaurais objektais, reikia programiškai pakeisti nuotraukos rezoliuciją. Šiuo atveju nuotrauka buvo apkirpta nuo 640x480 iki 440x480, taip pat 800x600 pakeista į 600x600. Tačiau reikia atkreipti dėmesį į tai, kad keičiant nuotraukos rezoliuciją, dalis reikšmių prarandama, o tai gali lemti padidėjusią paklaidą.



3.5 pav. Išskirta lazerio linija, kai objektas siauras a – 800x600 rezoliucijos atveju b – pakeitus rezoliuciją programiškai – 600x600

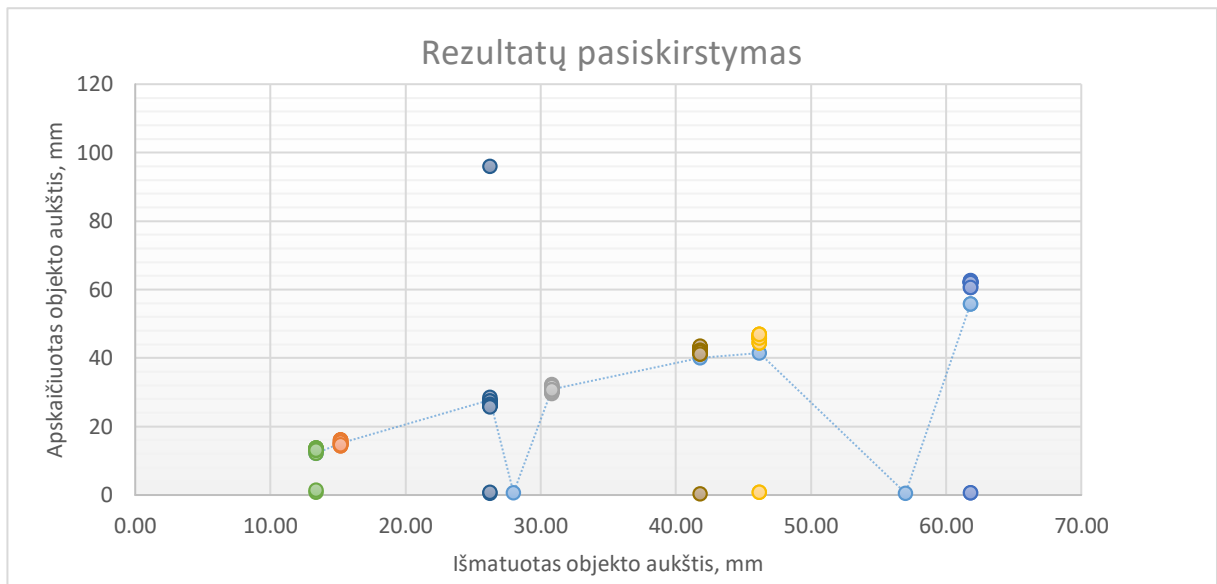
Kontaktinių lęšių dėžutė naudota kaip kontrolinis objektas, nustatant kameros proporcingumo koeficientą K , kuris reikalingas siekiant perskaičiuoti nuotraukoje gautų pikselių skaičiui į realų atstumą, mm. Šio metodo rezultatai pateikti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Gauti rezultatai maksimalaus piko metodu (pirmasis maksimumas).

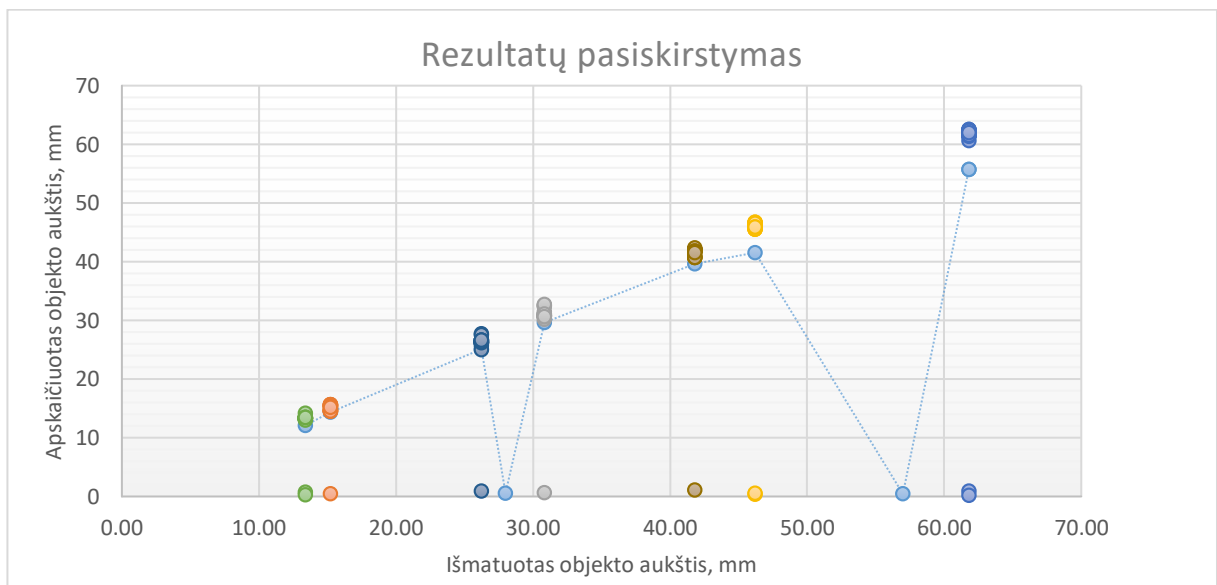
Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	15,18	0,47	3,09%	15,21	14,37	0,84	7,18%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	30,83	0,52	1,68%	30,82	29,66	1,16	6,49%
Tris degtukų dėžutės	46,20	41,40	5,14	11,12%	46,20	41,56	4,64	10,63%
Ketrios degtukų dėžutės	61,80	55,79	6,61	10,70%	61,80	55,76	6,04	10,50%
Lęšių dėžutė	13,39	12,11	1,40	10,44%	13,39	12,08	1,31	10,85%
Dvi lęšių dėžutės	26,24	27,68	6,65	25,36%	26,24	25,14	1,10	6,25%
Medinė dėžutė	28,00	0,69	27,31	97,53%	28,00	0,54	27,46	98,06%
Dvi medinės dėžutės	57,00	0,55	56,45	99,03%	57,00	0,43	56,57	99,24%
Saldainių dėžutė	41,80	40,08	2,69	6,43%	41,80	39,60	2,20	5,80%

Vidutinė greita veika: 114,2ms – 640x480 rezoliucija, 124,9ms – 800x600 rezoliucija.

Kaip matyti iš 3.3 lentelės duomenų, vidutinė paklaida išreikšta procentais kartais yra artima 100%. Ši paklaida atsiranda dėl tos pačios, anksčiau minėtos problematikos, t.y. kartais matuojamas objektas gali būti per platus (medinė dėžutė – užima virš 60% kadro pločio). Taip pat programiškai pakeitus rezoliuciją visai duomenų bazėj tuo pačiu dydžiu, dalyje duomenų bazės to nepakanka arba nuotraukos rezoliucija sumažinama per daug. Dėl šių priežasčių M ir N reikšmės gaunamos greta. Gautų rezultatų pasiskirstymas apie vidutines vertes pateiktas 3.6–3.7 paveiksluose.



3.6 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas pirmo maksimumo metodu (rezoliucija 640x480)



3.7 pav. Gautų rezultatų pasiskirstymas pirmo maksimumo metodu (rezoliucija 800x600)

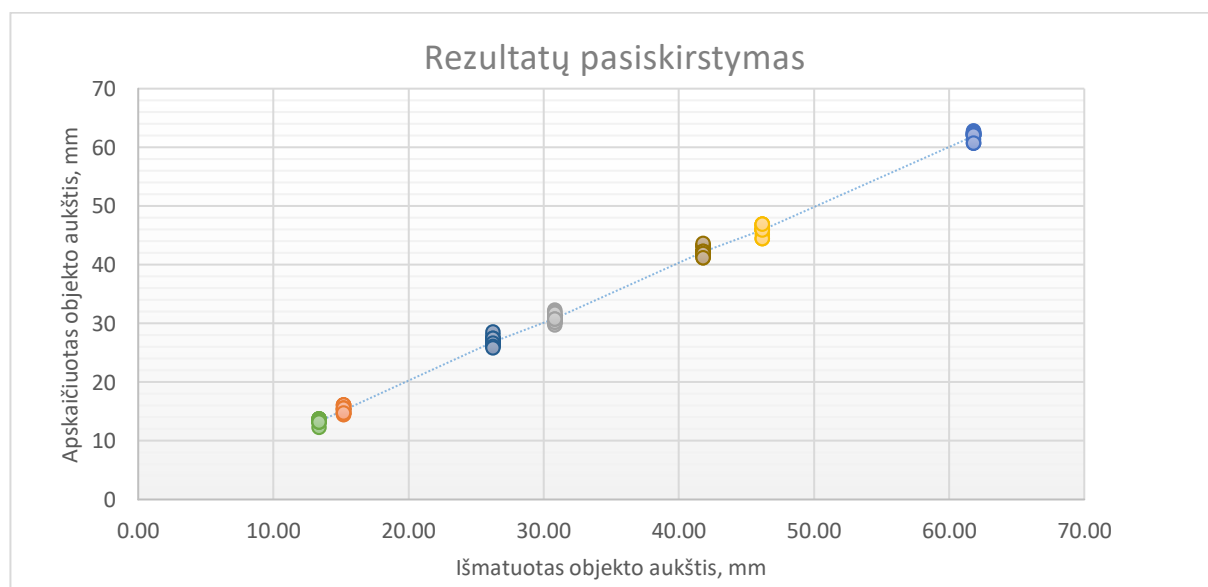
Siekiant to išvengta, į programą įtraukiamas papildomas fragmentas, kuris lygina M ir N vertes. Jeigu skirtumas tarp jų mažiau už 10 pikselių (dydis pasirinktas atsitiktinai) – nuotrauka vertinama kaip netinkama. Tokiu atveju objektą reiktų inspektuoti individualiai, siekiant nustatyti pastarojo tinkamumą gamybai ar procesui. Rezultatai, gauti įvedus papildomus apribojimus ir atmetus netinkamas nuotraukas, pateikti 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Gauti rezultatai modifikavus maksimalaus piko metodą

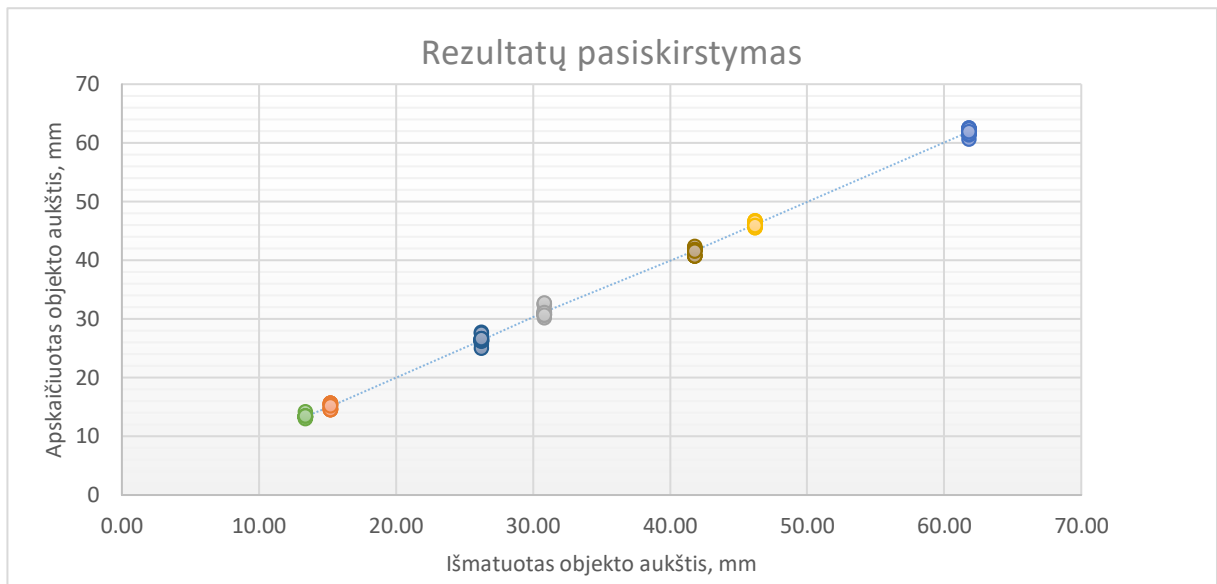
Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	15,18	0,03	3,09%	15,21	15,11	0,37	2,45%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	30,83	0,01	1,68%	30,82	31,19	0,52	1,67%
Tris degtukų dėžutės	46,20	45,92	0,28	1,42%	46,20	46,12	3,43	0,81%
Keturiuos degtukų dėžutės	61,80	61,91	0,11	0,90%	61,80	61,89	0,41	0,66%
Lešių dėžutė	13,39	13,32	0,07	1,43%	13,39	13,37	0,18	1,36%
Dvi lešių dėžutės	26,24	26,84	0,60	2,74%	26,24	26,42	0,39	1,50%
Medinė dėžutė	28,00	—	—	—	28,00	—	—	—
Dvi medinės dėžutės	57,00	—	—	—	57,00	—	—	—
Saldainių dėžutė	41,80	42,17	0,65	1,55%	41,80	41,63	0,41	0,97%

Vidutinė greitimeika: 115,3ms – 640x480 rezoliucija, 126,1ms – 800x600 rezoliucija.

Kaip matyti 3.4 lentelėje, vidutinė paklaida neviršija 3,09%, o greitimeika sumažėjo vidutiniškai apie 1,01%. Toks greitimeikos praradimas yra leistinas, įvertinus pagerėjusi sistemos tikslumą. Tačiau išlieka ankstesnė problema, dirbant su plačiais objektais, kai pastarieji užima daugiau nei 60% kadro pločio. Todėl galima teigti, kad šis metodas netinkamas platiems objektams matuoti, reikėtų svarstyti apie sistemos keitimą. Gautų rezultatų pasiskirstymas apie vidutines vertes pateiktas 3.8–3.9 paveiksluose.

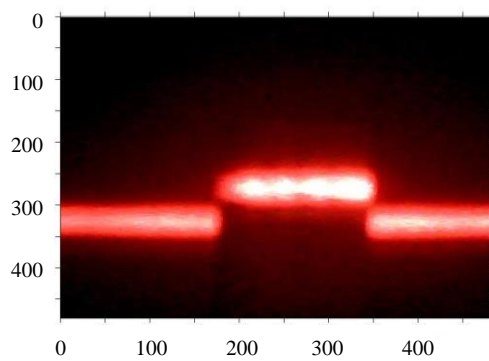


3.8 pav. Rezultatų pasiskirstymas modifikuotu pirmo maksimumo metodu (640x480)

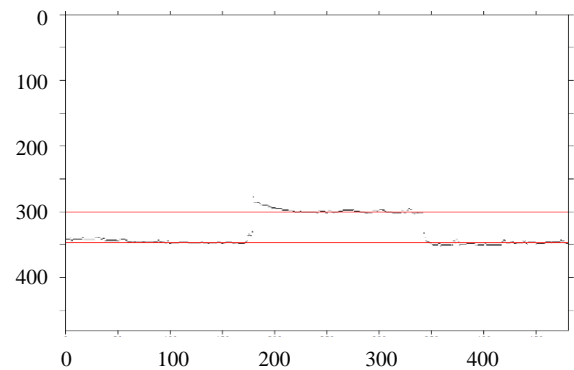


3.9 pav. Rezultatų pasiskirstymas modifikuotu pirmo maksimumo metodu (800x600)

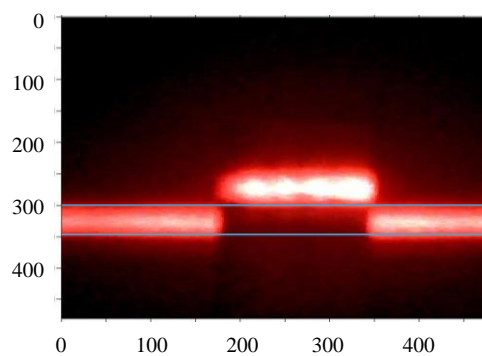
Taip pat analogiškai atliekami bandymai su paskutiniuju maksimumu. Randami maksimalūs pikai, tačiau šiuo atveju ne pirmieji, o paskutiniai. Tokiu būdu išskiriama apatinė lazerio linija.



a



b



c

3.10 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (480x480) a – originali, b – pritaikius maksimalaus piko algoritmą ir per pikus nubrėžus linijas, c – nubrėžtos linijos originalioje nuotraukoje

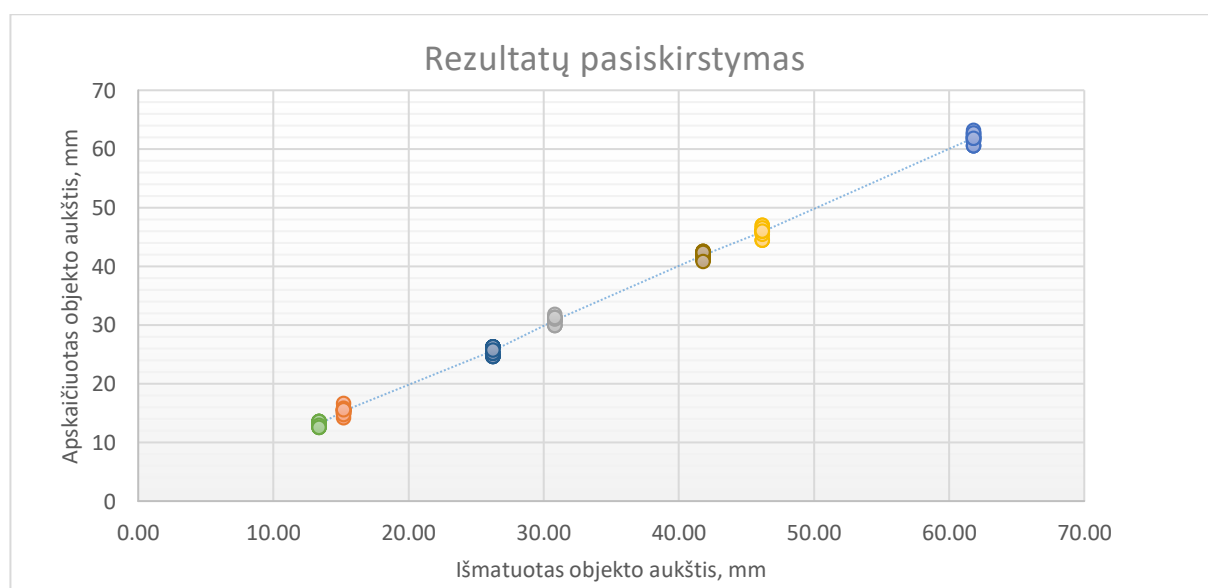
Paskutinio maksimumo metodo rezultatai pateikti 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. Gauti rezultatai – maksimalaus piko metodas (paskutinis maksimumas)

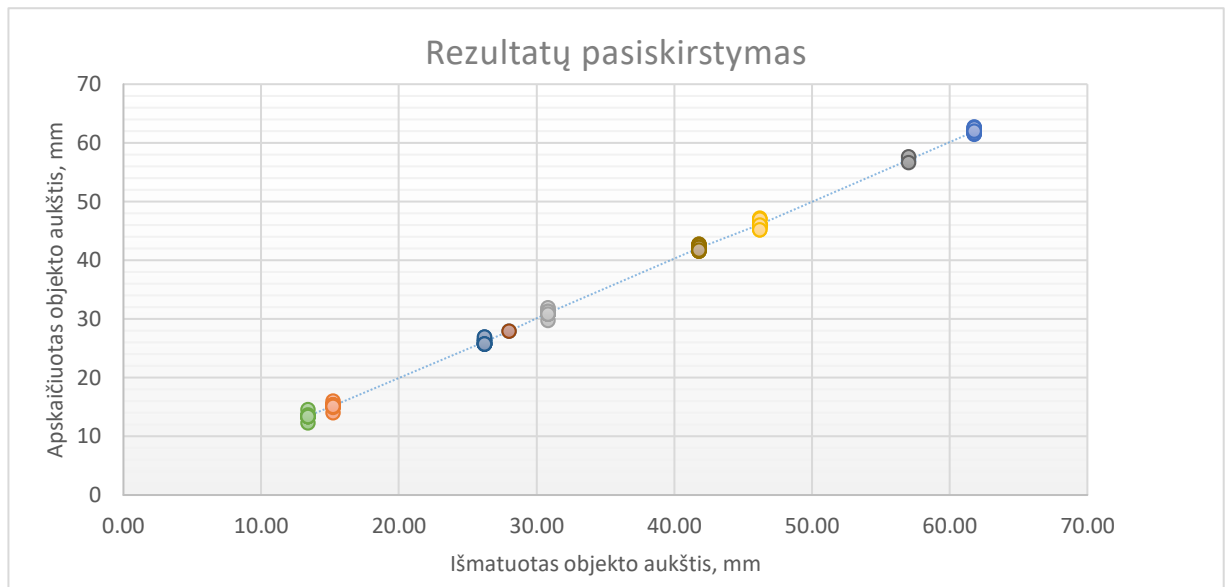
Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	15,34	1,12	2,50%	15,21	15,18	0,97	1,47%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	30,82	0,42	1,35%	30,82	30,99	0,28	0,91%
Tris degtukų dėžutės	46,20	45,85	0,61	1,31%	46,20	46,11	0,45	0,97%
Keturiolios degtukų dėžutės	61,80	61,86	0,60	0,98%	61,80	61,96	0,28	0,45%
Lėšių dėžutė	13,39	13,06	0,43	3,20%	13,39	13,43	0,16	1,20%
Dvi lėšių dėžutės	26,24	25,62	0,68	2,58%	26,24	26,07	0,38	1,44%
Medinė dėžutė	28,00	—	—	—	28,00	27,90	0,10	0,36%
Dvi medinės dėžutės	57,00	—	—	—	57,00	57,13	0,50	0,87%
Saldainių dėžutė	41,80	41,86	0,45	1,07%	41,80	42,12	0,42	1,00%

Vidutinė greitaveika: 113,6ms – 640x480 rezoliucija, 124,1ms – 800x600 rezoliucija.

Kaip matyti iš 3.5 lentelės duomenų, šis metodas tikslesnis negu nagrinėtas anksčiau. Tam tikrais atvejais, pvz., vertinant dviejų degtukų dėžučių aukštį, paklaida sumažėja 1,84 karto. Gautų rezultatų pasiskirstymas apie vidutines vertes pateiktas 3.11–3.12 paveiksluose.



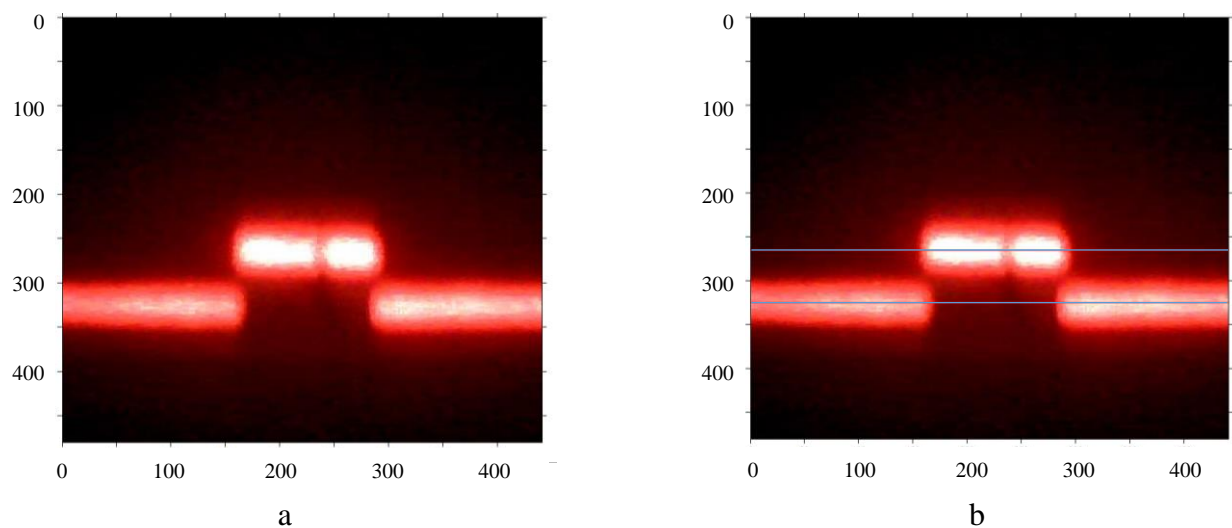
3.11 pav. Rezultatų pasiskirstymas paskutinio maksimumo metodu (640x480)



3.12 pav. Rezultatų pasiskirstymas paskutinio maksimumo metodu (800x600)

Kaip ir ankstesniais atvejais nuokrypa didėja proporcingai matuojamo objekto aukščiui. Taip pat pastebėtina tai, kad su aukštesnės rezoliucijos nuotrauka, sklaida mažesnė. Tai irgi įtakoja matavimo tikslumą.

Trečiasis metodas apjungia pirmuosius du. Suradus pirmąjį ir paskutinįjį maksimumus, iš jų vidurkio apskaičiuojamas lazerio linijos centras. Pasinaudojus šios centrinės linijos koordinatėmis atliekami skaičiavimai, reikalingi nustatyti objekto aukštį.



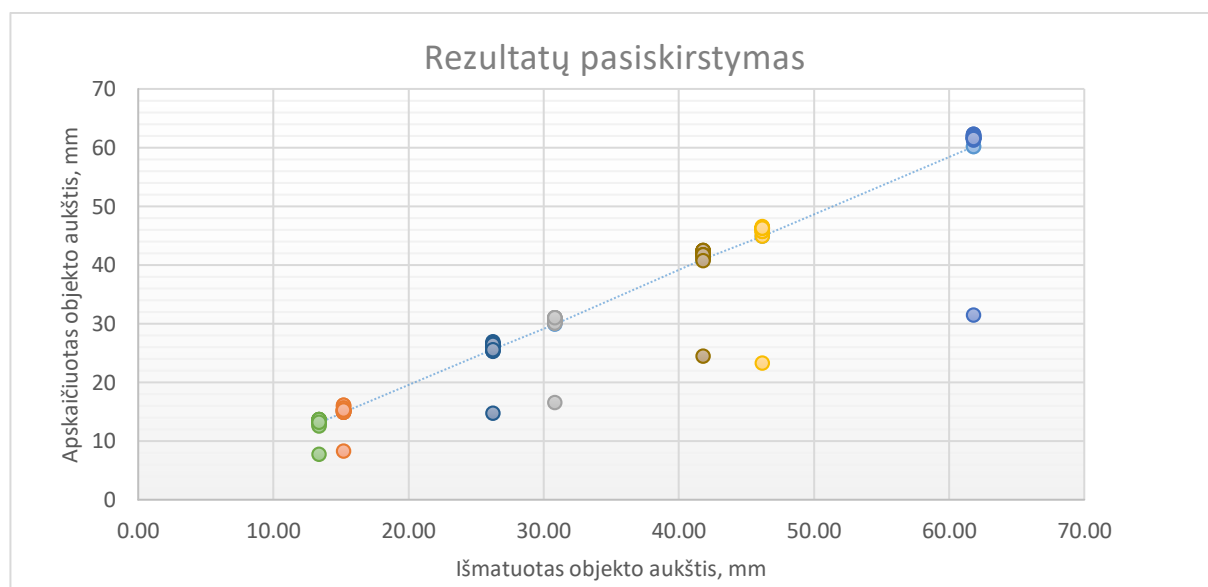
3.13 pav. Degtukų dėžutės nuotrauka (440x480) a – originali, b – nubrėžus tieses per lazerio linijos centrus

3.6 lentelė. Gauti rezultatai naudojant surastus lazerio linijų centrus

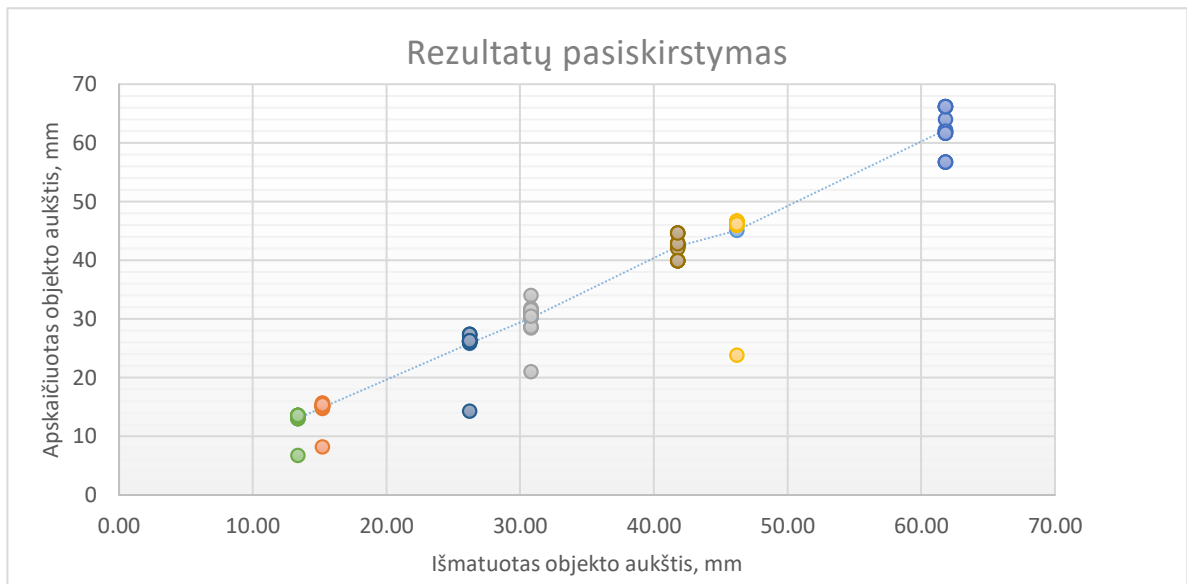
Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	14,95	0,58	3,84%	15,21	14,89	0,52	3,40%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	29,89	1,03	3,33%	30,82	30,19	1,33	4,33%
Tris degtukų dėžutės	46,20	44,87	1,45	3,13%	46,20	45,08	1,35	2,93%
Keturių degtukų dėžutės	61,80	60,16	1,83	2,96%	61,80	62,22	2,64	4,27%
Lešių dėžutė	13,39	13,09	0,49	3,67%	13,39	13,04	0,51	3,78%
Dvi lešių dėžutės	26,24	25,64	0,92	3,49%	26,24	25,82	0,89	3,38%
Medinė dėžutė	28,00	—	—	—	28,00	—	—	—
Dvi medinės dėžutės	57,00	—	—	—	57,00	—	—	—
Saldainių dėžutė	41,80	40,96	1,29	3,09%	41,80	42,33	1,46	3,50%

Vidutinė greitaiveika: 125,0ms – 640x480 rezoliucija, 132,5ms – 800x600 rezoliucija.

Kaip matyti iš 3.6 lentelės, šis metodas nėra toks tikslus kaip jo pirmtakai, taip pat dėl padidėjusio programinio kodo, skaičiavimai užtrunka ilgiau. Paklaidos atsiradimo priežastį galima suprasti nagrinėjant gautų rezultatų pasiskirstymą (žr. 3.14–3.15 pav.)



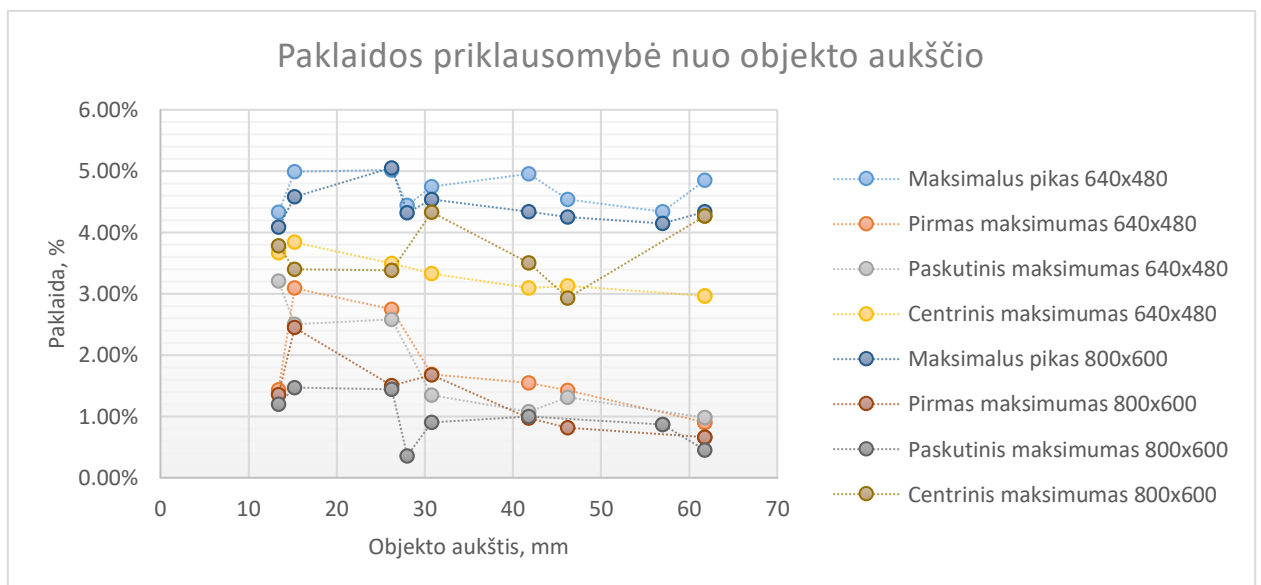
3.14 pav. Rezultatų pasiskirstymas maksimumų centro metodu (640x480)



3.15 pav. Rezultatų pasiskirstymas maksimumų centro metodu (800x600)

Nagrinėjant aukščiau pateiktus grafikus, akivaizdu, kad paklaida atsiranda dėl pavienių taškų, kurie labiau nutolę nuo vidutinės reikšmės. Šie pavieniai taškai įveda paklaidą ir tampa akivaizdu, kad toks metodų apjungimas realios naudos, siekiant pagerinti sistemos tikslumą, neduoda.

Maksimalaus piko metodu gauti rezultatai ir jų palyginimas pateiktas 3.16 paveiksle. Čia pateikta paklaidos priklausomybė nuo objekto aukščio.



3.16 pav. Maksimalaus piko metodu gautų rezultatų palyginimas

Kaip matyti iš 3.16 paveikslo, geriausi rezultatai, mažiausia paklaida, gauta pasinaudojant paskutinio maksimumo metodu (vidutinė paklaida: 2,15% – 640x480 rezoliucija, 1,27% – 800x600 rezoliucija). Paskutinio maksimumo išskyrimo atveju greitaveika yra artima kitiems metodams. Didžiausia greitaveika pasižymi pirmasis metodas – tiesiogiai taikomas maksimalaus

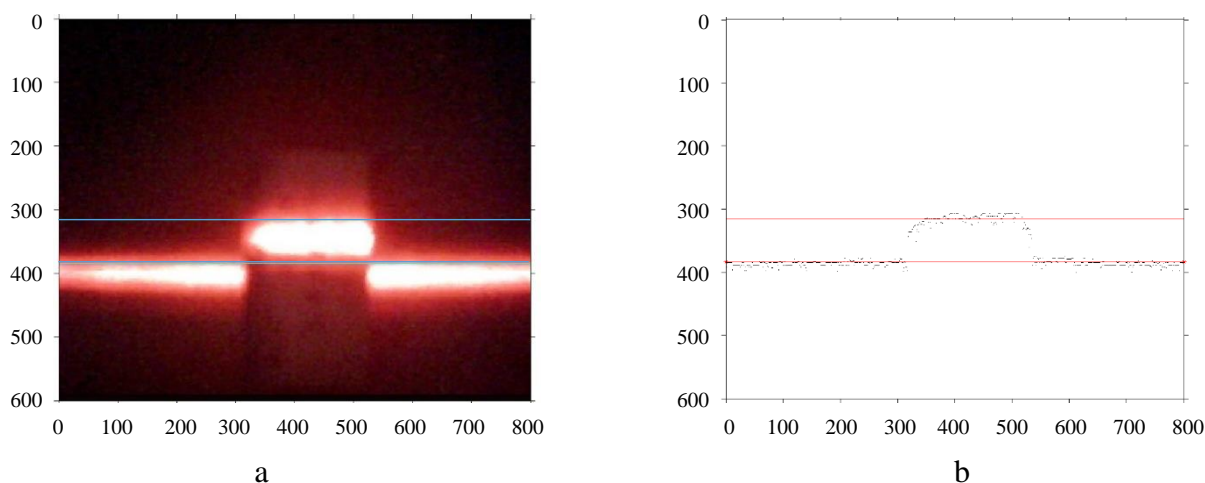
piko metodas. Tačiau paklaida gaunama šiuo metodu yra viena didžiausių. Kadangi rezoliucijos žymiai nesiskiria, tai kaip matyti iš grafiko, tiek 640x480, tiek 800x600 rezoliucijai, gautos paklaidos yra artimos.

3.2.2 Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija

Pasirinktas metodas, paremtas Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija, kadangi nagrinėjant šaltinius pastarasis minimas kaip vienas tiksliausių metodų [7]. Metodas remiasi prielaida, kad optimalus maksimumo pikas yra tarp dviejų diskretinių imčių ir apskaičiuoja subpikselyje maksimumą [6]:

$$p_{opt} = \left(p_{max} - \frac{1}{2} \left(\frac{\ln(c) - \ln(a)}{\ln(a) + \ln(c) - 2\ln(b)} \right) \right) \quad (32)$$

Radus optimalius taškus, linija išbrėžiama randant gauto masyvo modą bei antrą dažniausiai pasikartojančią reikšmę kaip ir ankstesniu atveju.



3.17 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka (800x600) a – originali, nubrėžus linijas, b – pritaikius Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija ir per pikus nubrėžus linijas

Kaip matyti iš nuotraukų (žr. 3.17 pav.), gaunami taškai labiau kinta modos aplinkoje, tačiau išvengiama pavienių, daug nutolusių taškų. Rezultatai pateikti 3.7 lentelėje.

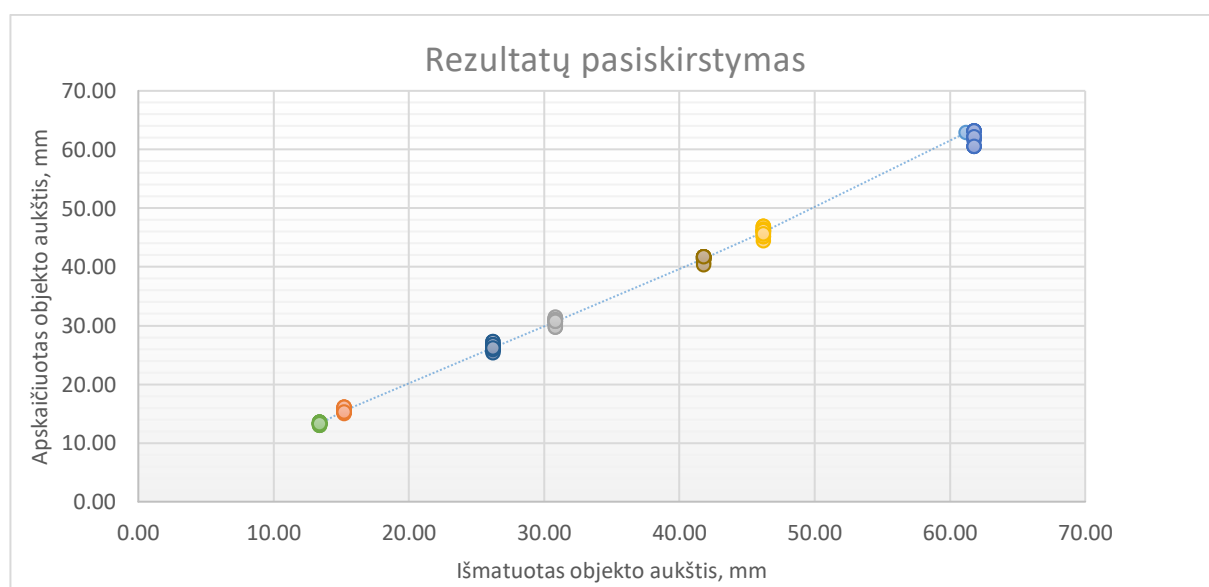
3.7 lentelė. Gauti rezultatai pritaikius Gauso atotrūkio maksimumo interpoliaciją

Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	15,50	0,17	1,13%	15,21	15,11	0,13	0,82%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	30,70	0,35	1,13%	30,82	30,50	0,27	0,88%
Tris degtukų dėžutės	46,20	45,93	0,68	1,47%	46,20	46,54	0,48	1,05%
Keturių degtukų dėžutės	61,80	61,95	0,96	1,56%	61,80	61,61	0,77	0,88%
Lešių dėžutė	13,39	13,25	0,13	0,96%	13,39	13,30	0,10	0,76%
Dvi lešių dėžutės	26,24	26,25	0,30	1,13%	26,24	26,15	0,22	0,83%
Medinė dėžutė	28,00	—	—	—	28,00	—	—	—
Dvi medinės dėžutės	57,00	—	—	—	57,00	57,15	0,60	1,05%
Saldainių dėžutė	41,80	41,40	0,48	1,14%	41,80	41,66	0,37	1,24%

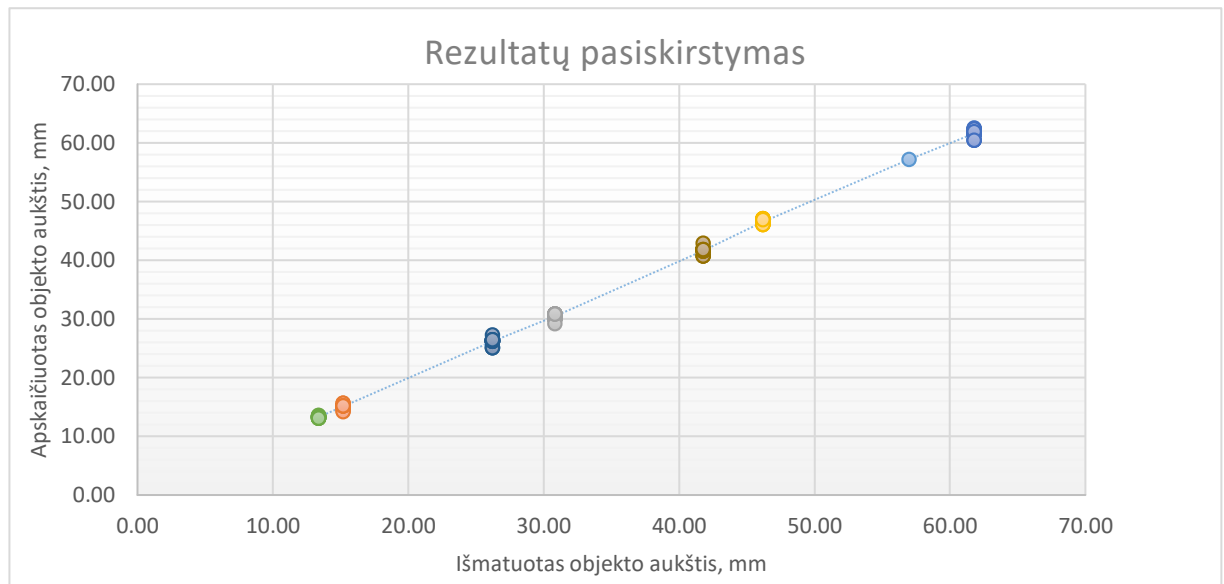
Vidutinė greیتaveika: 41,6ms – 640x480 rezoliucija, 76,7ms – 800x600 rezoliucija.

Kaip matyti iš 3.7 lentelės duomenų, mažiausia gauta vidutinė paklaida lygi 0,76%. Apdorojant aukštesnės rezoliucijos nuotraukas, greیتaveika sumažėjo 1,62 karto, lyginant su paskutinio maksimumo metodu. Tačiau reikia atkreipti dėmesį į tai, kad šiuo metodu pavyko apdoroti dalį plataus objekto nuotraukų. Tai rodo, kad tokia sistema reikalauja mažesnių modifikacijų, siekiant ją pritaikyti skirtingiems objektams matuoti.

Gautų rezultatų pasiskirstymas apie vidutines vertes pateiktas 3.18–3.19 paveiksluose.



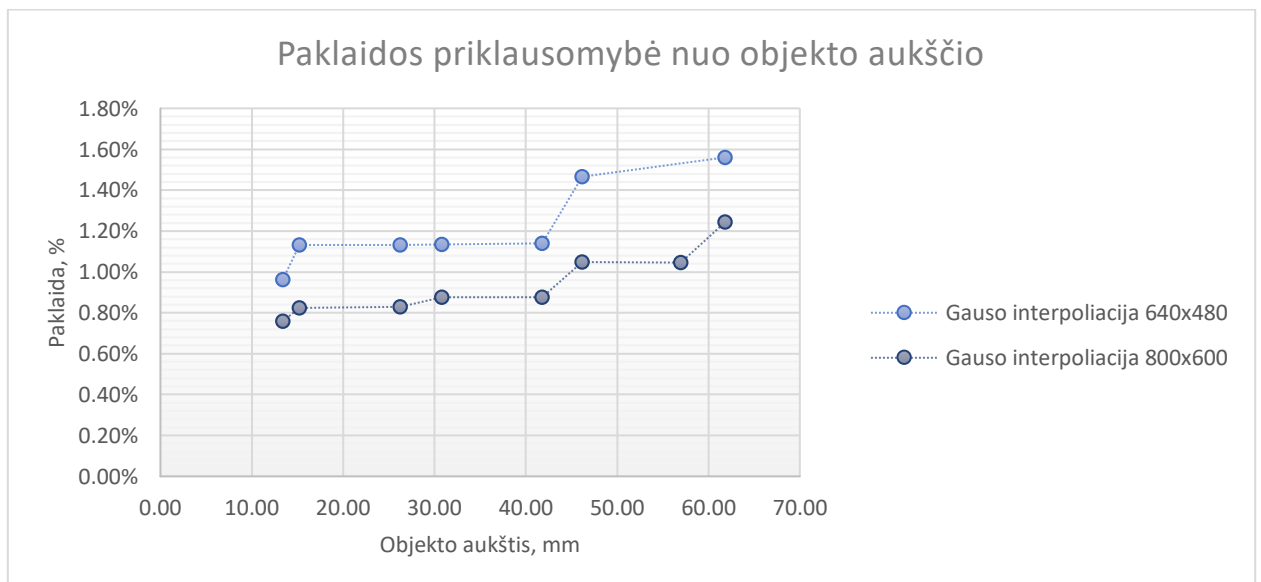
3.18 pav. Rezultatų pasiskirstymas Gauso atotrūkio interpoliacijos metodu (640x480)



3.19 pav. Rezultatų pasiskirstymas Gauso atotrūkio interpoliacijos metodu (800x600)

Kaip matyti grafikuose, gautų rezultatų sklaida yra mažesnė, lyginant su anksčiau nagrinėtais metodais (3.2, 3.3, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.11, 3.12, 3.14, 3.15 paveikslai).

Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacijos metodu gauti rezultatai ir jų palyginimas pateikti 3.20 paveiksle. Čia pateikta paklaidos priklausomybė nuo objekto aukščio.



3.20 pav. Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacijos gautų rezultatų palyginimas

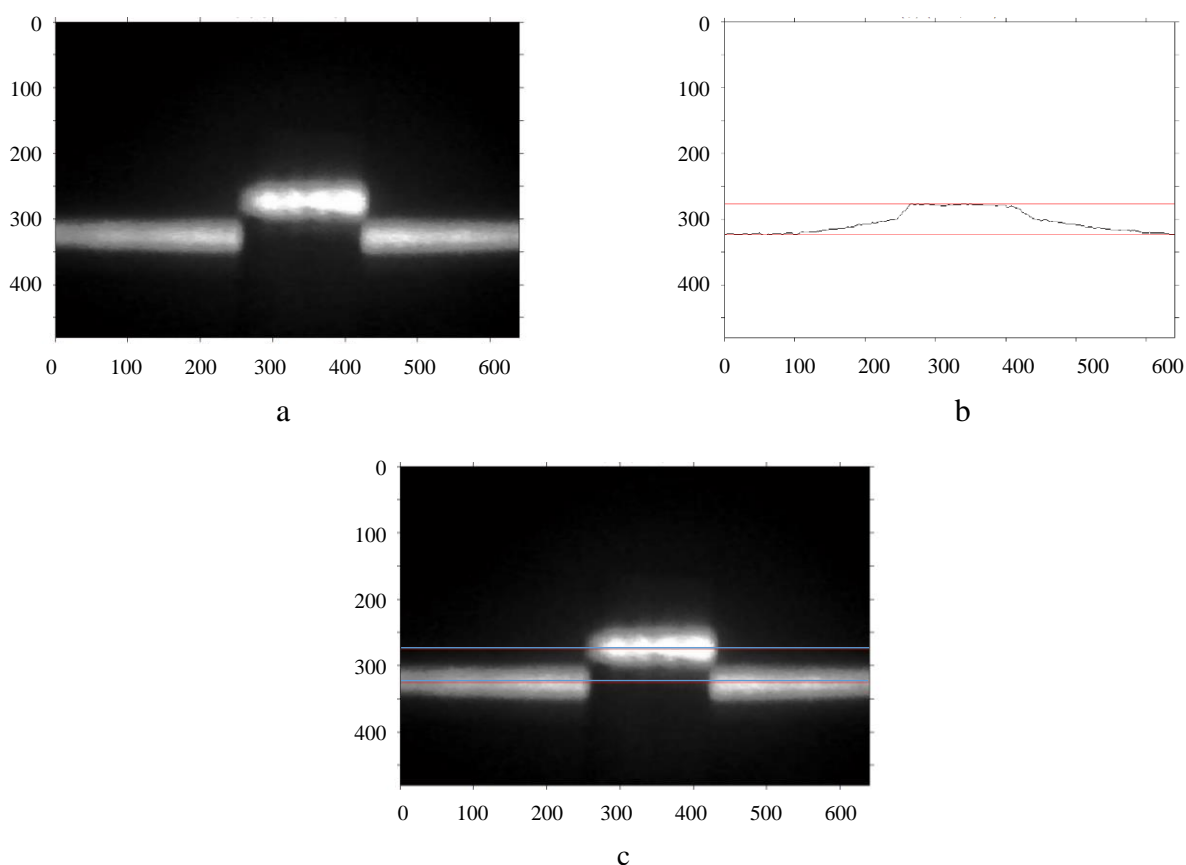
Kaip matyti iš grafiko (žr. 3.20 pav.), apdorojant aukštesnės rezoliucijos nuotraukas, gaunamas akivaizdžiai tikslesnis rezultatas, taip pat pavyksta apdoroti plačius objektus.

3.2.3 Masės centras

Šis algoritmas yra grindžiamas masės vidurkio metodu stulpelyje vektoriaus $\mathbf{i}(x)$ ir grąžina masės centro poziciją. Jis pasirinktas todėl, kad analizuojant literatūrą, jis buvo minimas kaip vienas tiksliausių [5,6].

$$p_{opt} = \frac{\sum_{x=k}^l \mathbf{i}(x)x}{\sum_{x=k}^l \mathbf{i}(x)}, \quad l > k \quad (10)$$

Radus masės centrus, linija išbrėžiama, randant gauto masyvo minimalią bei maksimalią reikšmes. Šiuo atveju modos ir antros dažniausiai pasikartojančios vertės būdo taikyti nepavyksta, nes šios reikšmės visada bus ant objekto esančioje linijoje dėl gaunamos tolygios kreivės.



3.21 pav. Kontaktinių lęšių dėžutės nuotrauka a – originali, pilki tonai, b – pritaikius masės centro algoritmą ir nubrėžus linijas, c – gautos reikšmės a nuotraukoje

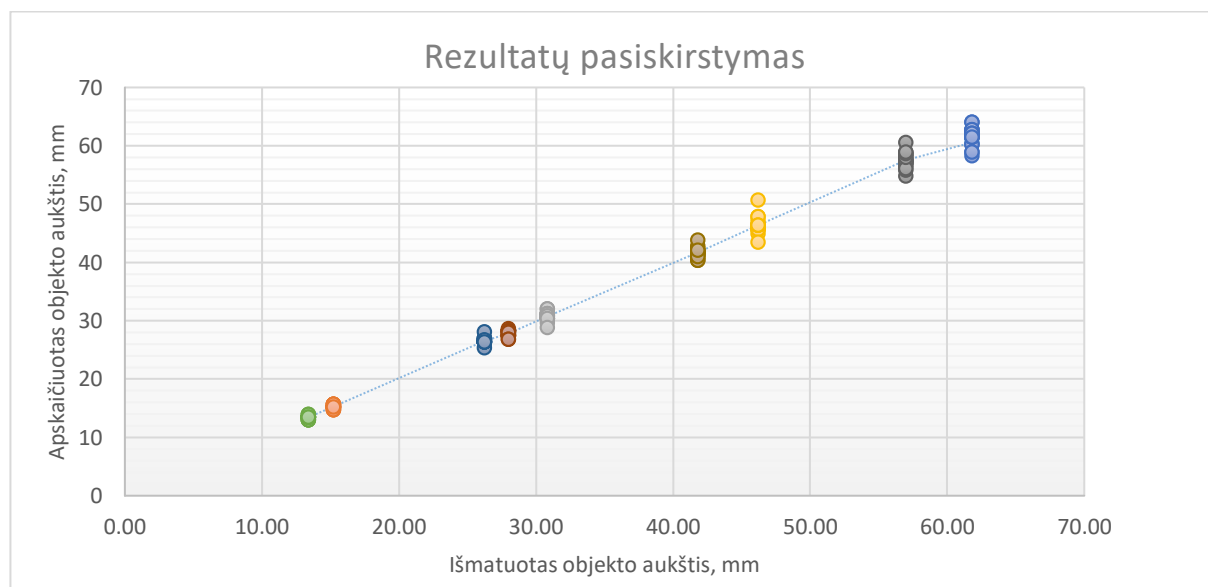
Kaip matyti iš nuotraukų (žr. 3.21 pav.), gaunami taškai yra tolygiai pasiskirstę, nėra šuolių tarp gretimų taškų, išvengiama pavienių, daug nutolusių taškų. Šiuo metodu gauti rezultatai pateikti 3.8 lentelėje.

3.8 lentelė. Gauti rezultatai atlikus skaičiavimus masės centro metodu

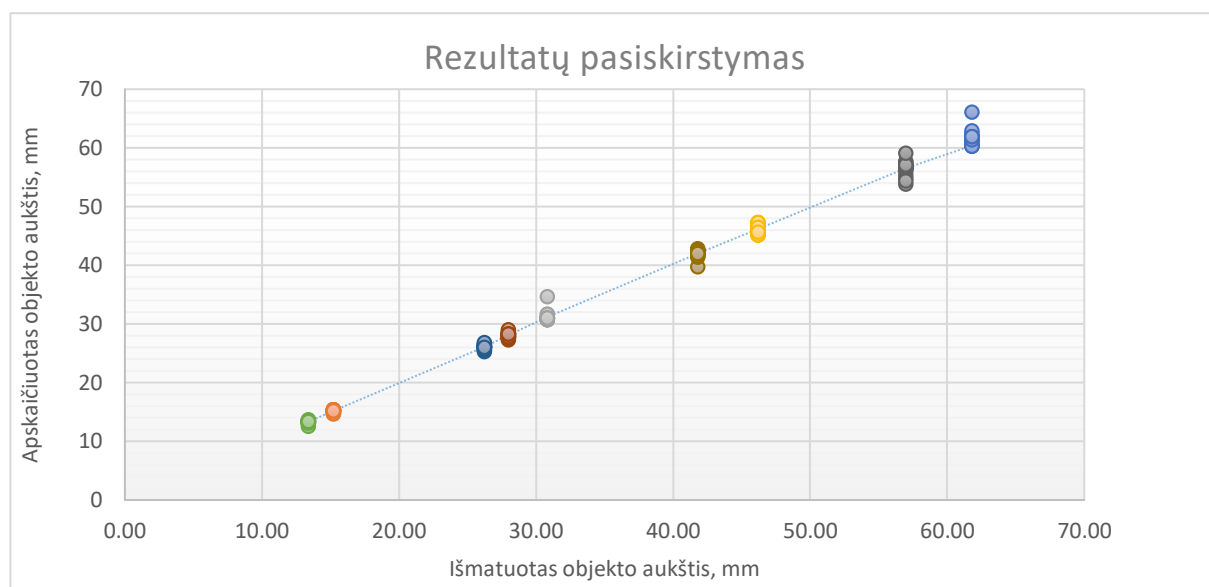
Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	15,25	0,22	1,44%	15,21	15,18	0,16	1,02%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	30,76	0,50	1,62%	30,82	31,20	0,38	1,25%
Tris degtukų dėžutės	46,20	46,35	0,81	1,76%	46,20	46,16	0,60	1,29%
Keturių degtukų dėžutės	61,80	61,51	1,17	1,90%	61,80	61,78	0,93	1,50%
Lešių dėžutė	13,39	13,45	0,19	1,43%	13,32	0,07	0,13	0,97%
Dvi lešių dėžutės	26,24	26,57	0,39	1,50%	26,24	26,08	0,29	1,12%
Medinė dėžutė	28,00	27,83	0,44	1,58%	28,00	28,07	0,33	1,16%
Dvi medinės dėžutės	57,00	57,56	1,05	1,85%	57,00	56,51	0,78	1,37%
Saldainių dėžutė	41,80	41,69	0,73	1,76%	41,80	42,04	0,54	1,28%

Vidutinė greitaiveika: 148,0ms – 640x480 rezoliucija, 153,9ms – 800x600 rezoliucija.

Kaip matyti iš 3.8 lentelės duomenų, mažiausia gauta vidutinė paklaida lygi 0,97%. Verta atkreipti dėmesį į tai, kad šiuo metodu pavyko apdoroti visas nuotraukas nepriklausomai nuo objekto matmenų. Tai reiškia, kad naudojant masės centro metodą galima sukurti universalią sistemą, kuri būtų nesudėtingai pritaikoma skirtingiems matuojamiems objektams. Gautų rezultatų pasiskirstymas apie vidutines vertes pateiktas 3.22, 3.23 paveiksluose.



3.22 pav. Rezultatų pasiskirstymas masės centro metodu (rezoliucija 640x480)



3.23 pav. Rezultatų pasiskirstymas masės centro metodu (rezoliucija 800x600)

Kaip matyti grafikuose, gautų rezultatų sklaida proporcingai didėja su objekto aukščiu. Matuojant žemiausius objektus sklaida mažai pastebima, tačiau didėjant sulig objekto aukščiu sklaida didėja, o kartais pasitaiko ir daugiau nutolusių taškų.

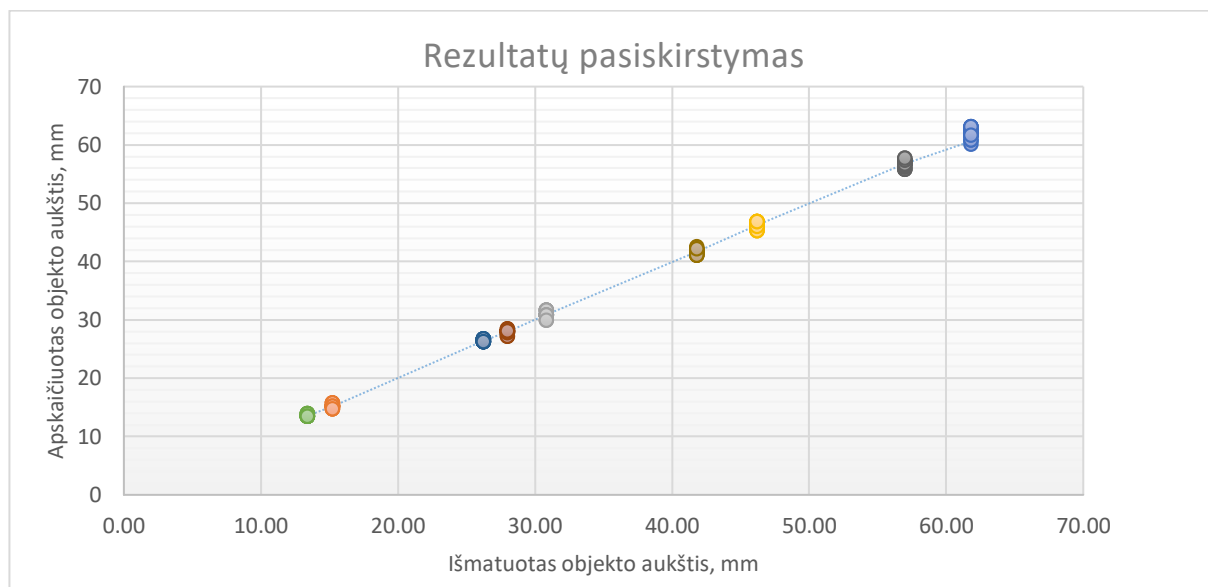
Siekiant tikslesnio rezultato, įvedama korekcija, t.y. dalis kraštutinių reikšmių atmetama, nes tai pavienės reikšmės arba triukšmai. Gauti rezultatai atlikus skaičiavimus po korekcijos pateikti 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Gauti rezultatai naudojant masės centro metodą su koregavimo konstanta

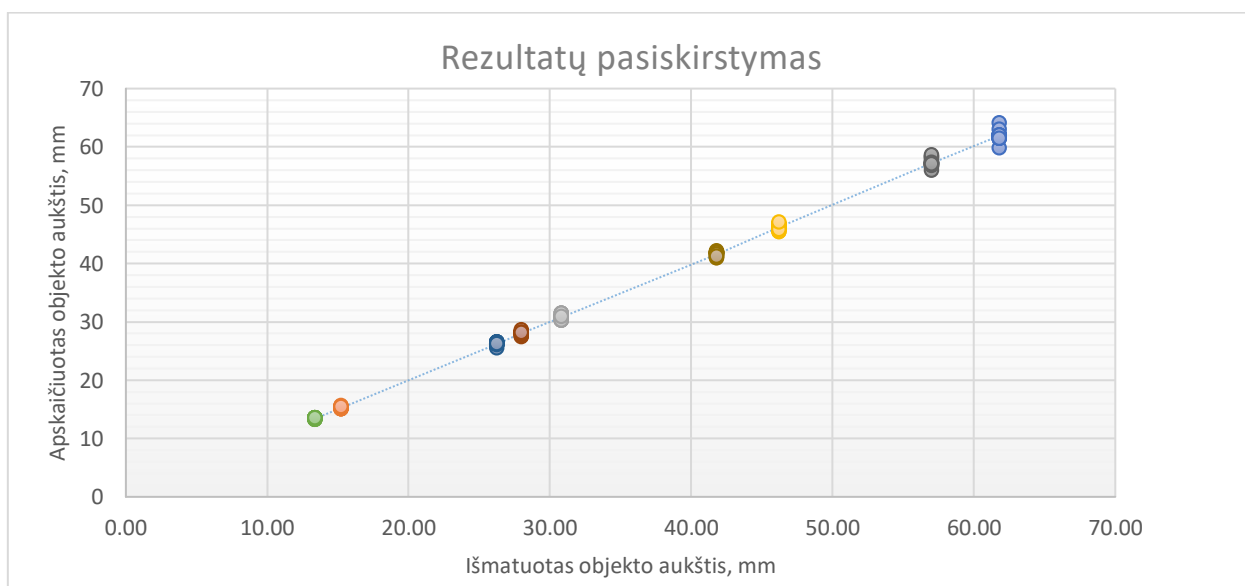
Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida		Išmatuotas objekto aukštis, mm	Gautas objekto aukštis, mm	Vidutinė paklaida	
			mm	%			mm	%
Degtukų dėžutė	15,21	15,21	0,12	0,77%	15,21	15,24	0,11	0,72%
Dvi degtukų dėžutės	30,82	30,90	0,33	1,08%	30,82	30,81	0,24	0,79%
Tris degtukų dėžutės	46,20	46,29	0,51	1,11%	46,20	46,26	0,38	0,82%
Keturių degtukų dėžutės	61,80	61,98	0,82	1,33%	61,80	61,79	0,57	0,92%
Lešių dėžutė	13,39	13,56	0,10	0,74%	13,39	13,43	0,08	0,60%
Dvi lešių dėžutės	26,24	26,44	0,21	0,81%	26,24	26,24	0,19	0,74%
Medinė dėžutė	28,00	27,96	0,24	0,85%	28,00	28,02	0,21	0,74%
Dvi medinės dėžutės	57,00	56,80	0,72	1,27%	57,00	57,24	0,49	0,87%
Saldainių dėžutė	41,80	41,72	0,46	1,10%	41,80	41,58	0,33	0,79%

Vidutinė greitaveika: 115,0ms – 640x480 rezoliucija, 149,8s – 800x600 rezoliucija.

Aukščiau pateiktoje lentelėje matoma, kad įvedus korekciją, rezultatai gaunami geresni. Vidutinė paklaida varijuoja 0,74%–1,33%, dirbant su 640x480 rezoliucijos nuotraukomis ir 0,60%–0,92%, kai tyrimas atliekamas su 800x600 rezoliucijos nuotraukomis. Šiuo atveju, įvedus koregavimo konstantą, gaunami vidutiniškai 1,55 karto tikslesni rezultatai. Todėl, nustačius proporcingumo koeficientą K , visuomet reikėtų atlikti papildomus bandymus su įvairių matmenų objektais ir įvertinti galimus triukšmus. Gautų rezultatų pasiskirstymas matuojamiems objektams pateiktas 3.24, 3.25 paveiksluose.



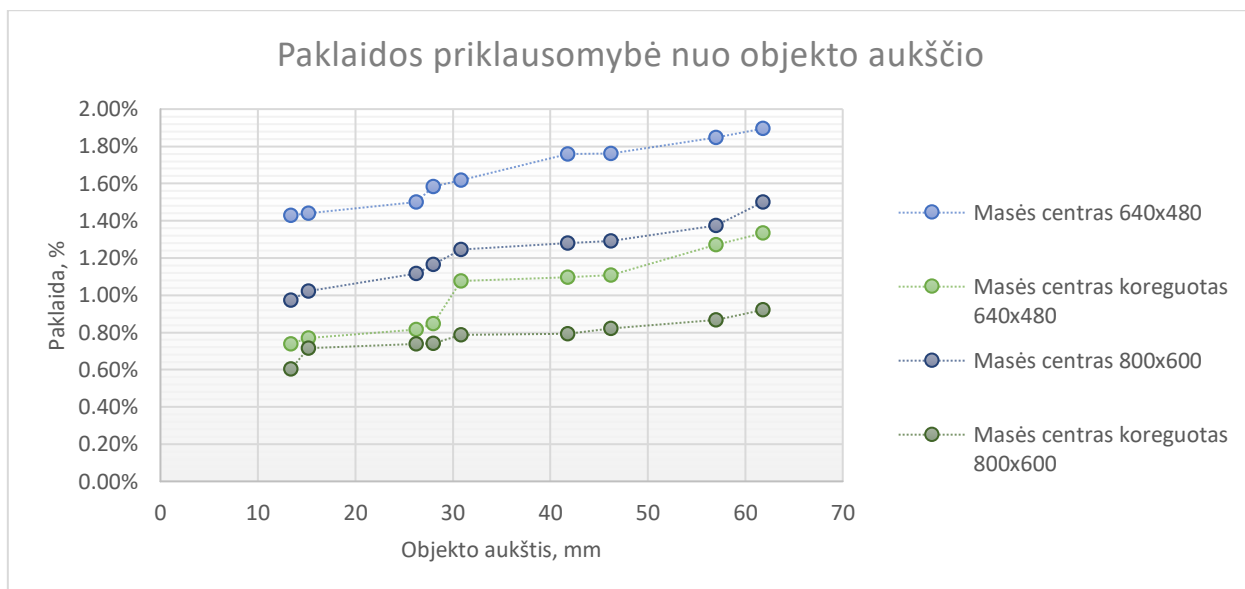
3.24 pav. Rezultatų pasiskirstymas koreguotu masės centro metodu (rezoliucija 640x480)



3.25 pav. Rezultatų pasiskirstymas koreguotu masės centro metodu (rezoliucija 800x600)

Kaip matyti grafikuose, gautų rezultatų sklaida proporcingai didėja su objekto aukščiu, kaip ir ankstesniu atveju, tačiau sklaida yra mažesnė, negu metodo be koregavimo konstantos (žr. 3.22, 3.23 pav.).

Masės centro metodu gauti rezultatai ir jų palyginimas pateikti 3.26 paveiksle. Čia pateiktos paklaidos, gautos paprastu ir koreguotu metodu, priklausomybė nuo objekto aukščio.



3.26 pav. Masės centro metodu gautų rezultatų palyginimas

Kaip matyti iš 3.26 paveikslo, įvedus koregavimo konstantą, gaunami vidutiniškai 54,6% (640x480 rezoliucijai) ir 55,1% (800x600 rezoliucijai) tikslesni rezultatai. Taip pat bendroju atveju geresni rezultatai gaunami, kai nuotraukos raiška yra didesnė – 800x600. Nors ši duomenų bazė padėjo įvertinti pasirinktus metodus, tačiau, siekiant gauti didesnę tikslumą, reikėtų apsvarstyti duomenų bazės sudarymą su didesnės rezoliucijos kamera.

Greitaveika taip pat gaunama didesnė, kuomet naudojamas metodas su koregavimo konstanta, tačiau gali skirtis iki 6,87 karto lyginant su greičiausiu metodu – maksimalaus piko. Apdorojant 800x600 raiškos nuotrauką gautos vidutinės greitaveikos: 0,154s be koregavimo ir 0,150s su koregavimu, o apdorojant 640x480 analogiškai 0,148s ir 0,115s.

Siekiant įvertinti naudotų metodų universalumą, buvo papildomai atliktas tyrimas matuojant sferinį kūną, o ne plokščią, kaip buvo ankstesniais atvejais. Tikslumo įvertinimui, gauti rezultatai yra palyginami su artimo aukščio plokščiu objektu – keturiomis degtukų dėžutėmis, kurių bendras aukštis yra 61,80mm. Tuo tarpu pasirinkto sferinio kūno aukštis lygus 61,20mm. Rezultatai pateikti 3.10 lentelėje.

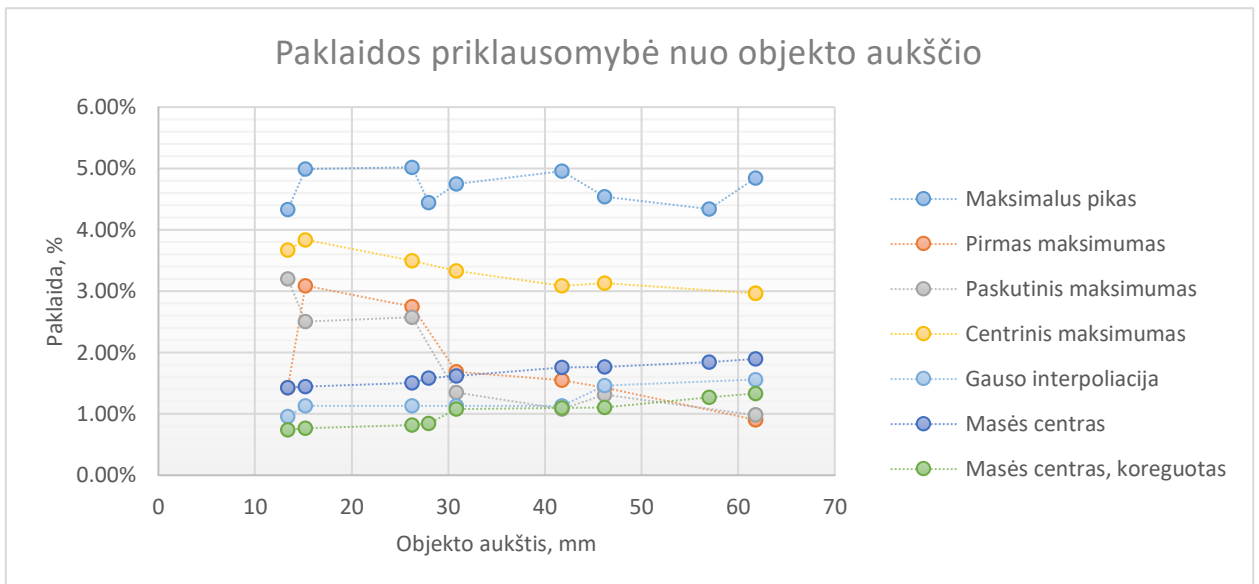
3.10 lentelė. Gautų rezultatų palyginimas, matuojant sferinį ir plokščią kūną

Nuotraukos rezoliucija	640x480 nuotrauka				800x600 nuotrauka			
	Vidutinė paklaida (kamuoliukas)		Vidutinė paklaida (dėžutė)		Vidutinė paklaida (kamuoliukas)		Vidutinė paklaida (dėžutė)	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Maksimalaus piko	5,76	9,42%	2,86	4,85%	3,68	6,05%	2,19	4,34%
Pirmas maksimumas	2,44	3,98%	0,11	0,90%	1,85	3,02%	0,41	0,66%
Paskutinis maksimumas	2,58	4,22%	0,60	0,98%	2,49	4,06%	0,28	0,45%
Centrinis maksimumas	3,51	5,74%	1,83	2,96%	3,28	5,37%	2,64	4,27%
Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacija	2,32	3,79%	0,96	1,56%	1,98	3,23%	0,77	1,24%
Masės centras	2,17	3,55%	1,17	1,90%	1,71	2,79%	0,93	1,50%
Masės centras, koreguotas	1,74	2,84%	0,82	1,33%	1,18	1,94%	0,57	0,92%

Kaip matyti iš 3.10 lentelės duomenų, tam tikrais metodais paklaida padidėja 1,94 karto, matuojant sferinį kūną. Reik įvertinti tai, kad sferinio kūno matmenys kinta su kiekvienu poslinkiu, todėl tiksliai nustatyti jo matmenis yra sudėtinga. Taip pat reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad tirti metodai yra pritaikyti tiesios linijos išskyrimui. Tuo tarpu ant kamuoliuko, dėl jo formas, lazerio linija yra matoma kaip puslankis, o ne tiesė. Tiesės atkarpa yra gaunama tik sferinio kūno viršūnėje.

3.3 Apibendrinimas

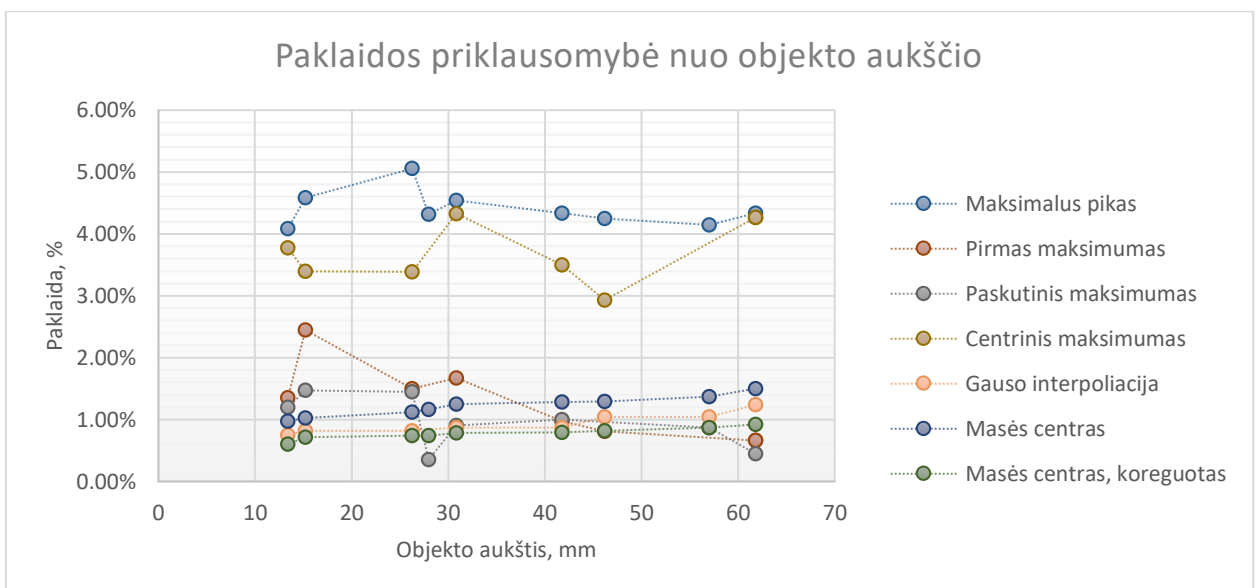
Darbo metu buvo pritaikyti trys linijos aptikimo algoritmai. Tai maksimalaus piko, Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacijos ir masės centro metodai. Siekiant gauti geresnius rezultatus, daliai algoritmų buvo pritaikytos tam tikros modifikacijos (įvedamos koregavimo konstantos, programiškai keičiama rezoliucija). Gautų rezultatų palyginimas pateiktas 3.27 ir 3.28 grafikuose.



3.27 pav. Naudotų metodų palyginimas (rezoliucija – 640x480)

Kaip matyti iš 3.27 paveikslo, mažiausia paklaida gaunama, naudojant koreguotą masės centro metodą. Paklaida varijuoja 0,74–1,33% intervale. Prasčiausias rezultatas gaunamas, taikant maksimalaus piko algoritmą tiesiogiai ir išrenkant maksimalią bei minimalią vertes (paklaida varijuoja 4,33–5,02% intervale).

Dėl nesudėtingų skaičiavimų, didžiausias programos vykdymo laikas (angl. *wall-time*), gaunamas taikant maksimalaus piko metodą – 7,9ms. Tuo tarpu tiksliausiu, masės centro metodu su koregavimo koeficientu, greitaveika siekia 115,0ms. Skirtumas lygus 14,56 karto.



3.28 pav. Naudotų metodų palyginimas (rezoliucija – 800x600)

Apdorojant aukštesnės rezoliucijos nuotraukas (800x600), matuojant tam tikrus objektus, geresni rezultatai gaunami paskutinio maksimumo metodu – paklaida lygi 0,36%, matuojant medinę dėžutę (žr. 3.28 pav.). Tačiau vertinant visus rezultatus, mažiausia vidutinė paklaida gaunama tuo pačiu metodu kaip ir anksčiau - koreguotu masės centro. Paklaida varijuoja 0,60–0,92% intervale (vidutinė paklaida 0,78%). Didžiausia paklaida gaunama, taikant maksimalaus piko algoritmą tiesiogiai, t.y. išrenkant maksimalią bei minimalią vertes iš gauto masyvo (vidutinė paklaida 4,41%). Vidutinės paklaidos skiriasi 5,65 karto. Kitas metodas, kuris pasižymi didele paklaida – maksimumų centro metodas. Didžiausia paklaida gaunama, visais atvejais, kai matuojamas sferinio kūno aukštis. Taip yra dėl pasikeitusios lazerio linijos pozicijos ant objekto, jį paslinkus. Taip pat, pasirinkti algoritmai išskiria liniją iš nuotraukos, o ant sferinio kūno lazerio skleidžiama šviesa matoma kaip puslankis, o ne linija.

Kaip ir apdorojant žemesnės rezoliucijos nuotraukas, taip ir dabar, trumpiausias programos vykdymo laikas, įskaitant vėlavimą ir resursų prieinamumo laukimą (angl. *wall-time*), gaunamas maksimalaus piko metodu – 11,7ms. O tiksliausiu, koreguotu masės centro metodu, vidutinė greیتaveika siekia 149,8ms. Skirtumas – 12,82 karto. Žinoma, greیتaveiką galima sumažinti optimizavus programą ir ją vykdant specializuotu kompiuteriu ar valdikliu.

4. REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Išanalizavus literatūrą, buvo pasirinkti ir išbandyti trys linijos aptikimo algoritmai. Tai maksimalaus piko, taikant skirtingus metodus, Gauso atotrūkio maksimumo interpoliacijos ir masės centro algoritmas su pritaikyta modifikacija.

2. Darbo metu buvo sukurtas nekontaktinės matavimo sistemos maketas, sudarytas iš lazerio ir vaizdo kameros.

3. Atlikus tyrimą, didžiausias tikslumas gautas, pritaikius masės centro linijos aptikimo algoritmą ir pritaikius pasiūlytą koregavimo koeficientą. Įvedus šį koeficientą, tikslumas padidėjo 36,1% (vidutinė paklaida siekia 0,78%), apdorojant 800x600 raiškos nuotraukas. Tai yra 22,8% didesnis tikslumas negu apdorojant 640x480 rezoliucijos nuotraukas.

4. Didžiausia greitimeika gauta maksimalaus piko algoritmu. Pastaroji yra iki 12,8 karto didesnė, lyginant su masės centro algoritmu, tačiau tikslumas 5,7 karto mažesnis.

5. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Wallace Latimer. Understanding laser-based 3D triangulation methods [žiūrėta 2016 m. balandžio 9 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-20/issue-6/features/understanding-laser-based-3d-triangulation-methods.html>.
2. Andrius Žukas. Trimačiai objektai: atvaizdavimo ir deformacijos algoritmai [žiūrėta 2016 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: http://vddb.library.lt/fedora/get/LT-eLABa-0001:E.02~2008~D_20080811_154705-59287/DS.005.0.01.ETD.
3. Y. Zhang, C. Wang, T. Xing. An optical distance measuring method using non-contact technology., Institute of Electrical Engineering. Yan Shan University. Qinhuangdao, Kinija, 2010m. ISBN: 978-1-4244-7506-3
4. H. Linhao, L. Xuebing, X. Zengxi. Study of the influence of the laser beam quality on the precision of long-range laser ranging. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016m.
5. L. Lin-jun, Y. Yan. High-Accuracy time-interval unit for spaceborne laser range finder. Chinese Journal of Lasers, 2007m.
6. J. Lu and Y. Huang, Laser triangulation method for surface measurement, Journal-Xiamen University Natural Science, 2004. 50–53 p. 43- 1.
7. Torsten Koch, Matthias Breier and Wei Li, Heightmap generation for printed circuit boards (PCB) using laser triangulation for pre-processing optimization in industrial recycling applications, Institute of Imaging and Computer Vision, RWTH Aachen University, 52056 Aachenas, Vokietija, 2013m. ISSN: 1935-4576
8. "Higher screen resolutions more popular for exploring the internet according to OneStat.com". techpowerup.com. 2016-01-22. [žiūrėta 2016 m. gruodžio 04 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.techpowerup.com/164027/1366-x-768-most-popular-screen-resolution-overtakes-1024-x-768-statcounter>
9. F. Blais and M. Rioux, "Real-time numerical peak detector," Signal Processing, 1986. 145–155 p. vol. 11, nr. 2.
10. Laser Detection Algorithm [žiūrėta 2016 m. gegužės 14 d.]. Prieiga per internetą: <https://blogs.ubc.ca/teamone/2010/11/26/laser-sensor/>
11. Gao Xuehai, Xu Kejun, Zhang Han. Position-pose measurement algorithm based on single camera and laser range-finder, Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007. 1479-1485 p. 28(1).
12. Dai Li-ming Jiang, Tong-jun. The Laser Triangulation Measuring Sensor for Accurate Displacement Measurement, Chinese Journal of Scientific Instrument, 1994. 400-404 p. 15(4).

13. Jin Hezhong. The development and application of laser precision distance measuring. *Laser Technology*, 1991m. 180-185 p. 15(3).
14. Zhang Xiaobing Jun Zhang Yi. A Research on the Method of Laser Triangulation of Calibrating Parameters of Long Displacement, *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002. 74-77 p. 19(1).
15. LIU Guozhong, WANG Boxiong, SUI Uui, LUO Xiuzhi, WANG Rui, Measurement system for 3-D foot shapes under different loads. 6-7 *Lapkritis* 2006. 246-250 p. ISBN: 0-86341-696-9.
16. David K. MacKinnon, Victor Aitken, Francois Blais A Comparison of Precision and Accuracy in Triangulation Laser RangeS canners *Gegužė* 2006. 832-837 p. E-ISBN: 1-4244-0038-4.
17. R. Marani, G. Roselli, M. Nitti, G. Cicirelli, T. D'Orazio, E. Stella. A 3D vision system for high resolution surface reconstruction. 3-5 *Gruodis* 2013. 157-162p. ISBN: 978-1-4673-5220-8.
18. M. Pardongel, B. Walravens, M. Demeyerel, K. Tran Duy , R. Olszewski, H. Reyhler, B. Raucent1 and C. Eugenal. 3D Reconstitution of Dentition by Laser Triangulation Under Structured Lighting 4-5 *Gegužė* 2007. 1-4 p. ISBN: 1-4244-1079-7.
19. Jigar Senjalia, Parinda Pandya, Harsh Kapadia, Measurement of wheel alignment using Camera Calibration and Laser Triangulation 28-30 *Lapkritis* 2013. 1-5 p. ISBN: 978-1-4799-0726-7.
20. Julio Molleda, Rubén Usamentiaga, Daniel F. García, Francisco G. Bulnes, Laura Ema. Shape Measurement of Steel Strips Using a Laser-Based Three-Dimensional Reconstruction Technique 3-7 *spalis* 2010. 1-8 p. ISBN: 978-1-4244-6393-0.
21. Hiroshi Akima, A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. *Birželis* 1978. 149-159 p.
22. C. Ting, Z. Liqiong, Z. Guizhen, C. Benyong. Design of a displacement/angle measurement system based on laser triangulation principle. 6-7 *Lapkritis* 2006. 319-322 p. ISBN: 0-86341-696-9.
23. Rameshwar Ashok Wagh, Dr. M.S.Panse, Hemant Apte. Calibration Method For Height Measurement Of Object Using Laser Triangulation [žiūrėta 2016 m. gruodžio 03 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ijteee.org/final-print/apr2015/Calibration-Method-For-Height-Measurement-Of-Object-Using-Laser-Triangulation.pdf>
24. OptoNCDT // Laser displacement sensors (triangulation) [žiūrėta 2017 m. kovo 13 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--optoNCDT--en-us.pdf>

25. D. Naidu and R. Fisher, "A comparative analysis of algorithms for determining the peak position of a stripe to sub-pixel accuracy," in Proc. British Machine Vision Conf, 1991, pp. 217–225.
26. S. Zhang, "Recent progresses on real-time 3d shape measurement using digital fringe projection techniques," Optics and Lasers in Engineering, vol. 48, pp. 149–158, 2010.
27. A. Anindya, "Minor elements distribution during the smelting of weee with copper scrap," Ph.D. dissertation, Civil, Environmental & Chemical Engineering, RMIT University, 2012.
28. S.A. Bouhamed, J.F. Eleuch, I.K. Kalleland and D.S. Masmoudi, "New electronic cane for visually impaired people for obstacle detection and recognition", IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Stambulas, Turkija, 2012.
29. T.C. Poon and P.P. Banerjee, "Contemporary optical image processing with MATLAB", Ed Elsevier Science, 2012.